Донбаська державна машинобудівна академія,
Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Міністерство освіти і науки України

*Кваліфікаційна наукова праця*
*на правах рукопису*

**Карнаух Сергій Григорович**

УДК 621.961.2:539.42+621.97-231.32

**ДИСЕРТАЦІЯ**

# РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ БЕЗВІДХОДНОГО РОЗДІЛЕННЯ СОРТОВОГО І ТРУБНОГО ПРОКАТУ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ СПОСОБІВ КОМБІНОВАНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

05.03.05 – Процеси та машини обробки тиском

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають
посилання на відповідне джерело  С.Г. Карнаух

Науковий консультант Алієв Іграмотдін Сєражутдінович,
Заслужений діяч науки і техніки України,
доктор технічних наук, професор

Краматорськ – 2025

# АНОТАЦІЯ

*Карнаух С. Г.* Розвиток наукових основ та удосконалення процесів безвідходного розділення сортового і трубного прокату на основі застосування способів комбінованого навантаження. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – Процеси та машини обробки тиском. – Донбаська державна машинобудівна академія. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Краматорськ, 2025.

Дисертація спрямована на вирішення важливої науково-технічної проблеми підвищення ефективності процесів розділення сортового і трубного прокату на базі розвитку наукових основ, застосування нових технологічних способів і засобів комбінованого навантаження та розробки методик проектування технологічних процесів, обладнання та оснастки.

На підставі проведеного літературного аналізу встановлено шляхи розвитку процесів безвідходного розділення сортового і трубного прокату, обладнання і оснастки для їх реалізації. Визначено основні напрямки вдосконалення даної галузі обробки тиском, які полягають у створенні нових схем, підвищення можливостей відомих безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату та обладнання для їх реалізації, вивченні закономірностей формоутворення, оцінки технологічних можливостей, моделювання технологічних режимів, розробки методик розрахунку і проектування технологічних процесів з урахуванням особливостей зовнішнього силового і кінематичного впливу.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності процесів розділення сортового і трубного прокату на базі розвитку наукових основ, застосування нових технологічних способів і засобів комбінованого навантаження та розробки методик проектування технологічних процесів, обладнання та оснастки.

Об'єкт дослідження – процеси, обладнання і оснастка для розділення прокату на мірні заготовки. Предмет дослідження – методи аналізу і закономірності розвитку технологічних режимів, способи, обладнання і оснастка для безвідходного розділення

сортового і трубного прокату комбінованим навантаженням, оцінка їх технологічних можливостей.

Тема роботи відповідає пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки та науковому напрямку наукової школи «Нові швидкодійні технології й машини з комбінованим впливом на заготовку» Донбаської державної машинобудівної академії.

На підставі розробленої класифікації безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату, засобами комбінаторики виконаний синтез перспективних способів комбінованого навантаження, які дозволяють підвищити ефективність роботи обладнання та геометричну точність отриманих заготовок. Запропонована класифікації компактних виконавчих механізмів пресів і обґрунтована доцільність використання перспективних механізмів: клиношарнірних, кривошипно-кругових, кривошипно-кулісних та їх комбінацій, які забезпечують найбільш сприятливий силовий і кінематичний режим навантаження при виконанні операцій безвідходного розділення сортового і трубного прокату, що дозволяє зменшити величину енергосилових параметрів розділення та шкідливі наслідки розвантаження преса після зняття технологічного навантаження.

З використанням синергетичних критеріїв руйнування та величин граничних ступенів деформації створено класифікацію матеріалів за ознакою їх чутливості до руйнування, яка дозволяє зробити обґрунтований вибір способу розділення. На основі проведеного кластерного аналізу синергетичних критеріїв руйнування матеріалів установлено, що синергетичні критерії: «критерій поширення тріщини» і «критерій крихкості» є базовими інформативними ознаками і при додаванні до них будь-якого з решти критеріїв, вони утворюють шукані інформативні множини мінімальної потужності, що забезпечують із заданою вірогідністю класифікацію матеріалів по їхній чутливості до розділення. Запропоновано експериментальний метод визначення деформованості зразків при реалізації процесів безвідходного розділення сортового прокату за величинами повздовжньої і поперечної граничних деформацій, який доповнює метод з використанням синергетичних критеріїв руйнування. Запропоновано методику вибору способу розділення сортового прокату

за величинами критеріїв руйнування та повздовжньої і поперечної граничних деформацій.

Установлені закономірності та залежності технологічних параметрів процесу розділення сортового прокату комбінованим статико-динамічним навантаженням способом триточкової холодної ломки згином, із застосуванням методів скінченних різниць та скінченних елементів, що забезпечує плавний та симетричний режим прикладення навантаження відносно концентратора напружень і відповідно отримання заготовок підвищеної геометричної точності. Розроблені комплексні математичні моделі динамічного і статико-динамічного навантажень прокату на прес-молоті, які враховують вплив попереднього статичного навантаження і жорсткості системи «прес-молот – оснастка – зразок» на хвильовий силовий режим розділення. Встановлено, що більша частина енергії витрачається на зародження й в'язке підростання тріщини, тоді як енергія крихкого руйнування складає не більше (10…25)% від сумарної енергії розділення. Збільшення величини динамічної максимальної сили ломки, у порівнянні зі статичною, для досліджених матеріалів склало не більше 8%, за виключенням зразків із сталі 40Х, де приріст склав більше 30%. Наявність статичної сили в момент удару забезпечує певний вихідний рівень напружень розтягання у зоні концентратора напружень, що підвищує керованість тріщиною. З підвищенням швидкості деформування геометрична точність заготовок поліпшується, особливо при статико-динамічному навантаженні. Рекомендована величина статичної сили при комбінованому навантаженні – не менше 25% від сили ломки і збільшується зі зростанням жорсткості контакту рухомих деталей прес-молота, оснастки і зразка.

На підставі аналізу розробленої класифікації клиношарнірних механізмів, виявлений клиношарнірний механізм з увігнутим клином, який забезпечує максимальну технологічну силу на початку робочого ходу при розділенні прокату та має високу жорсткість. Із застосуванням аналітичних і графоаналітичних методів, методу скінченних елементів розроблені залежності для розрахунку технологічних параметрів процесу розділення сортового прокату на пресах з клиношарнірним механізмом з увігнутим клином. Застосування запропонованого клиношарнірного

механізму з увігнутим клином дозволяє збільшити коефіцієнт використання пресів за зусиллям до (0,7…0,8), зменшити наслідки розвантаження преса в момент зняття технологічного навантаження.

Основним недоліком клиношарнірного механізму є численна кількість поверхонь тертя. Для подолання цього недоліку запропонована і досліджена конструкція клиношарнірного механізму з увігнутим клином з поворотним ножем, який може бути використаний, у тому числі і для розділення фасонного прокату складної конфігурації. Застосування механізму дозволяє забезпечити складний плоский рух інструмента, результатом якого є сполучений процес відрізки зсувом і кручення. Встановлені залежності розрахунків геометричних і силових параметрів обладнання з використанням таких механізмів, які забезпечують раціональні режими відрізки. Величину параметру, який визначає положення центру обертання шарніру механізму, рекомендується вибирати рівною половині радіуса увігнутого клина.

На підставі аналізу теоретичних розрахунків процесу відрізки трубчастих заготовок за схемою «ексцентричного закручування» з використанням кривошипно-кругового механізму, виконаних за допомогою аналітичних методів та методу скінченних елементів, встановлені залежності для розрахунку геометричних і силових параметрів процесу розділення запропонованим способом. Виявлено, що зі збільшенням величини ексцентриситету енергосилові параметри розділення збільшуються. Для забезпечення геометричної точності отриманих заготовок величину ексцентриситету рекомендується приймати в діапазоні (0,5…1,5) від товщини стінки труби.

Із застосуванням графоаналітичних методів теорії механізмів і машин встановлені залежності для розрахунків геометричних, кінематичних і енергосилових параметрів обладнання із клиношарнірним приводом з увігнутим клином у комбінації з кривошипно-круговим або кривошипно-кулісним механізмами для розділення сортового і трубного прокату. Обґрунтована доцільність застосування додаткового клина з постійним кутом нахилу до $10^0$, який може бути використаний для ходу наближення, вибірки зазорів, зміни кута нахилу

увігнутого клина, що дозволяє забезпечити оптимальну траєкторію руху ножів і геометричну точність заготовок.

Застосування запропонованих конструкцій компактних виконавчих механізмів дозволяє зменшити енергосилові параметри процесу розділення, шкідливі наслідки розвантаження преса в кінці робочого ходу, підвищити його жорсткість, коефіцієнти корисної дії і використання преса за зусиллям.

Запропоновані і досліджені нові способи розділення сортового прокату комбінованим навантаженням за рахунок активних зусиль деформування пресом та реактивних зусиль пружної деформації технологічної системи, що дозволяє послідовно за один робочий хід виконувати операції «нанесення концентратора напружень – розділення» за схемами: «вдавлення клинового ножа – консольна ломка», «частковий зсув – консольна ломка», «частковий зсув – реверсний зсув».

Аналізом запропонованого способу розділення за схемою «вдавлення клинового ножа – консольна ломка», із застосуванням методів полів ліній ковзання і методу скінченних елементів, встановлено залежності енергосилових параметрів процесу розділення, співвідношення робіт нанесення концентратора напружень і консольної ломки. Виявлено, що величина роботи вдавлення клинового ножа складає не більше 20% від роботи розділення прокату, тому енергії розвантаження преса в момент зняття технологічного навантаження достатньо для нанесення ефективного концентратора напружень. Встановлено, що для нанесення ефективного концентратора напружень і забезпечення стійкості інструмента кут слід вибирати у діапазоні $(25 \ldots 40)^{\circ}$, а глибину вдавлення концентратора напружень – $(10\ldots20)\%$ від розміру поперечного перерізу зразка.

На підставі аналізу запропонованого способу розділення за схемою «частковий зсув – реверсивний зсув», із застосуванням методу скінченних елементів, встановлено залежності енергосилових параметрів процесу розділення. Виявлено, що робота нанесення концентратора напружень складає не більше 20% від роботи, що витрачається на розділення зразка. Це дозволяє стверджувати, що енергії розвантаження преса буде достатньо для нанесення ефективного

концентратора напружень за один робочий хід преса. Геометрична точність отриманих заготовок задовільна.

Аналізом запропонованого способу розділення за схемою «частковий зсув – консольна ломка», із застосуванням методу скінченних елементів, встановлено залежності енергосилових параметрів процесу розділення. Виявлено, що робота нанесення концентратора напружень складає не менше 60% від роботи, що витрачається на розділення зразка. Тому даний спосіб можна реалізувати лише при наявності додаткового джерела енергії, оскільки енергії розвантаження преса буде недостатньо для нанесення ефективного концентратора напружень. Геометрична точність заготовок, розділених за цією схемою виявилася низькою.

Встановлено, що на етапі нанесення концентратора напружень за схемами: «частковий зсув – консольна ломка», «частковий зсув – реверсний зсув», величини сили і роботи нанесення концентратора напружень, зі збільшенням ходу ножа, зростають у межах $(15 \dots 20)\%$ для матеріалів з різними механічними характеристиками. Таке зростання є незначним, оскільки відбувається зсув усього перерізу зразка відразу після контакту ножа із заготовкою. Зі збільшенням швидкості навантаження величини сили і роботи деформування також збільшуються.

Аналізом класифікацій конструкцій штампів з диференційованим затиском прокату та передніх упорів до них, виявлені конструктивні ознаки, які дозволили створити нові конструкції штампів з диференційованим затиском сортового прокату з високими техніко-економічними характеристиками. Відрізані на них заготовки мають високу геометричну точність. Результатами вимірювань, із застосуванням методів магнітно-порошкової та фарбо-капілярної дефектоскопії, встановлено відсутність торцевих тріщин на заготовках. Встановлені залежності для розрахунків силових параметрів процесу розділення сортового прокату комбінованим навантаженням у штампах з диференційованим затиском прокату, які відрізняються врахуванням впливу величин кутів клинових механізмів штампів та контактного тертя при відрізці, що дозволяє призначити оптимальні параметри механізмів штампів: кут передачі зусилля на затиск і відрізку прокату – $(30 \dots 40)^{\circ}$, а кут

передачі зусилля на затиск ножових вкладишів – $(27 \ldots 30)^{\circ}$. На основі теоретичного аналізу, проведених експериментальних досліджень і досвіду експлуатації штампів з диференційованим затиском прокату, були перевірені відомі й сформульовані нові рекомендації до проектування подібних штампів.

Адекватність теоретичних розрахунків підтверджено результатами експерименту (розбіжність до 8%). Новизна запропонованих способів та конструкцій обладнання і оснастки для їх реалізації захищена патентами України.

Методики вибору, розрахунку та проектування процесів розділення за новими способами, рекомендації щодо вибору величин технологічних параметрів при розділенні сортового і фасонного прокату з використанням запропонованих компактних виконавчих механізмів та штампів з диференційованим затиском прокату підготовлені до впровадження, процеси та оснащення розділення апробовані і впроваджені у виробництво. Результати досліджень використовуються в навчальному процесі у вигляді лекційного матеріалу, а також при виконанні проектних та практичних робіт студентами та магістрантами.

**Ключові слова:** відрізка зсувом, холодна ломка згином, прес, прес-молот, динамічне навантаження, статико-динамічне навантаження, клин, ніж, сила, енергія, концентратор напружень, диференційований затиск.

# ABSTRACT

*Karnaukh S. G.* Development of scientific foundations and improvement of the processes of weste-free separation of graded and tubular rolled products based on the application of combined load methods. – Qualification scientific work on the rights of the manuscript. Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technical Sciences in the Specialty 05.03.05 – Processes and Machines of Plastic Working. – Donbass State Engineering Academy. – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kramatorsk, 2025.

The dissertation is aimed at solving the important scientific and technical problem of increasing the efficiency of the separation of graded and tubular products on the basis of the development of scientific foundations, the application of new technological methods and means of combined loading and the development of methods for designing technological processes, equipment and stamps.

On the basis of the conducted literature analysis, the ways of developing the processes of waste-free separation of graded and tubular products, equipment and stamps for their implementation have been established. The main areas of improvement in this field of pressure processing have been determined, which consist in the creation of new schemes, increasing the possibilities of known waste-free methods of separating graded and tubular products and equipment for their implementation, studying the laws of forming, evaluating technological possibilities, modeling technological modes, developing calculation methods and designing technological processes taking into account the features of external force and kinematic influence.

The aim of the dissertation work is to increase the efficiency of the separation of graded and tubular products on the basis of the development of scientific foundations, the use of new technological methods and means of combined loading and the development of methods for designing technological processes, equipment and stamps.

The object of research is processes, equipment and stamps for dividing rolled steel into measured blanks. The subject of the study is methods of analysis and regularities of the development of technological regimes, methods, equipment and stamps for waste-free

separation of graded and tubular products with a combined load, assessment of their technological capabilities.

The topic of the work corresponds to the priority direction of the development of science and technology and the scientific direction of the scientific school «New high-speed technologies and machines with combined (static-dynamic) influence on the workpiece» of the Donbas State Machine-Building Academy.

The theme of the work reflects the priority development of science and technology and the scientific direction of the scientific school «New Swiss technology machines with combined (static-dynamic) injection into the workpiece» of the Donbass State Engineering Academy.

On the basis of the developed classification of waste-free methods of separation of graded and tubular products, a synthesis of promising methods of combined loading was performed using combinatorics, which allow to increase the efficiency of the equipment and the geometric accuracy of the obtained blanks. The proposed classification of compact executive mechanisms of presses and the substantiated feasibility of using promising mechanisms: wedge-hinged, crank-circular, crank-rocker and their combinations, which provide the most favorable power and kinematic load mode when performing operations of waste-free separation of graded and tubular products, which allows to reduce the amount of energy separation parameters and harmful consequences of unloading the press after removing the technological load.

With the use of synergistic criteria of destruction and the values of the limit degrees of deformation, a classification of materials based on their sensitivity to destruction was created, which allows you to make a reasonable choice of the method of separation. On the basis of the conducted cluster analysis of the synergistic criteria for the destruction of materials, it was established that the synergistic criteria: «criterion of crack propagation» and «criterion of fragility» are basic informative features, and when any of the remaining criteria are added to them, they form the sought-after informative sets of minimum power, which provide with a given probability the classification of materials according to their sensitivity to separation. An experimental method for determining the deformability of samples during the implementation of processes of waste-free separation of graded rolled

products by the values of longitudinal and transverse limit deformations is proposed, which complements the method using synergistic destruction criteria. A technique for choosing a method of separating graded rolled steel according to the values of the criteria of destruction and longitudinal and transverse limit deformations is proposed.

The regularities and dependences of the technological parameters of the process of separation of graded rolled steel by combined static and dynamic loading by the method of three-point cold breaking by bending, with the use of finite difference and finite element methods, are established, which ensures a smooth and symmetrical mode of applying the load relative to the stress concentrator and, accordingly, obtaining blanks of increased geometric accuracy. Complex mathematical models of dynamic and static-dynamic loads of rolled steel on the press hammer have been developed, which take into account the influence of the previous static load and stiffness of the «press hammer – fixture – sample» system on the wave force mode of separation. It was established that most of the energy is spent on the nucleation and viscous growth of the crack, while the energy of brittle fracture is no more than $(10\ldots25)\%$ of the total separation energy. The increase in the value of the dynamic maximum breaking force, in comparison with the static one, for the studied materials was no more than $8\%$, with the exception of samples made of $40H$ steel, where the increase was more than $30\%$. The presence of a static force at the moment of impact provides a certain initial level of tensile stresses in the zone of the stress concentrator, which increases the controllability of the crack. With an increase in the rate of deformation, the geometric accuracy of the workpieces improves, especially under static and dynamic loading. The recommended value of the static force under combined loading is at least $25\%$ of the breaking force and increases with the increase in stiffness of the contact between the moving parts of the press hammer, the tool and the sample.

Based on the analysis of the developed classification of wedge-hinged mechanisms, a wedge-hinged mechanism with a concave wedge was identified, which provides the maximum technological force at the beginning of the working stroke when separating the rolled steel and has high rigidity. With the use of analytical and grapho-analytical methods, the method of finite elements, dependencies were developed for the calculation of technological parameters of the process of separating graded rolled products on presses

with a wedge-hinged mechanism with a concave wedge. The use of the proposed wedge-hinged mechanism with a concave wedge makes it possible to increase the utilization factor of the presses by effort up to (0,7…0,8), to reduce the consequences of unloading the press at the moment of removing the technological load.

The main disadvantage of the wedge-hinged mechanism is the large number of friction surfaces. To overcome this shortcoming, the design of the hinged wedge mechanism with a concave wedge with a rotary knife, which can be used, including for separating shaped rolled products of a complex configuration, is proposed and investigated. The use of the mechanism makes it possible to ensure a complex flat movement of the tool, the result of which is a combined process of cutting by shear and torsion. The dependences of calculations of geometric and power parameters of the equipment using such mechanisms that provide rational cutting modes are established. The value of the parameter, which determines the position of the center of rotation of the hinge of the mechanism, is recommended to be chosen equal to half the radius of the concave wedge.

Based on the analysis of theoretical calculations of the process of cutting tubular blanks according to the scheme of «eccentric twisting» using a crank-circular mechanism, performed with the help of analytical methods and the method of finite elements, the dependencies for calculating the geometric and power parameters of the separation process by the proposed method are established. It was found that with an increase in the eccentricity, the energy parameters of separation increase. To ensure the geometric accuracy of the obtained blanks, it is recommended to take the eccentricity value in the range (0,5…1,5) of the pipe wall thickness.

With the application of grapho-analytical methods of the theory of mechanisms and machines, dependencies are established for the calculation of geometric, kinematic and power parameters of equipment with a wedge-hinged drive with a concave wedge in combination with crank-circular or crank-rocker mechanisms for separating graded and tubular products. Reasonable expediency of using an additional wedge with a constant angle of inclination up to $10^{\circ}$, which can be used for the approach stroke, selection of

clearances, changing the angle of inclination of the concave wedge, which allows to ensure the optimal trajectory of the knives and geometric accuracy of the workpieces.

The use of the proposed designs of compact executive mechanisms allows to reduce the energy parameters of the separation process, the harmful effects of unloading the press at the end of the working stroke, to increase its rigidity, the coefficients of useful action and the use of the press by effort.

Proposed and researched new methods of separating rolled steel by a combined load due to the active forces of deformation by the press and reactive forces of elastic deformation of the technological system, which allows you to consistently perform the operations of «applying a stress concentrator – separation» in one working stroke according to the schemes: «indentation of a wedge knife – cantilever breaking», «partial shift – cantilever failure», «partial shift – reverse shift».

The analysis of the proposed method of separation according to the scheme «indentation of a wedge knife – cantilever fracture», using the methods of slip line fields and the method of finite elements, determined the dependence of the energy parameters of the separation process, the ratio of the work of applying the stress concentrator and cantilever fracture. It was found that the value of the work of pressing the wedge knife is no more than 20% of the work of separating the rolled steel, therefore the energy of unloading the press at the moment of removing the technological load is sufficient to apply an effective stress concentrator. It was established that to apply an effective stress concentrator and ensure the stability of the tool, the angle should be selected in the range (25…40)°, and the depth of depression of the stress concentrator – (10…20)% of the cross-sectional size of the sample.

Based on the analysis of the proposed method of separation according to the «partial shear – reversible shear» scheme, using the finite element method, the dependences of the energy parameters of the separation process were established. It was found that the work of applying the stress concentrator is no more than 20% of the work spent on separating the sample. This allows us to assert that the press unloading energy will be sufficient to apply an effective stress concentrator in one working stroke of the press. The geometric accuracy of the obtained blanks is satisfactory.

The analysis of the proposed method of separation according to the «partial shear – cantilever failure» scheme, using the finite element method, established the dependence of the energy parameters of the separation process. It was found that the work of applying the stress concentrator is at least 60% of the work spent on separating the sample. Therefore, this method can be implemented only in the presence of an additional source of energy, since the energy of unloading the press will not be enough to apply an effective stress concentrator. The geometric accuracy of the workpieces divided according to this scheme turned out to be low.

It was found that at the stage of applying the stress concentrator according to the schemes: «partial shear – cantilever failure», «partial shear – reverse shear», the force and work of applying the stress concentrator, with an increase in the stroke of the knife, increase within (15…20)% for materials with different mechanical characteristics. Such an increase is insignificant, since the entire cross-section of the sample shifts immediately after the contact of the knife with the workpiece. With an increase in the load speed, the values of force and work of deformation also increase.

The analysis of the classifications of the designs of differential clamp stamp of rolled products and their front stops revealed structural features that allowed to create new designs of differential clamp stamp of graded rolled products with high technical and economic characteristics. The workpieces cut on them have high geometric accuracy. The results of the measurements, using the methods of magnetic-powder and paint-capillary defectoscopy, established the absence of end cracks on the workpieces. Established dependencies for calculating the power parameters of the process of separating graded rolled products by a combined load in differential clamp differential clamp stamp of the rolled products, which differ by taking into account the influence of the values of the angles of the wedge mechanisms of the stamps and contact friction during cutting, which allows you to assign the optimal parameters of the mechanisms of the stamps: the angle of force transfer to the clamp and section of the rolled product – (30 ... 40)°, and the angle of force transfer to the clamping of knife inserts – (27 ... 30)°. On the basis of theoretical analysis, conducted experimental studies and experience of operating differential clamp

stamp rolling clamp, known and formulated new recommendations for the design of such stamps were verified.

The adequacy of the theoretical calculations was confirmed by the results of the experiment (discrepancy up to 8%). The novelty of the proposed methods and constructions of equipment and tools for their implementation is protected by patents of Ukraine.

The methods of selection, calculation and design of separation processes by new methods, recommendations for the selection of technological parameter values when separating graded and shaped rolled products using the proposed compact executive mechanisms and differential clamp stamp of rolled products have been prepared for implementation, the separation processes and equipment have been tested and put into production. Research results are used in the educational process in the form of lecture material, as well as in the performance of project and practical work by students and master's students.

**Key words:** shear section, cold breaking by bending, press, hammer press, dynamic load, static-dynamic load, wedge, knife, force, energy, stress concentrator, differential clamp.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

***Монографії:***

1. Карнаух С. Г. Совершенствование безотходных способов разделения сортового проката и оборудования для получения заготовок высокого качества : монография. Краматорск: ДГМА. 2010. 196 с., ISBN 978-966-379-463-1.

2. Karnaukh S. G., Markov O. E. Study of the process of breaking rolled steel by bending for stamping under impact and combined loading. *«MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education»*. Scientific monograph. Riga, Latvia : Baltija Publishing. 2023. pp. 20–40, https://doi.org/10.30525/978-9934-26-382-8-2, ISBN 978-9934-26-382-8.

***Публікації у виданнях, що входять до міжнародних науковометричних баз даних:***

3. Karnaukh S. G., Karnaukh D. S. Research of the influence of deformation speed on energy and power adjectives of the process of three-point cold bend breaking and on alignment integrity of raw parts. *Metallurgical and Mining Industry*. 2011. 3. 3, pp. 107–114, https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84904025526&origin=resultslist (Scopus, Q3).

4. Markov O., Kosilov M., Panov V., Kukhar V., Karnaukh S., Ragulina N., Rizak P. Modeling and improvement of saddling a stepped hollow workpiece with a profiled tool. *Eastern-European journal of Enterprise Technologies*. 2019. 6/1(102), pp. 19–25, https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183663 (Scopus, Q2).

5. Karnaukh S. G., Markov O. E., Aliieva L. I., Kukhar V. V. Designing and researching of the equipment for cutting by breaking of rolled stock. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. 109. 9–12, pp. 2457–2464, https://doi.org/10.1007/s00170-020-05824-7 (Scopus, Q1).

6. Markov O., Panov V., Karnaukh S., Khvashchynskyi A., Zhytnikov R., Kukhar V., Kosilov M., Rizak P. Determining the deformed state in the process of rolling conical shells with a flange. *Eastern-European journal of Enterprise Technologies*. 2020.

6/1(108), pp. 34–41, https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.216523 (Scopus, Q3).

7. Karnaukh S. G, Chosta N. V., Markov O. E., Kukhar V. V. Development and research of the press operating mechanism, made in the form of the wedge-joint mechanism with a curving wedge for separation operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. 116, pp. 3305–3314, https://doi.org/10.1007/s00170-021-07718-8 (Scopus, Q1).

8. Karnaukh S. G., Markov O. E., Kukhar V. V., Shapoval K. V. Research of the rolled stock separating into workpieces using breaking by bending with dynamic and static-dynamic force. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. 120, pp. 2763–2776, https://doi.org/10.1007/s00170-022-08902-0 (Scopus, Q1).

9. Karnaukh S. G., Markov O. E., Kukhar V. V., Shapoval K. V. Classification of steels according to their sensitivity to fracture using a synergetic model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. 119, pp. 5277–5287, https://doi.org/10.1007/s00170-022-08653-y (Scopus, Q1).

10. Karnaukh S. G., Markov O. E., Shapoval A. A., Zubenko K. V. Development and research of the stamp for cutting of a rolled stock with a differentiated clamp. *FME Transactions*. 2022. 50 (4), pp. 674–682, https://doi.org/10.5937/fme2204674K (Scopus, Q2).

11. Karnaukh S. G., Markov O. E., Shapoval A. A., Hrudkina N. S. Selecting a cutting method for workpieces before stamping using synergetic fracture criteria and a deformability limit determination technique for separating processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. 129, pp. 5447–5455, https://doi.org/10.1007/s00170-023-12627-z (Scopus, Q2).

12. Karnaukh S. G., Markov O. E., Lysenko A. A. Research on the new process of separating hollow work-piece by eccentric torsion cutting for stamping. *FME Transactions journal*. 2023. 52 (1), pp. 29–36, https://doi.org/10.5937/fme2401029K (Scopus, Q2).

***Публікації у фахових виданнях України:***

13. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Владимиров Э. А., Шоленинов В. Е. Исследование установки для отрезки сортового проката эксцентричным закручиванием. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у*

*машинобудуванні та металургії: Збірник наукових праць ДДМА*. Краматорськ. 2000. С. 419–423.

14. Потапкин В. Ф., Роганов Л. Л., Сатонин О. В., Бегунов А. А., Карнаух С. Г. Математическое моделирование и расчет силовых параметров при совместном внедрении двух аболютно жестких клиньев различных высот и углов при вершине. *Захист металургійних машин від поломок: Збірник наукових праць*. Маріуполь. 2000. 5. С. 209–216.

15. Карнаух С. Г. Анализ безотходных способов разделения сортового проката на мерные заготовки. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: Збірник наукових праць*. Краматорськ–Слов'янськ. 2000. С. 400–403.

16. Карнаух С. Г., Бігунов О. О., Мучник О. Є. Дослідження процесу статико-динамічного навантаження зразків за схемою триточкового холодного ламання згином на прес-молотах. *Машинознавство*. 2000. 12. С. 31–36.

17. Карнаух С. Г., Винников М. А. Экспериментальные исследования процесса трехточечной ломки изгибом. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: Збірник наукових праць*. Краматорськ. 2001. С. 83–86.

18. Карнаух С. Г., Роганов Л. Л. Бєгунов О. О. Дослідження нового способу поділу сортового прокату за схемою «зсув – ламання». *Машинознавство*. 2001. 6(48). С. 33–35.

19. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г. Перспективные направления развития технологии и оборудования для разделения сортового проката на мерные заготовки. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: Збірник наукових праць*. Краматорськ. 2002. С. 201–205.

20. Карнаух С. Г., Бегунов А. А., Винников М. А. Экспериментальные исследования силовых параметров процесса внедрения жесткого клиновидного инструмента в прокат. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: Збірник наукових праць*. Краматорськ–Хмельницький. 2002. С. 91–93.

21. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г. Разработка безотходных способов разделения сортового проката и оборудование для его реализации. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: Збірник наукових праць*. Краматорськ. 2003. С. 376–380.

22. Карнаух С. Г., Винников М. А. Применение критериев разрушения материалов при выборе способа разделения сортового проката. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. ДДМА*. Краматорськ – Слов'янськ. 2003. С. 329–337.

23. Винников М. А., Карнаух С. Г. Выбор информативной системы критериев разделения материалов. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. ДДМА*. Краматорськ. 2004. С. 391–397.

24. Карнаух С. Г., Бегунов А. А., Добряк С. К., Винников М. А., Чоста Н. В. Экспериментальные исследования процесса трехточечной ломки проката изгибом при статическом и динамическом нагружении. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. ДДМА*. Краматорськ. 2005. С. 334–341.

25. Карнаух С. Г., Бегунов А. А., Добряк С. К., Чоста Н. В. Анализ процесса холодной ломки проката изгибом с перераспределением зон растягивающих и сжимающих напряжений по сечению проката. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. Краматорськ: ДДМА. 2005. 1. С. 53–56.

26. Карнаух С. Г., Чоста Н. В. Расчеты напряжений в зоне развития разрушающей трещины при холодной ломке изгибом. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. ДДМА*. Краматорськ. 2006. С. 327–331.

27. Карнаух С. Г., Чоста Н. В. Разработка новых способов разделения сортового проката и оборудования для их реализации с использованием методики синтеза комбинированных методов обработки. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. Краматорськ: ДДМА. 2006. 1(3). С. 105–111.

28. Карнаух С. Г., Чоста Н. В. Силовые характеристики безотходных

процессов разделения сортового проката на мерные заготовки. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. ДДМА*. Краматорськ. 2007. С. 247–252.

29. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Чоста Н. В., Шоленинов В. Е. Исследование механизмов с переменной клиновидностью для технологических процессов обработки металлов давлением с максимальной начальной силой. *Обработка материалов давлением.* Краматорск: ДГМА. 2008. 1(19). С. 342–347.

30. Роганов Л. Л., Чоста Н. В., Карнаух С. Г. Совершенствование клиношарнирных механизмов прессов для разделительных процессов обработки давлением. *Обработка материалов давлением*. Краматорск: ДГМА. 2009. 2(21). С. 333–338.

31. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. Определение предельной пластичности сортового проката при разделении способом ломки изгибом. *Вісник ДДМА*. Краматорськ: ДДМА. 2010. 1(18). С. 257–261.

32. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Чоста Н. В. Разделение сортового проката больших поперечных сечений способом отрезки сдвигом. *Обработка материалов давлением*. Краматорск: ДГМА. 2010. 2(23). С. 137–141.

33. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. Совершенствование исполнительных механизмов машин для реализации разделительных операций. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. Луганськ. 2011. 2(156). 2. С.27–33.

34. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. Исследование процесса разделения труб способом отрезки эксцентричным закручиванием. *Обработка материалов давлением.* Краматорск: ДГМА. 2012. 1(30). С. 233–238.

35. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. Анализ технологий и оборудования для разделения труб на мерные заготовки. Сообщение 1. *Обработка материалов давлением*. Краматорск: ДГМА. 2013. 1(34). С.120–128.

36. Карнаух С. Г. Разработка оборудования для реализации нового способа «сдвиг – ломка» для разделения проката (труб) на мерные заготовки. *Обработка материалов давлением.* Краматорск: ДГМА. 2016. 1(42). С. 250–258.

37. Федоринов В. А., Карнаух С. Г., Кулик А. Н. Разделение полос на мерные заготовки в условиях мелкосерийного производства *Обработка материалов давлением.* Краматорск: ДГМА. 2016. 2(43). С. 128–134.

38. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. Разработка новых конструкций оборудования и оснастки для разделения труб на мерные заготовки. Сообщение 2. *Обработка материалов давлением*. Краматорск: ДГМА. 2013. 2(35). С.147–153.

39. Карнаух С. Г. Разработка и исследование оборудования для разделения сортового проката на мерные заготовки. *Обработка материалов давлением.* Краматорск: ДГМА. 2017. 1(44). С. 222–228.

40. Карнаух С. Г. Совершенствование оборудования для разделения сортового проката на мерные заготовки. *Обработка материалов давлением.* Краматорск: ДГМА. 2017. 2(45). С. 154–160.

41. Karnaukh S. G. Development of the choice procedure for separation method of section iron complex criteria of materials destruction. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2017. 2(80). pp. 31 – 38, https://doi.org/10.20535/2521-1943.2017.80.113172.

42. Карнаух С. Г., Мироненко Е. В. Моделирование процесса разделения труб с использованием программного продукта Deform 3D. *Обработка материалов давлением*. Краматорск: ДГМА. 2018. 2(47). С. 54–59.

43. Карнаух С. Г. Экспериментальные исследования процесса разделения проката по схеме трехточечной холодной ломки изгибом при статико-динамическом нагружении. *Обработка материалов давлением.* Краматорск: ДГМА. 2019. 1(48). С. 110–117.

44. Карнаух С. Г. Перспективні технології заготівельного виробництва та обладнання для їх реалізації. *Обработка материалов давлением.* Краматорск: ДГМА. 2019. 2(49). С. 202 – 211, https://doi.org/10.37142/2076-2151/2019-2(49)202.

45. Карнаух С. Г., Чоста Н. В. Визначення енергосилових параметрів високошвидкісних машин з гідропружним приводом. *Вісник національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки металів у машинобудуванні та металургії. Збірник наукових праць.* Харків.

2020. 2(1356). С. 13–18, ISSN 2519-2671.

46. Карнаух С. Г. Дослідження енергосилових характеристик обладнання з гідропружним приводом. *Обработка материалов давлением.* Краматорск: ДГМА. 2020. 1(50). С. 272 – 281, https://doi.org/10.37142/2076-2151/2020-1(50)243.

47. Карнаух С. Г., Алієв І. С., Таган Л. В., Матвійчук В. А. Розробка штампів з диференційним затиском для різання заготовок під точне штампування. *Engineering, energy, transport. Scientific journals of Vinnitsa national agrarian university.* Вінниця: ВНТУ. 2021. 112. 4(115). С. 66–74, https://doi.org/10.37128/2520-6168-2021-4.

48. Karnaukh S. G., Aliiev I. S. Research of process of division of grade rolling on the measured blanks by method of breaking bend at static and shock loading. *Engineering, energy, transport. Scientific journals of Vinnitsa national agrarian university*. Вінниця: ВНТУ. 2021. 112. 1. С. 81–87, https://doi.org/10.37128/2520-6168-2021-1-10.

49. Алієв І. С., Марков О. Є., Карнаух С. Г. Розробка та дослідження конструкцій штампів для розділення профілів складної конфігурації на мірні заготовки. *Обробка матеріалів тиском. Materials Working by Pressure*. Краматорськ : ДДМА. 2022. 1(51). С. 154–165, https://doi.org/10.37142/2076-2151/2022-1(51)154.

50. Карнаух С. Г., Чоста Н. В. Розробка перспективних технологій і конструкцій обладнання для безвідходного розділення прокату. *Обробка матеріалів тиском. Materials Working by Pressure*. Краматорськ : ДДМА. 2023. 1(52). С. 170–181, https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1(52)170.

***Патенти України на корисну модель:***

51. Пат. 23759 Україна, B23D 31/00, B23D 23/00. Пристрій для поділу сортового прокату на мірні заготовки відрізкою зсувом. Карнаух С. Г., Чоста Н. В. u200613705; заявл. 25.12.2006; опубл. 11.06.2007. Бюл. 8.

52. Пат. 24635 Україна, B 23D 31/00, B23D 23/00. Пристрій для поділу сортового прокату на мірні заготовки відрізанням зсувом. Карнаух С. Г., Чоста Н. В. u200701465; заявл. 12.02.2007; опубл. 10.07.2007. Бюл. 10.

53. Пат. 51499 Україна, B23D 23/00, B23D 31/00. Пристрій для поділу сортового прокату способом ексцентричного закручування. Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. u200911580; заявл. 13.11.2009; опубл. 26.07.2010. Бюл. 14.

54. Пат. 51501 Україна, B23D 31/00,. B23D 23/00. Пристрій для поділу сортового прокату на мірні заготовки способом ексцентричного закручування. Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. u200911584; заявл. 13.11.2009; опубл. 26.07.2010. Бюл. №14.

55. Пат. 62302A Україна, B21H7/14. Пристрій для рифлення прокатних валків. Роганов Л. Л., Сатонин А. В., Карнаух С. Г., Бегунов А. А. 2003021808; заявл. 28.03.2003; опубл. 15.12.2003. Бюл. №12.

56. Пат. 74204 Україна, B23D 23/00, B23D 31/00. Пристрій для відрізання трубчастих деталей від циліндричної труби. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Роганов М. Л., Карнаух Д. С. u201202787; заявл. 12.03.2012; опубл. 25.10.2012. Бюл. №20.

57. Пат. 74405 Україна, B23D 23/00. Пристрій для холодної ломки труб. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. u201204703; заявл. 17.04.2012; опубл. 25.10.2012. Бюл. №20.

58. Пат. 85225 Україна, B23D 31/00, B23D 23/00. Пристрій для холодної ломки труб. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. u201306948; заявл. 03.06.2013; опубл. 11.11.2013. Бюл. №21.

59. Пат. 106828 Україна, B23D 27/00. Установка для ломки сортового прокату (труб). Карнаух С. Г., Карнаух Д. С., Чоста Н. В. u201510764; заявл. 05.11.2015; опубл. 10.05.2016. Бюл. №9.

60. Пат. 107698 Україна, B23D 27/00. Спосіб ломки труб. Карнаух С. Г., Карнаух Д. С., Чоста Н. В. u201510763; заявл. 05.11.2015; опубл. 24.06.2016. Бюл. №12.

61. Пат. 111267 Україна, B30B1/00. Прес-молот з клиношарнірним механізмом з увігнутим клином. Карнаух С. Г., Карнаух Д. С., Чоста Н. В., Коляденко А. В. u201603526; заявл. 04.04.2016; опубл. 10.11.2016. Бюл. №21.

62. Пат. 112669 Україна, B23D 31/00, B23D 23/00. Пристрій для ломки прокату згином. Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. u201606662; заявл. 17.06.2016; опубл. 26.12.2016. Бюл. №24.

63. Пат. 116199 Україна, B23D 23/00, B21B 1/02. Спосіб розділення прокату. Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. u201612115; заявл. 29.11.2016; опубл. 10.05.2017. Бюл. №9.

64. Пат. 116200 Україна, B23D 23/00. Спосіб ламання прокату (труб). Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. u201612116; заявл. 29.11.2016; опубл. 10.05.2017. Бюл. №9.

65. Пат. 124778 Україна, B23D 31/00, B23D 33/08, B23D 33/10, B23D 36/00. Механізм упору до штампу для відрізки сортового прокату зсувом. Карнаух С. Г., Карнаух Д. С., Літвиненко О. І. u201710245; заявл. 23.10.2017; опубл. 25.04.2018. Бюл. №8.

66. Пат. 124822 Україна, B23D 31/00, B23D 23/00. Штамп для відрізки прокату. Карнаух С. Г. u201710702; заявл. 03.11.2017; опубл. 25.04.2018. Бюл. №8.

67. Пат. 125304 Україна, B23D 15/00. Пристрій для відрізки прокату. Карнаух С. Г. u201710707; заявл. 03.11.2017; опубл. 10.05.2018. Бюл. №9.

68. Пат. 130634 Україна, B23D 23/00. Спосіб ломання прокату. Карнаух С. Г. u201710207; заявл. 23.10.2017; опубл. 26.12.2018. Бюл. №24.

69. Пат. 134608 Україна, B23D 23/00. Клиновий прес. Карнаух С. Г., Чоста Н. В. u201812759; заявл. 21.12.2018; опубл. 27.05.2019. Бюл. №10.

70. Пат. 134609 Україна, B23D 23/00. Установка для розділення прокату. Карнаух С. Г. u201812760; заявл. 21.12.2018; опубл. 27.05.2019. Бюл. №10.

71. Пат. 134610 Україна, B23D 23/00. Пристрій для розділення прокату. Карнаух С. Г., Сидюк Д. М. u201812761; заявл. 21.12.2018; опубл. 27.05.2019. Бюл. №10.

72. Пат. 134611 Україна, B23D 23/00. Установка для розділення прокату. Карнаух С. Г., Сидюк Д. М. u201812765; заявл. 21.12.2018; опубл. 27.05.2019. Бюл. №10.

73. Пат. 135926 Україна, G01P3/66. Пристрій для вимірювання максимальної швидкості високошвидкісних машин. Карнаух С. Г. u201901481; заявл. 14.02.2019; опубл. 25.07.2019. Бюл. №14.

74. Пат. 142424 Україна, B23D 23/00. Клиновий прес. Карнаух С. Г., Чоста Н. В. u201910277; заявл. 10.10.2019; опубл. 10.06.2020. Бюл. №11.

75. Пат. 147482 Україна, B26D 7/00. Упор до штампу для розділення сортового прокату. Карнаух С. Г., Марков О. Є. u202007617; заявл. 30.11.2020; опубл. 12.05.2021. Бюл. №19.

76. Пат. 147485 Україна, B26D 7/00. Упор до штампу для розділення сортового прокату відрізанням зсувом. Карнаух С. Г., Марков О. Є. u202007831; заявл. 08.12.2020; опубл. 12.05.2021. Бюл. №19.

77. Пат. 147486 Україна, B23D 23/00, B23D 31/00. Гідродинамічний хладнолом для розділення труб на мірні заготовки. Карнаух С. Г., Марков О. Є., Чоста Н. В. u202007833; заявл. 08.12.2020; опубл. 12.05.2021. Бюл. №19.

78. Пат. 148032 Україна, B26D 7/00. Упор до штампу для розділення сортового прокату. Карнаух С. Г., Марков О. Є. u202007832; заявл. 08.12.2020; опубл. 30.06.2021. Бюл. №26.

79. Пат. 148741 Україна, B26D 7/00. Упор до штампу для розділення сортового прокату. Карнаух С. Г., Марков О. Є. u202007625; заявл. 30.11.2020; опубл. 15.09.2021. Бюл. №37.

80. Пат. 154562 Україна, B23D 23/00. Клиновий прес для розділення прокату. Карнаух С. Г., Марков О. Є., Чоста Н. В. u202302171; заявл. 08.05.2023; опубл. 22.11.2023. Бюл. №47.

***Наукові праці апробаційного характеру:***

81. Roganov L. L., Karnaukh S. G., Karnaukh D. S., Shevchenko E. P. Process research of pipes sectioning with flat knife. *12th International conference «Research and development in mechanical industry» RaDMI.* 2012. 2. pp. 862–865.

82. Roganov L. L., Karnaukh S. G., Karnaukh D. S. Modelling of process of reception of measured cut-to-length sections from rolled section steel of circular section according to the scheme of incompletely closed parting cut. *12th International conference*

*«Research and development in mechanical industry» RaDMI.* 2012. 2. pp. 787–790.

83. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Кравченко Р. А., Шоленинов В. Е. Ресурсосберегающее оборудование для заготовительного производства приборостроения. Тез. докл. междунар. конф. «Современные материалы. технологии. оборудование и инструмент в машиностроении». Киев. 2000. С. 63–64.

84. Карнаух С. Г. Дослідження процесу розділення труб способом відрізки ексцентричним закручуванням. *Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка. технологія та інженерна освіта»*. Київ. 2017. С. 111–113.

85. Карнаух С. Г. Методика вибору безвідходного способу поділу сортового прокату (труб) на мірні заготовки. *Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка. технологія та інженерна освіта».* Київ. 2017. С. 181–183.

86. Карнаух С. Г. Разработка и исследование оборудования для разделения сортового проката на мерные заготовки. *Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості освіти»*. Київ. 2018. С.214–219.

87. Карнаух С. Г. Совершенствование механических способов разделения труб на мерные заготовки. *Тези доповідей X міжнародної науково-технічної конференції «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії»*. Київ. 2018. С.45–46.

88. Карнаух С. Г., Чоста Н. В. Совершенствование клиношарнирных механизмов прессов для разделительных процессов обработки давлением. *Прогресивна техніка. технологія та інженерна освіта: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції*. Київ – Херсон. 2019. С. 90–92.

89. Карнаух С. Г. Способ измерения максимальной скорости высокоскоростных машин. *Тези доповідей XI міжнародної науково-технічної конференції «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії».* Харків. 2019. С.68–69.

90. Karnaukh S. G. Research of the influence of deformation speed on energy and

power adjectives of the process of three-point cold bend breaking. *Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти: матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції*. Київ. 2020. С. 413–415.

91. Karnaukh S. G. Development of the choice procedure for separation method sectional. *Сучасні технології промислового комплексу-2020 VI Міжнародної науково-технічної конференції.* Херсон. 2020. С. 113–116.

92. Карнаух С. Г., Бахтін І. Д. Розробка і дослідження штампів з диференційним затиском прокату. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XIX Міжнародної науково-технічної конференції* / за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ: ДДМА. 2021. С. 55–57.

93. Karnaukh S. G. Research of process of division of grade rolling on the measured blanks. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XIX Міжнародної науково-технічної конференції* / за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ: ДДМА. 2021. С. 5–6.

94. Karnaukh S. G., Chosta N. V., Markov O. E., Rizak P. I. Research of the press operating mechanism made in the form of the wedge-joint mechanism with a curving wedge for separation operations. *Матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу 2021»*. Херсон: ХНТУ. 2021. 7. С. 39–41.

95. Karnaukh S. G. Research of the influence of deformation speed on energy and power adjectives of the process of bend breaking. *Тези доповідей V Міжнародної науково-технічної конференції «Зварювання та споріднені технології: перспективи розвитку»*. Краматорськ: ДДМА. 2021. С. 35–37.

96. Karnaukh S. G., Chosta N. V. The use classifier of material facture criteria. *Матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології. матеріали й обладнання в ливарному виробництві»*. Краматорськ: ДДМА. 2021. С. 158–159.

97. Карнаух С. Г., Чоста Н. В. Розробка допоміжних пристроїв до штампів для відрізки сортового прокату зсувом з диференційним затиском. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XX*

*Міжнародної науково-технічної конференції* / за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ – Тернопіль: ДДМА. 2022. С. 80–82.

98. Алієв І. С., Марков О. Є., Карнаух С. Г. Розробка штампів для розділення профілів складної конфігурації. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XX Міжнародної науково-технічної конференції* / за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ – Тернопіль: ДДМА. 2022. С. 25–27.

99. Karnaukh S. G. Study of the stamp for cutting bar sections with a differentiated clamp. *Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском: матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції*. Київ. 2023. С. 15–18.

100. Karnaukh S. G., Markov O. E., Aliiev I.S. Study of the rolled stock separating into workpieces using breaking by bending with static-dynamic loading. *International scientific conference «MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education»*. Riga, Latvia : «Baltija Publishing». 2023. 1. pp. 40–43, https://doi.org/10.30525/978-9934-26-361-3-11.

101. Karnaukh S. G. The use of a neural network classifier of material facture criteria for the rational choice of the method for separating bar. *Перспективні технології, матеріали й обладнання в ливарному виробництві*. *Матеріали IX міжнародної науково-технічної конференції* / під заг. ред. А. М. Фесенка, М. А. Турчаніна. Краматорськ : ДДМА. 2023. С. 172–174.

102. Karnaukh S. G., Chosta N. V. Study of the equipment for cutting by breaking of rolled metal. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XXII Міжнародної науково-технічної конференції* / за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ–Тернопіль: ДДМА. 2024. С. 10–13, ISBN 978-617-7889-70-9.

103. Карнаух С. Г., Чоста Н. В. Розробка обладнання з клиношарнірним приводом для операцій розділення сортового і трубного прокату. *Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод. Матеріали VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції* / за заг. ред. О. Ф. Тарасова. Краматорськ–Тернопіль: ДДМА. 2024. С. 11–14, ISBN 978-617-7889-73-0.

***Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:***

104. Karnaukh S. G. Studying the process of static-dynamic loading of a preform according to the scheme of three-point breaking by bending in press-hammers. *Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo. Obrabotka Metallov Davleniem.* 2001. 2. С. 8–12, https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0035763635&origin=resultslist (Scopus)

105. Карнаух С. Г., Шоленинов В. Е. Разработка процесса безотходной отрезки сортового проката эксцентричным закручиванием. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: Збірник наукових праць*. Краматорськ. 2001. С. 244–246.

106. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г. Современные подходы к реализации способа холодной ломки изгибом проката на мерные заготовки. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. ДДМА*. Краматорськ – Слов'янськ. 2003. С. 313–322.

107. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Жуков М. Б., Бегунов А. А., Ланкин П. Ю. Выбор параметров экспериментальных устройств для резки металла водяной струей с примесью частиц абразива. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: Збірник наукових праць*. Краматорськ. 2003. С. 460–470.

108. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Доброносов Ю. К., Бегунов А. А. Устройство для рифления прокатных валков. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: Збірник наукових праць*. Краматорськ. 2003. С. 101–103.

109. Карнаух С. Г., Карнаух Д. С., Чоста Н. В. Разработка оборудования для отрезки сортового проката (труб). *Обработка материалов давлением*. Краматорск: ДГМА. 2014. 1(38). С. 210–214.

110. Карнаух С. Г., Карнаух Д. С., Чоста Н. В. Разработка прогрессивных способов и конструкций оборудования для разделения сортового проката (труб) на мерные заготовки. *Обработка материалов давлением.* Краматорск: ДГМА. 2015.

1(40). С. 59–68.

111. Карнаух С. Г., Карнаух Д. С., Чоста Н. В. Разработка оборудования для разделения сортового проката (труб) на мерные заготовки с применением нитинола. *Обработка материалов давлением.* Краматорск: ДГМА. 2015. 2(41). С. 323–327.

112. Карнаух С. Г., Карнаух Д. С., Чоста Н. В., Коляденко А. В. Разработка специализированного оборудования статико-динамического действия для разделения проката (труб) на мерные заготовки. *Обработка материалов давлением.* Краматорск: ДГМА. 2016. 2(43). С. 152–160.

113. Карнаух С. Г., Карнаух Д. С., Таровик Н. Г., Чоста Н. В. Моделирование процессов разделения сортового проката на мерные заготовки. *Обработка материалов давлением.* Краматорск: ДГМА. 2016. 2(43). С. 41–45.

114. Карнаух С. Г. Исследование процесса разделения труб способом отрезки эксцентричным закручиванием. *Республиканский научный журнал «Вестник Карагандинского государственного индустриального университета»*. Караганда: КГИУ. 2018. 2 (21). С. 222–228.

115. Карнаух С. Г. Розробка та дослідження перспективних схем поділу труб на мірні заготовки. *Engineering, energy, transport. Scientific journals of Vinnitsa national agrarian university.* Вінниця: ВНАУ. 2021. 112. 1. С. 30–37, https://doi.org/10.37128/2520-6168-2021-1-4.

116. Карнаух С. Г. Підвищення якості заготовок. отриманих способом ломки згином при статико-динамічному навантаженні на прес-молоті. *Обробка матеріалів тиском. Materials Working by Pressure*. Краматорськ: ДДМА. 2022. 1(51). С. 123–133, https://doi.org/10.37142/2076-2151/2022-1(51)123.

117. Карнаух С. Г., Чоста Н. В. Розробка допоміжних пристроїв до штампів для відрізки сортового прокату зсувом з диференційним затиском. *Обробка матеріалів тиском. Materials Working by Pressure*. Краматорськ : ДДМА. 2022. 1(51). С. 188–195, https://doi.org/10.37142/2076-2151/2022-1(51)3.

# ЗМІСТ

**ВСТУП.....37**

**РОЗДІЛ 1 .....48**

**Аналіз напрямків, методів і рішень практичних, теоретичних завдань для створення та реалізації процесів, обладнання та оснастки для безвідходного розділення сортового і трубного прокату на мірні заготовки.....48**

1.1 Аналіз способів розділення сортового і трубного прокату .....48

1.2 Перспективні напрямки удосконалення безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату.....55

1.2.1 Схеми навантаження при реалізації безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату..... 60

1.2.2 Геометричні і силові параметри процесу розділення..... 66

1.2.3 Аналіз впливу концентраторів напружень на якість заготовок ..... 69

1.2.4 Аналіз впливу характеру навантаження при розділенні на якість заготовок..... 72

1.3 Аналіз обладнання і оснастки для розділення сортового і трубного прокату.....77

1.3.1 Аналіз типового і спеціалізованого ковальсько-пресового обладнання для процесів розділення сортового і трубного прокату ..... 77

1.3.2 Аналіз штампової оснастки для реалізації безвідходних операцій розділення сортового і трубного прокату..... 84

1.4 Сучасні підходи до реалізації способу холодної ломки згином .....88

1.5 Теоретичні і експериментальні дослідження процесів безвідходного розділення сортового і трубного прокату.....92

1.5.1 Моделювання процесів розділення сортового і трубного прокату методом скінченних елементів ..... 101

1.5.2 Експериментально-аналітичні та експериментальні методи..... 103

**РОЗДІЛ 2 .....105**

**Вибір напрямків і методів досліджень .....105**

2.1 Класифікація безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату.....105

2.2 Класифікація компактних виконавчих механізмів для реалізації способів безвідходного розділення сортового і трубного прокату.....122

2.3 Методика проведення теоретичних досліджень.....127

2.4 Вибір методів експериментальних досліджень .....133

**РОЗДІЛ 3 .....145**

**Обґрунтування методу вибору способів розділення сортового прокату із матеріалів з різними механічними характеристиками з використанням синергетичних критеріїв руйнування.....145**

3.1 Методика рішення завдання щодо визначення інформативності синергетичних критеріїв руйнування.....146

3.2 Метод визначення величин граничних деформацій для вибору способу розділення сортового прокату.....156

3.3 Експериментальні дослідження визначення величин граничних деформацій для вибору способу розділення сортового прокату.....158

**РОЗДІЛ 4 .....167**

**Розробка, моделювання та дослідження технологічних можливостей процесу розділення сортового прокату триточковою холодною ломкою згином при комбінованому статико-динамічному навантаженні на прес-молоті .....167**

4.1 Математичне моделювання процесів статичного, динамічного й статико-динамічного навантажень прокату за схемою триточкової ломки згином.....168

4.2 Моделювання процесу триточкової холодної ломки зразків при статичному, динамічному і статико-динамічному навантаженнях з використанням програмного комплексу Deform .....178

4.3 Експериментальні дослідження процесу розділення сортового прокату за схемою триточкової холодної ломки згином при статичному, динамічному та статико-динамічному навантаженнях .....182

4.4 Аналіз результатів теоретичних і експериментальних досліджень.....186

4.4.1 Дослідження впливу швидкості навантаження на величину коефіцієнта динамічності ..... 189

4.4.2 Дослідження впливу швидкості навантаження на енергосилові параметри розділення при триточковій холодній ломці згином..... 190

4.4.3 Дослідження впливу статичного, динамічного і комбінованого статико-динамічного навантажень на геометричну точність заготовок ..... 196

4.4.4 Дослідження впливу величини попереднього статичного навантаження на технологічний режим навантаження при комбінованій ломці згином ..... 198

4.5 Перспективні конструкції обладнання для комбінованого статико-динамічного навантаження при розділенні сортового прокату .....200

**РОЗДІЛ 5 .....206**

**Розробка, моделювання і дослідження технологічних можливостей процесу розділення сортового і трубного прокату за схемою комбінованого навантаження з використанням компактних виконавчих механізмів .....206**

5.1 Дослідження клиношарнірних механізмів для реалізації безвідходних способів розділення сортового прокату.....206

5.1.1 Класифікація і обґрунтування застосування клиношарнірних механізмів для процесів безвідходного розділення сортового і трубного прокату..... 206

5.1.2 Структурний, кінематичний і силовий аналіз клиношарнірного механізму з увігнутим клином ..... 209

5.1.3 Методика розрахунків геометричних, кінематичних і силових параметрів пресів з клиношарнірним механізмом з увігнутим клином ..... 219

5.1.4 Моделювання процесу відрізки сортового прокату із застосуванням клиношарнірного механізму з увігнутим клином за допомогою програмного комплексу Deform ..... 224

5.1.5 Експериментальні дослідження клиношарнірного механізму з увігнутим клином ..... 226

5.2 Дослідження нової конструкції установки із клиношарнірним механізмом з увігнутим клином із поворотним ножем для розділення фасонного прокату складної конфігурації.....228

5.2.1 Теоретичний аналіз клиношарнірного механізму з увігнутим клином із поворотним ножем ..... 231

5.2.2. Моделювання процесу відрізки фасонного прокату з використанням програмного комплексу Deform ..... 238

5.2.3 Експериментальні дослідження процесу розділення фасонного прокату..... 242

5.3 Дослідження процесу розділення трубного прокату за схемою ексцентричного закручування з використанням кривошипно-кругового механізму.....245

5.3.1 Математичне моделювання процесу розділення трубного прокату ..... 246

5.3.2 Моделювання процесу відрізки трубчастих заготовок з використанням програмного комплексу Deform ..... 249

5.3.3 Експериментальні дослідження процесу відрізки трубчастих заготовок..... 253

5.4 Аналіз конструктивних схем установок із спільним використанням клиношарнірного механізму з увігнутим клином і короткошатунних виконавчих механізмів.....256

5.5 Перспективні схеми обладнання з використанням компактних виконавчих механізмів.....272

**РОЗДІЛ 6 .....280**

**Розробка, моделювання і дослідження технологічних можливостей процесів розділення сортового прокату з використанням енергії розвантаження преса .....280**

6.1 Теоретичні дослідження процесу розділення за схемою «вдавлення клинового ножа – консольна ломка».....283

6.1.1 Математичне моделювання напружено-деформованого стану металу при нанесенні концентратора напружень клиновим інструментом ..... 283

6.1.2 Моделювання процесу розділення за схемою «вдавлення клинового ножа – консольна ломка» за допомогою програмного комплексу Deform..... 295

6.1.3 Експериментальні дослідження процесу розділення за схемою «вдавлення клинового ножа – консольна ломка згином»..... 303

6.2 Дослідження процесів розділення сортового прокату за схемами: «частковий зсув – консольна ломка», «частковий зсув – реверсний зсув» .....308

6.2.1 Моделювання процесу нанесення концентратора напружень частковим зсувом з використанням програмного комплексу Deform ..... 308

6.2.2 Перевірка результатів моделювання процесу нанесення концентратора напружень частковим зсувом аналітичним методом ..... 310

6.2.3 Моделювання процесу розділення сортового прокату способами «консольної ломки» і «реверсного зсуву» з використанням програмного комплексу Deform..... 316

6.2.4 Експериментальні дослідження процесу розділення зразків за схемами «частковий зсув – консольна ломка» та «частковий зсув – реверсивна відрізка»..... 320

6.3 Перспективні схеми обладнання з використанням енергії розвантаження преса для нанесення концентратора напружень .....324

**РОЗДІЛ 7 .....329**

**Дослідження та удосконалення штампів з диференційованим комбінованим навантаженням для розділення сортового прокату. .....329**

7.1 Класифікація штампів з диференційованим затиском прокату .....329

7.2 Аналіз базової конструкції штампу з диференційованим затиском прокату.....333

7.3 Теоретичні дослідження штампу з диференційованим затиском прокату конструкції ДДМА .....339

7.4 Експериментальні дослідження штампу з диференційованим затиском прокату (конструкції ДДМА).....345

7.5 Класифікація передніх упорів до штампів з диференційованим затиском прокату.....351

**ВИСНОВКИ .....361**

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....367**

**ДОДАТОК А .....403**

**ДОДАТОК Б.....406**

**ДОДАТОК В.....411**

# ВСТУП

**Актуальність проблеми.** Раціональне використання металу, економія енергоресурсів, зниження трудомісткості й поліпшення якості продукції – важливі завдання, які слід вирішувати на всіх технологічних етапах металообробного виробництва, починаючи з розділення сортового і трубного прокату на мірні заготовки. Зважаючи на те, що вартість матеріалів складає біля 60% від собівартості виготовлення продукції машинобудування в Україні і щорічно збільшується, перспективним напрямком вирішення зазначених проблем в галузях машинобудування є розробка комбінованих методів обробки металів тиском (ОМТ) для розділення сортового і трубного прокату, обладнання і оснастки для їх реалізації, які забезпечують можливість суміщених і додаткових силових і кінематичних впливів на заготовку при розділенні. У численних роботах, протягом останніх років, багато уваги приділяється вивченню питань використання можливостей комбінованого впливу за рахунок використання статико-динамічного навантаження, комбінацій різних деформацій, суміщення операцій для підвищення геометричної точності заготовок, продуктивності процесу розділення і надійності роботи обладнання.

При всьому різноманітті безвідходних способів і схем розділення сортового прокату важко виділити такі, які були б позбавлені тією чи іншою мірою недоліків, серед яких: недостатня геометрична точність отриманих заготовок, низька продуктивність процесу, висока метало- та енергоємність, вартість, а також конструктивна складність і металоємність існуючого устаткування. Тому потрібно проводити додаткові дослідження щодо підвищення ефективності відомих і розробки нових комбінованих процесів безвідходного розділення сортового прокату.

Робота пресів при реалізації операцій розділення сортового прокату супроводжується миттєвим скиданням технологічного навантаження в момент розділення, що призводить до руйнування деталей станини, приводу, фундаменту. З цієї причини устаткування для розділення прокату вибирають значно більшого

номінального зусилля у порівнянні з потрібною розрахованою силою розділення. Для зменшення наслідків пружного розвантаження преса необхідно застосовувати виконавчі механізми, які мають високу жорсткість та забезпечують силовий характер навантаження з максимальною силою на початку робочого ходу.

Попри наявність відомих рекомендацій для вибору того або іншого безвідходного способу розділення прокату, до сих пір не розроблено універсального підходу для реалізації такого вибору. Тому є нагальна потреба у розробці теоретичних основ обґрунтування методу вибору конкретної схеми і способу безвідходного розділення сортового прокату.

Зважаючи на вищевикладене, науково-прикладна проблема підвищення ефективності процесів безвідходного розділення сортового і трубного прокату на базі розвитку наукових основ, створення і застосування нових технологічних способів і засобів комбінованого навантаження та розробки методів розрахунків і методик проектування технологічних процесів розділення прокату, обладнання та оснастки, є ***актуальною***.

**Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.** Результати роботи спрямовані на вирішення завдань, поставлених у Стратегії розвитку Донецької області на період до 2027 року. Тема дисертаційної роботи відповідає пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки «Новітні ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі» і наукової школи Донбаської державної машинобудівної академії (ДДМА): «Нові швидкодійні технології й машини з комбінованим впливом на заготовку» та відповідає науковому напрямку «Розвиток ресурсозберігаючих процесів розділення сортового прокату і труб на основі створення нових технологічних способів і обладнання для їх реалізації» роботи кафедри основ проектування машин (ОПМ) ДДМА. Робота виконана в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт, передбачених планами Міністерства освіти і науки України (№ держреєстрації 0101U001746, 0104U004040, 0107U001304, 0109U002666, 0123U101703) та виконаних на кафедрі ОПМ ДДМА (№ держреєстрації 0102U001662, 0105U002443, 0107U008729, 0110U006164, 0113U003981, 0116U005580, 0119U103185, 0123U103870), а також в рамках

госпдоговірних науково-дослідних робіт та договорів про співдружність з підприємствами: ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (НКМЗ), ПАТ Енергомашспецсталь (ЕМСС), АТ Мотор Січ, ПАТ «Дружківський завод металевих виробів» (ДЗМВ), ТОВ «Завод рейкових скріплень». Автор був керівником і виконавцем при виконанні держбюджетних і госпдоговірних тем.

**Мета дисертаційної роботи:** підвищення ефективності процесів розділення сортового і трубного прокату на базі розвитку наукових основ, застосування нових технологічних способів і засобів комбінованого навантаження та розробки методик проектування технологічних процесів, обладнання та оснастки.

Для досягнення зазначеної мети поставлені і розв'язані **задачі**:

- аналіз напрямків, методів і рішень практичних, і теоретичних завдань для створення та реалізації процесів, обладнання та оснастки для безвідходного розділення сортового і трубного прокату на мірні заготовки;
- класифікація способів безвідходного розділення сортового і трубного прокату, розробка перспективних комбінованих схем навантаження;
- класифікація компактних виконавчих механізмів пресів, виявлення механізмів, які створюють ефективні силові і деформаційні режими комбінованим навантаженням при реалізації безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату;
- обґрунтування методу вибору безвідходного способу розділення сортового прокату із матеріалів з різними механічними характеристиками з використанням синергетичних критеріїв руйнування;
- розробка, моделювання та дослідження технологічних можливостей процесу розділення сортового прокату холодною ломкою згином при комбінованому статико-динамічному навантаженні на прес-молоті;
- розробка, моделювання і дослідження технологічних можливостей процесу розділення сортового і трубного прокату за схемою комбінованого навантаження з використанням компактних виконавчих механізмів;

- розробка, моделювання і дослідження технологічних можливостей процесів розділення сортового прокату з використанням енергії розвантаження преса;
- дослідження та удосконалення штампів з диференційованим комбінованим навантаженням для розділення сортового прокату, моделювання та аналіз закономірностей зміни силового режиму розділення;
- розробка на основі проведених досліджень нових технологічних способів і засобів комбінованого навантаження, методик розрахунку і проектування технологічних процесів, обладнання і оснастки для впровадження результатів досліджень в практику промислового виробництва та навчальний процес.

**Об'єкт дослідження.** Процеси, обладнання і оснастка для розділення прокату на мірні заготовки.

**Предмет дослідження.** Методи аналізу і закономірності розвитку технологічних режимів, способи, обладнання і оснастка для безвідходного розділення сортового і трубного прокату комбінованим навантаженням, оцінка їх технологічних можливостей.

**Методи дослідження.** У роботі використані теоретичні й експериментальні методи дослідження. Дослідження силового і деформаційного режимів процесів безвідходного розділення сортового і трубного прокату проведені з використанням методу полів ліній ковзання та скінченних елементів. Для оцінки граничних можливостей матеріалів до руйнування застосовані синергетичні критерії руйнування. В основу теоретичних досліджень обладнання і оснастки для реалізації безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату були покладені методи математичного моделювання на підставі положень теоретичної механіки, диференціального і інтегрального обчислень, аналітичні і графоаналітичні методи теорії механізмів і машин (ТММ), які використовуються при проектуванні ковальсько-пресового обладнання, метод скінченних різниць для розв’язку диференціальних рівнянь, що описують деформування елементів системи «прес-молот – оснастка – зразок».

Експериментальні дослідження проводились з використанням методу тензометрії. Геометричну точність заготовок досліджували методом

макроструктурного аналізу з виміром абсолютних і відносних величин викривлень геометричної форми та методами магнітно-порошкової, і фарбо-капілярної дефектоскопій. Експерименти проводилися в лабораторних і виробничих умовах, на спеціально виготовлених і модернізованих моделях та експериментальних зразках устаткування оригінальної конструкції. Механічні властивості визначені випробуванням зразків стандартними методами. Результати експериментів оброблені із застосуванням статистичних методів аналізу.

**Наукова новизна отриманих результатів.**

1. *Вперше,* розроблена класифікація безвідходних способів розділення сортового та трубного прокату і засобами комбінаторики виконаний синтез перспективних способів комбінованого навантаження, *які дозволяють* зменшити енергосилові параметри процесу розділення, зменшити наслідки розвантаження обладнання в момент зняття технологічного навантаження та підвищити геометричну точність отриманих заготовок.

2. *Вперше* запропоновано та науково обґрунтовано метод вибору способу безвідходного розділення сортового прокату із матеріалів з різними механічними характеристиками. *Суть новизни* у використанні синергетичних критеріїв руйнування та величин граничних деформацій і створенні класифікації матеріалів за ознакою їх чутливості до руйнування, *яка дозволяє* зробити обґрунтований вибір способу безвідходного розділення.

3. *Отримали подальший розвиток* закономірності та залежності технологічних параметрів процесу розділення сортового прокату комбінованим статико-динамічним навантаженням способом триточкової холодної ломки згином із застосуванням методів скінченних різниць та скінченних елементів, які, *на відміну від існуючих*, враховують вплив попереднього статичного навантаження і жорсткості системи «прес-молот – оснастка – зразок» на хвильовий силовий режим розділення, *що забезпечує* плавний та симетричний режим прикладення навантаження відносно концентратора напружень і відповідно отримання заготовок підвищеної геометричної точності.

4. *Вперше* із застосуванням аналітичних методів та методу скінченних елементів розроблені залежності для розрахунку технологічних параметрів процесу розділення сортового і фасонного прокату на пресах з клиношарнірними механізмами нової конструкції, *які на відміну* від типових виконавчих механізмів, забезпечують комбіноване навантаження і оптимальний графік зміни деформуючих зусиль, *що дозволяє* зменшити енергосилові параметри процесу розділення та шкідливі наслідки розвантаження пресу в кінці робочого ходу.

5. *Вперше* із застосуванням аналітичних методів та методу скінченних елементів розроблені залежності для розрахунків геометричних і силових параметрів процесу розділення трубного прокату комбінованим навантаженням з використанням кривошипно-кругового механізму, *який відрізняється* урахуванням високої жорсткості інструмента та його складного плоского руху у вигляді сполучення зсуву та кручення, *що дозволяє* зменшити енергосилові параметри процесу розділення та збільшити коефіцієнт використання пресів за зусиллям.

6. *Вперше* методами полів ліній ковзання і скінченних елементів обґрунтовані залежності для розрахунків енергосилових параметрів та закономірності процесу розділення сортового прокату комбінованим навантаженням за рахунок активних зусиль деформування пресом та реактивних зусиль пружної деформації технологічної системи, що дозволяє послідовно за один робочий хід виконувати операції нанесення концентраторів напружень вдавленням клинового ножа або частковим зсувом та остаточне розділення ломкою або реверсивним зсувом, *що дозволило* збільшити коефіцієнт корисної дії преса та продуктивність процесів розділення.

7. *Отримали подальший розвиток* залежності для розрахунків силових параметрів процесу розділення сортового прокату комбінованим навантаженням у штампах з диференційованим затиском прокату, *які відрізняються* врахуванням впливу величин кутів клинових механізмів штампу та контактного тертя при відрізці, *що дозволяє* призначити оптимальні параметри механізмів штампів, які забезпечують підвищення геометричної точності отриманих заготовок.

**Практичне значення отриманих результатів**

- методики вибору, розрахунку та проектування процесів розділення за новими способами, рекомендації щодо вибору величин технологічних параметрів при комбінованій статико-динамічній ломці прокату, розділенні сортового і фасонного прокату з використанням клиношарнірних механізмів запропонованих конструкцій, кривошипно-кругових і кривошипно-кулісних механізмів та штампів з диференційованим затиском прокату;
- методики розрахунку геометричних, кінематичних та силових параметрів і проектування обладнання і оснастки: з клиношарнірним механізмом з увігнутим клином для розділення сортового прокату, що дозволило спроектувати конструктивний ряд пресів із застосуванням цих механізмів; з клиношарнірним механізмом з увігнутим клином з поворотним ножем та кривошипно-круговим механізмом для розділення фасонного і трубного прокату; штампів з диференційованим затиском прокату;
- нові способи розділення сортового прокату: спосіб триточкової холодної ломки згином при комбінованому статико-динамічному навантаженні; спосіб розділення з використанням енергії розвантаження преса в момент зняття технологічного навантаження. Способи дозволяють підвищити геометричну точність отриманих заготовок, стійкість і надійність обладнання. Новизна способів розділення підтверджена патентами України;
- нові конструкції обладнання і оснастки: прес-молоти статико-динамічного навантаження, преси з клиношарнірним механізмом з увігнутим клином та з поворотним ножем, преси з кривошипно-круговим і кривошипно-кулісним механізмами, застосування яких забезпечує зменшення енергосилових параметрів, наслідків розвантаження пресів, збільшення коефіцієнтів корисної дії та використання пресів за зусиллям, штампи з диференційованим затиском прокату. Новизна запропонованих конструкцій захищена патентами України;
- методики і рекомендації підготовлені до впровадження, процеси та оснащення розділення апробовані і впроваджені у виробництво. Результати досліджень використовуються в навчальному процесі на кафедрі обробки металів

тиском у вигляді лекційного матеріалу в рамках викладання дисциплін: «Теорія процесів ковальсько-штампувального виробництва», «Технологія ковальсько-штампувального виробництва», а також при виконанні проектних та практичних робіт студентами та магістрантами спеціальності 136 «Металургія» і підготовки аспірантів за спеціальностями 132 «Матеріалознавство» та 131 «Прикладна механіка».

**Особистий внесок здобувача**: [2, 17, 24] – дослідження процесу розділення прокату за схемою триточкової холодної ломки згином при статичному, динамічному і комбінованому статико-динамічному навантаженні на прес-молоті, постановка задачі, проведення експериментів, обробка та аналіз результатів, висновки, [3, 8, 16, 48, 100, 112] – розробка математичних моделей; аналіз результатів, висновки, [61] – розробка перспективних конструкцій обладнання; [4, 6] – аналіз результатів; [5, 14, 108] – дослідження процесу нанесення концентратора напружень вдавленням клинового ножа, постановка задачі, розробка математичних моделей, аналіз результатів, висновки; [20] – проведення експериментів, обробка та аналіз результатів, висновки, [55, 63, 71] – розробка перспективних способів розділення і конструкцій обладнання; [7, 29, 30, 88, 94, 103] – теоретичні дослідження клиношарнірного механізму з увігнутим клином із застосуванням аналітичного, графоаналітичного методів ТММ, постановка задачі, математичні моделі, аналіз результатів, висновки, [69, 74] – розробка перспективних способів розділення і конструкцій обладнання; [9, 22, 23, 96] – постановка задачі, аналіз результатів теоретичних досліджень, розробка класифікації матеріалів щодо їх чутливості до руйнування та методики вибору безвідходного способу розділення сортового прокату із застосуванням синергетичних критеріїв руйнування; [10, 47, 92, 97] – розробка і дослідження штампів з диференційованим затиском прокату, постановка задачі, розробка математичних моделей та рекомендацій до проектування; [11, 31] – метод вибору безвідходного способу розділення сортового прокату із застосуванням величин граничних деформацій, постановка завдання, проведення експериментів, аналіз результатів, висновки; [12, 13, 38, 81] – дослідження процесу розділення

трубчастого прокату за схемою «ексцентричного закручування» аналітичним методом, постановка задачі, розробка математичної моделі, аналіз результатів, висновки, [33, 34, 60, 105] – розробка перспективних конструкцій обладнання; [18, 72] – дослідження процесу розділення з нанесенням концентратору напружень частковим зсувом, постановка задачі, розробка математичних моделей, обробка та аналіз результатів, висновки; [19, 21, 83, 102, 107] – аналіз сучасного стану безвідходних процесів розділення сортового і трубного прокату; [27, 35, 106, 109, 110] – розробка класифікацій безвідходних способів розділення та обладнання для їх реалізації; [25, 37, 62, 64] – постановка задачі, розробка способу розділення з перерозподілом зон напружень розтягання і стискання по перерізу прокату, висновки; [26, 28, 32, 42, 82, 113] – дослідження енергосилових параметрів розділення, постановка задачі, розробка математичних моделей, обробка та аналіз результатів, висновки; [45] – дослідження енергосилових параметрів обладнання з гідропружним приводом, розробка методів визначення енергосилових параметрів, обробка та аналіз результатів, висновки; [49, 98] – дослідження процесу розділення фасонного прокату, розробка математичних моделей, обробка та аналіз результатів, висновки; [50, 56–59, 77, 80, 111] – розробка перспективних конструкцій обладнання і оснастки для реалізації безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату; [51–54] – розробка перспективних конструкцій компактних виконавчих механізмів; [65, 75, 76, 78, 79, 117] – розробка перспективних конструкцій передніх упорів до штампів з диференційованим затиском прокату.

**Апробація роботи.** Основні положення роботи, наукові та практичні результати доповідалися на міжнародних науково-технічних конференціях (МНТК), всеукраїнських науково-технічних конференціях (ВНТК), міжнародних науково-практичних конференціях (МНПК) та конференціях регіонального рівня, в тому числі: XIII МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском: матеріали» (Київ, 2023), МНТК «Сучасні матеріали, технології, обладнання й інструмент у машинобудуванні» (Київ, 2000); XII МНТК «Research and development in mechanical industry» – RaDMI (Сербія, 2012); МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (Київ, 2017, 2018); International scientific conference

«MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education»: conference proceedings (Riga, 2023); XVI–XX МНТК «Досягнення і проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском» (Краматорськ, 2000 – 2023); XIII, XIV МНПК «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (Краматорськ, 2015, 2016); МНТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії» (Київ, 2018); МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (Київ-Херсон, 2019); XI МНТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії» (Харків, 2019); МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти» (Київ, 2020); VI МНТК «Сучасні технології промислового комплексу» (Херсон, 2020); МНТК «Теорія, технологія та машини обробки металів» (Кам'янське, 2020); МНТК «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (Краматорськ, 2021, 2022, 2024); VII МНТК «Сучасні технології промислового комплексу» (Херсон, 2021); V МНТК «Зварювання та споріднені технології: перспективи розвитку» (Краматорськ, 2021); VIII МНТК «Перспективні технології, матеріали й обладнання в ливарному виробництві» (Краматорськ, 2021); XIII МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском» (Київ, 2023), VIII ВНТК «Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод» (Краматорськ – Тернопіль, 2024).

**Публікації.** Матеріали дисертаційної роботи достатньо повно відображено в 117 опублікованих роботах:

–1 монографія і 1 розділ у колективній монографії;

–38 статей у наукових періодичних виданнях, включених до переліку фахових видань України;

–10 статей у виданнях, віднесених до першого-третього квартилів (Q1-Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports;

–30 патентів України на корисну модель;

–23 тези та доповіді на наукових конференціях;

–14 публікацій, які додатково відображають наукові результати дисертації.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, семи розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 415 сторінок машинописного тексту, з них 366 сторінки основного тексту, 160 рисунків і 33 таблиці, список використаних джерел з 362 найменування на 36 сторінках, анотації і 3 додатків.

Автор висловлює глибоку подяку науковому консультанту І. С. Алієву, Заслуженому діячу науки і техніки України, д-ру техн. наук, проф. за поради і консультації, а також д-рам техн. наук, проф.: Л. Л. Роганову, О. Є. Маркову, О. Ф. Тарасову, канд. техн. наук, доц. Н. В. Чості за допомогу при проведенні теоретичних, експериментальних досліджень і оформленні дисертації.

# РОЗДІЛ 1
# АНАЛІЗ НАПРЯМКІВ, МЕТОДІВ І РІШЕНЬ ПРАКТИЧНИХ, ТЕОРЕТИЧНИХ ЗАВДАНЬ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ, ОБЛАДНАННЯ ТА ОСНАСТКИ ДЛЯ БЕЗВІДХОДНОГО РОЗДІЛЕННЯ СОРТОВОГО І ТРУБНОГО ПРОКАТУ НА МІРНІ ЗАГОТОВКИ

Сортовий та трубний металопрокат – є одним із поширеніших видів продукції з металу. Для його виготовлення використовують сталі, кольорові метали та їх сплави. Продукція з сортового та трубного металопрокату застосовується в усіх сферах промислової діяльності та має великий асортимент за формою і розмірами. Сортовий прокат поділяється на різновиди, одним із них є фасонний металопрокат.

## 1.1 Аналіз способів розділення сортового і трубного прокату

Ефективність виробництва готової деталі суттєво залежить від якості заготовки, отриманої при розділенні. Якість заготовок оцінюють як комплексний параметр, який включає в себе: геометричну точність (рис. 1.1), стан поверхонь и стан металу на торцях та прилеглих до них зонах [1].

Потрібний рівень якості розділених заготовок диктується технологією наступної обробки, яка забезпечує, у свою чергу, якість готової деталі при найменшій її собівартості. Причому для більшості технологічних процесів обробки металів тиском немає потреби досягати однакових найменших відхилень геометричної форми й розмірів, а також шорсткості від деякої умовної заготовки, прийнятої за еталонну (рис. 1.1, а). Тому треба забезпечити відповідність форми й розмірів заготовки вимогам її формозміни при наступній обробці й умовам експлуатації деталі. Це вимагає розвиток всього різноманіття відомих і створення нових ефективних процесів розділення сортового і трубного прокату, а також устаткування для їх реалізації.

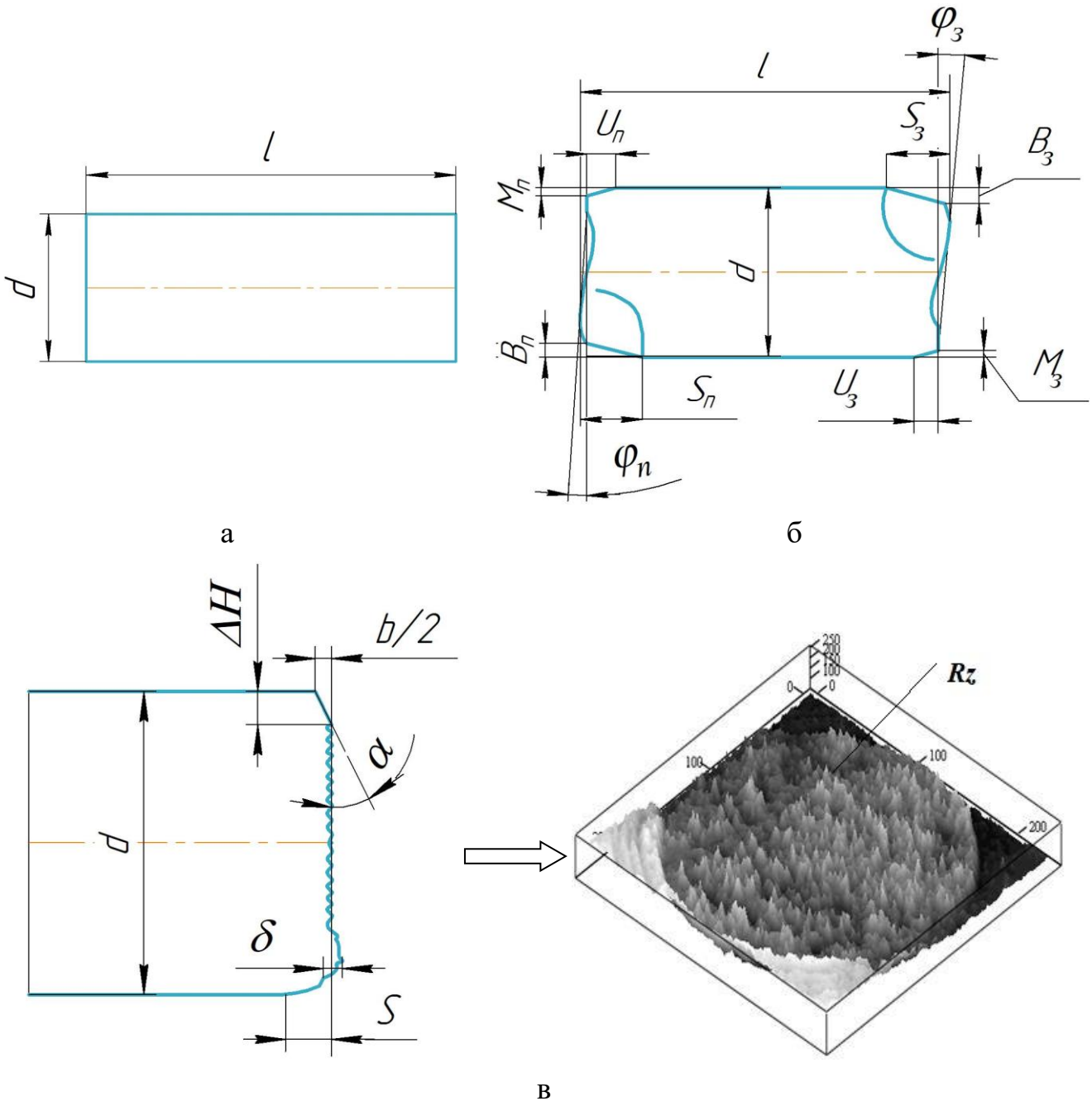



Рис. 1.1 – Параметри геометричної точності заготовок: умовна заготовка, прийнята за еталонну (а); $\varphi$ – кут скосу торця; $M, U$ – поперечний і повздовжній розміри утяжини; $B, S$ – поперечний і повздовжній розміри вм'ятини від ножа; $п, з$ – індекси для позначення переднього і заднього торців (б); $\delta$ – величина відхилення траєкторії тріщини від площини концентратора напружень, який має розміри: $\Delta H$ – глибина, $b, \alpha$ – ширина і кут між стінками, $Rz$ – висота нерівностей профілю торця [1, 2]

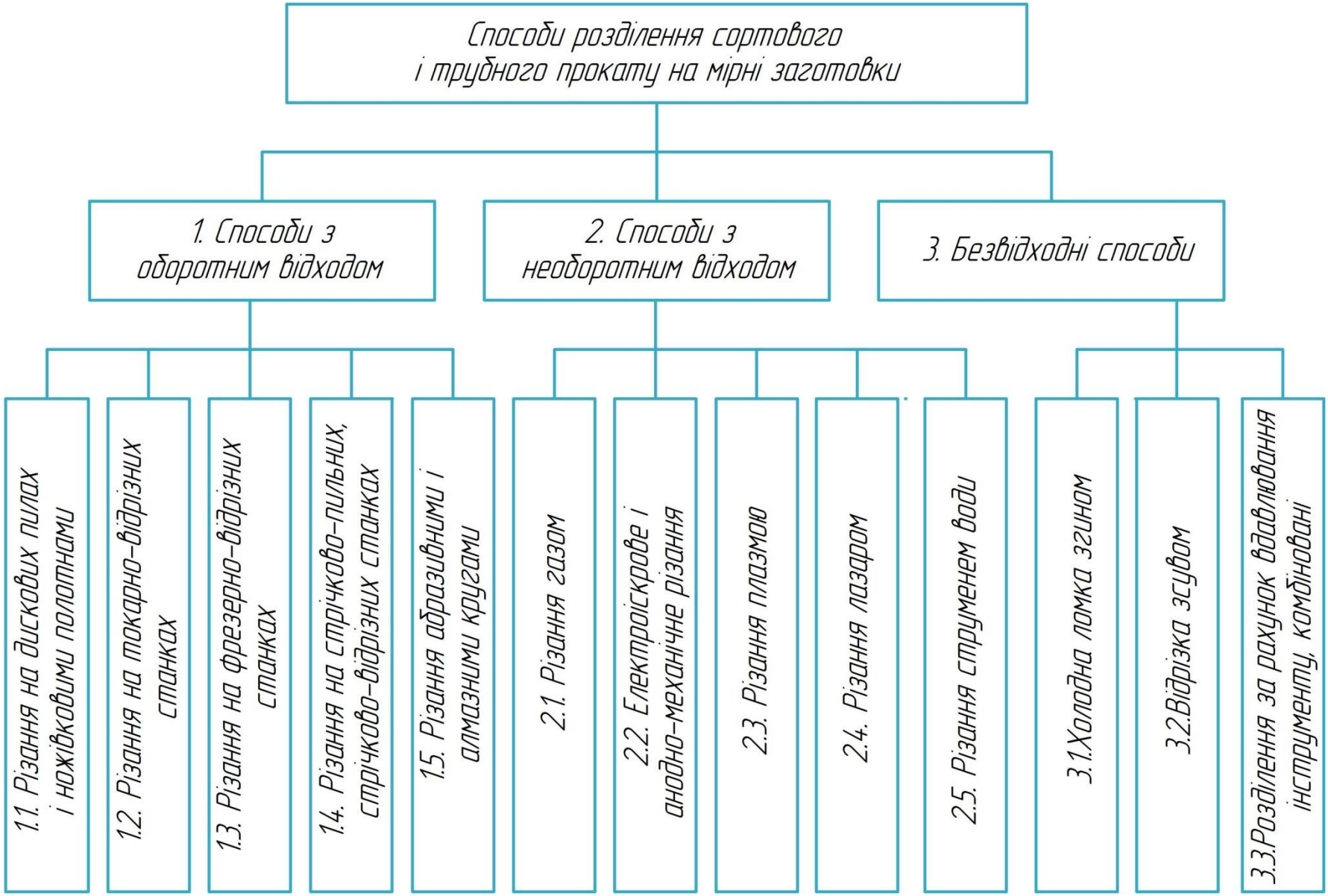



Рис. 1.2 – Класифікація способів розділення сортового і трубного прокату на мірні заготовки [3]

Для отримання мірних заготовок із сортового і трубного прокату в сучасних заготівельних виробництвах використовуються більш десяти різних способів, які нерівноцінні по своїх техніко-економічних показниках (рис. 1.2). Проаналізуємо найпоширеніші з них [4, 5].

Способи розділення сортового і трубного прокату оцінювалися за наступними показниками [6]: якістю заготовок; продуктивністю процесу; витратами енергії на розділення; витратою й дефіцитністю інструмента; складністю обладнання, оснастки і її універсальністю; практичністю, технологічністю й керованістю процесу, який повинен легко вбудовуватися в технології обробки; можливістю сполучення з іншими операціями обробки металів.

Усі відомі способи розділення сортового і трубного прокату [7 – 12] можна розбити на три групи (див. рис. 1.2):

- відходні способи з оборотним відходом (1): різання на дискових пилках, фрезерно-відрізних верстатах, токарських верстатах, приводних ножівках і т.д.;
- відходні способи з необоротним відходом (2): різання абразивним, фрикційними інструментами, газовим різанням, плазмою, лазером і т.д.;
- безвідходні способи (3): відрізка зсувом, холодна ломка згином та комбіновані способи.

Різання на дискових пилах (1.1) забезпечує кращу, у порівнянні з іншими способами, якість торців заготовки. Недоліком способу є порівняно низька продуктивність, великі витрати інструменту і додаткові відходи металу на кожний різ, а саме $(3{,}0 \ldots 8{,}0)$мм при дисках діаметром $(300 \ldots 800)$мм. Тому різання сталевого прокату на дискових пилках застосовують тільки в тих випадках, коли потрібна точна довжина заготовки й торець, строго перпендикулярний до осі [13].

Різання ножівковими полотнами (1.1) характеризується малою шириною різу $(2{,}5 \ldots 3{,}0)$мм, простотою обслуговування верстатів і невеликими витратами на реалізацію самого процесу. Однак для верстатів характерна низька стійкість інструменту, а їх продуктивність нижче, ніж фрезерно-відрізних і стрічкових інструментів [7].

До переваг роботи на токарно-відрізних верстатах (1.2) слід віднести високу точність і чистоту поверхні розрізання, універсальність і дешевину, легкість і простоту в обслуговуванні. До недоліків – підвищену витрату металу в стружку, можливість «недорізу» і необхідність його наступного видалення, а також невисоку стійкість різців.

Різання на фрезерно-відрізних верстатах (1.3) широко поширене у вітчизняній промисловості завдяки своїй універсальності, точності, простоті автоматизації циклу й порівняно високої продуктивності. Недоліком способу є витрати металу в стружку.

В промисловості використовують стрічково-відрізні й стрічково-пильні верстати (1.4) для різання прокату діаметром до 250 мм. Продуктивність різання стрічковими пилками вище в (5…6) разів, у порівнянні з відрізними ножівковими верстатами, і в (1,5…2,0) рази, ніж на фрезерно-відрізних верстатах.

Різання абразивними й алмазними дисками (1.5) одержало широке поширення у вітчизняній і закордонній промисловості. До переваг способу треба віднести його продуктивність, у порівнянні з розглянутими вище. До недоліків – обмеження розмірів поперечного перерізу прокату (до 60 мм), збільшені витрати інструмента при різанні абразивними дисками й висока вартість алмазних дисків. Шум, запиленість заготівельних ділянок разом із частою поломкою дисків і загартуванням поверхні різу знижують переваги способу.

Газове різання (ацетиленове, бензинове різання) (2.1) забезпечує невисоку якість заготовок. При цьому є досить продуктивним способом при застосуванні автоматизованого групового різання із застосуванням одночасно кількох різаків. З підвищенням у металі змісту вуглецю й легуючих елементів газове різання сталі ускладнюється. Оскільки при цьому необхідно застосовувати флюси, а також підігрівати прокат перед різанням і уповільнено охолоджувати заготовки після різання, щоб уникнути утворення на них торцевих тріщин. Відходи при газовому різанні становлять (4 ... 8)мм по довжині прутка на кожну заготовку. Тому газове різання застосовують, головним чином, для крупних перерізів. На заготівельних ділянках дрібносерійного й індивідуального виробництва для розділення прокату великих перерізів також застосовують кисневе різання. Істотним недоліком цього

методу є втрати розплавленого металу, загартування й значні нерівності поверхні розділення.

Електроіскрове й анодно-механічне різання (2.2) дає можливість отримання коротких заготовок точних розмірів при невеликих відходах металу. Однак істотними їхніми недоліками є мала стійкість латунних електродів (дисків), значна витрата електроенергії й відносно невелика швидкість різання [14].

Різання за допомогою плазми (2.3) і лазерів (2.4), струменем води (2.5) одержали застосування в промисловості в основному для різання заготовок складної конфігурації із листового прокату. Для обробки твердих матеріалів застосовують різання ультразвуком. Продуктивність цих способів відносно невелика. Спосіб різання струменем води (2.5) ще не вийшов зі стадії дослідно-експериментальних досліджень і вимагає удосконалення [15].

Найбільш перспективними способами є безвідходні способи розділення сортового і трубного прокату (3).

Холодну ломку згином (3.1) застосовують в основному для розділення прокату крупних перерізів. Сутність способу розділення сортового прокату холодною ломкою згином полягає в попередньому нанесенні на прокат концентратора напружень і згинанні прокату до руйнування в площині концентратора напружень.

Техніко-економічна ефективність способу холодної ломки прокату на мірні заготовки забезпечується за рахунок: низької енергоємності процесу; простоти реалізації; можливості розділення твердих і високоміцних матеріалів без нагрівання; зниження витрат на виробництво, зниження витрат на інструмент, електроенергію, виробничі площі, скорочення чисельності основних робітників тощо.

Інструментом при холодній ломці прокату є руйнуюча тріщина, від швидкості поширення якої залежить геометрична точність заготовок. Зі збільшенням величини перерізу прокату росте його схильність до крихкого руйнування.

До недоліків способу холодної ломки згином відносять: диференціювання операцій розмітки, нанесення концентратора напружень і ломки; складність керування траєкторією руху магістральної тріщини.

Роботи з вивчення й удосконалення способу холодної ломки згином проведені, як у Тамбовському інституті хімічного машинобудування, Воронезькому політехнічному, Кишинівському політехнічному інститутах, Комунарському горнометалургічному, Донецькому фізико-технічному інститутах під керівництвом В. І. Веселовського, Я. М. Охрименка, М. О. Мансурова, В. М. Фінкеля, Ю. І. Головіна, Г. Б. Родюкова, В. А. Тимощенка, В. В. Кириловського, Є. М. Висоцького, В. М. Борисова, М. В. Азенка, П. Є. Кислого, Ю. І. Фадєєва і ін. [16 – 18].

Одним з найбільш важливих напрямків, що сприяють розвитку уявленню про природу руйнування, є вивчення завершального етапу навантаження – поширення руйнуючої тріщини. Цей напрямок, початок якому поклав Гриффітс, продовжили потім ряд дослідників, зокрема, Орован, Ірвін, Екоборі Таксо. На математичному фундаменті, побудованому Г. В. Колосовим і М. І. Мусхелішвілі, він одержав подальший розвиток у роботах С. О. Христиановича, Г. І. Баренблата, М. Я. Леонова, Г. П. Черепанова, В. В. Панасюка, В. М. Фінкеля, І. А. Норицина, Я. Б. Фрідмана, Г. Я. Гуна, П. І. Полухіна, Г. С. Писаренка, М. М. Давиденкова, Є. М. Шевалдіна, Г. І. Погодіна-Олексієва і ін. [19 – 21].

Розділення сортового прокату способом відрізки зсувом (3.2) застосовується в серійному й масовому виробництві. Відрізка зсувом є ефективним і перспективним способом одержання мірних заготовок, з погляду продуктивності й економічності. Так, наприклад, обсяг роботи 7…8 пилок по розрізанню прокату можна виконати в одному відрізному штампі. Заміна різання прокату на металорізальних верстатах розділенням у штампах забезпечує економію (5…40)% металу залежно від довжини заготовки [10].

При високій продуктивності даний спосіб вимагає значних питомих навантажень для здійснення робочого циклу. Внаслідок чого збільшуються габарити й металоємність конструкцій, собівартість устаткування й оснастки.

При цьому технологічний процес вимагає нагрівання прокату перед відрізкою до температури $(300 \ldots 900)^{\circ}C$, починаючи від діаметра 60 мм і вище (особливо для

сталей з підвищеними механічними властивостями), що ускладнює технологію розділення й збільшує собівартість виготовлення заготовок [22].

До недоліків способу відрізки зсувом слід віднести обмеженість розділення прокату розмірами перерізів не більш $(80 \ldots 160)$мм. Отримані безвідходними способами заготовки за якістю не завжди можуть конкурувати із заготовками, отриманими способами розділення з відходом. Головні недоліки таких заготовок: викривлення форми, неточні розміри, низька якість поверхонь тощо.

Проведена велика робота з вивчення й удосконалення відрізки зсувом у таких наукових школах, як: Харківський авіаційний, Кишинівський політехнічний інститути, «Мосстанкин», «ЭНИКМАШ», «МВТУ» ім. Баумана і в Японії, Англії, Німеччині. У роботах К. Кеслера, О. Келера, Х. Гросса, Т. Накагаві, Я. М. Охрименка, В. Т. Мещеріна, Г. В. Колосова, М. І. Мусхелішвілі, С. О. Христиановича, Г. І. Баренблата, С. С. Соловцова, В. А. Огороднікова, Г. Цеманна, В. З. Партона, П. І. Полухіна, Г. В. Степанова, М. Я. Леонова, Г. П. Черепанова, В. В. Панасюка, В. Г. Кононенка, В. О. Тимощенка, В. М. Фінкеля, М. Л. Лісунця, Є. М. Шевандіна, Є. М. Висоцького, В. К. Борисевича, В. В. Драгобецького, Є. М. Ланського розроблено основи теорії відрізки зсувом, визначені раціональні параметри процесу, запропоновані нові схеми поперечного й поздовжнього розділення прокату, створені різні конструкції ножиців і штампів [3, 23 – 37]. У ДДМА роботи з удосконалення безвідходних способів розділення сортового прокату проводилися під керівництвом професора Л. Л. Роганова [38, 39].

## 1.2 Перспективні напрямки удосконалення безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату

Класифікація факторів, що впливають на якість заготовок при розділенні сортового і трубного прокату представлені на рис. 1.3 [3].

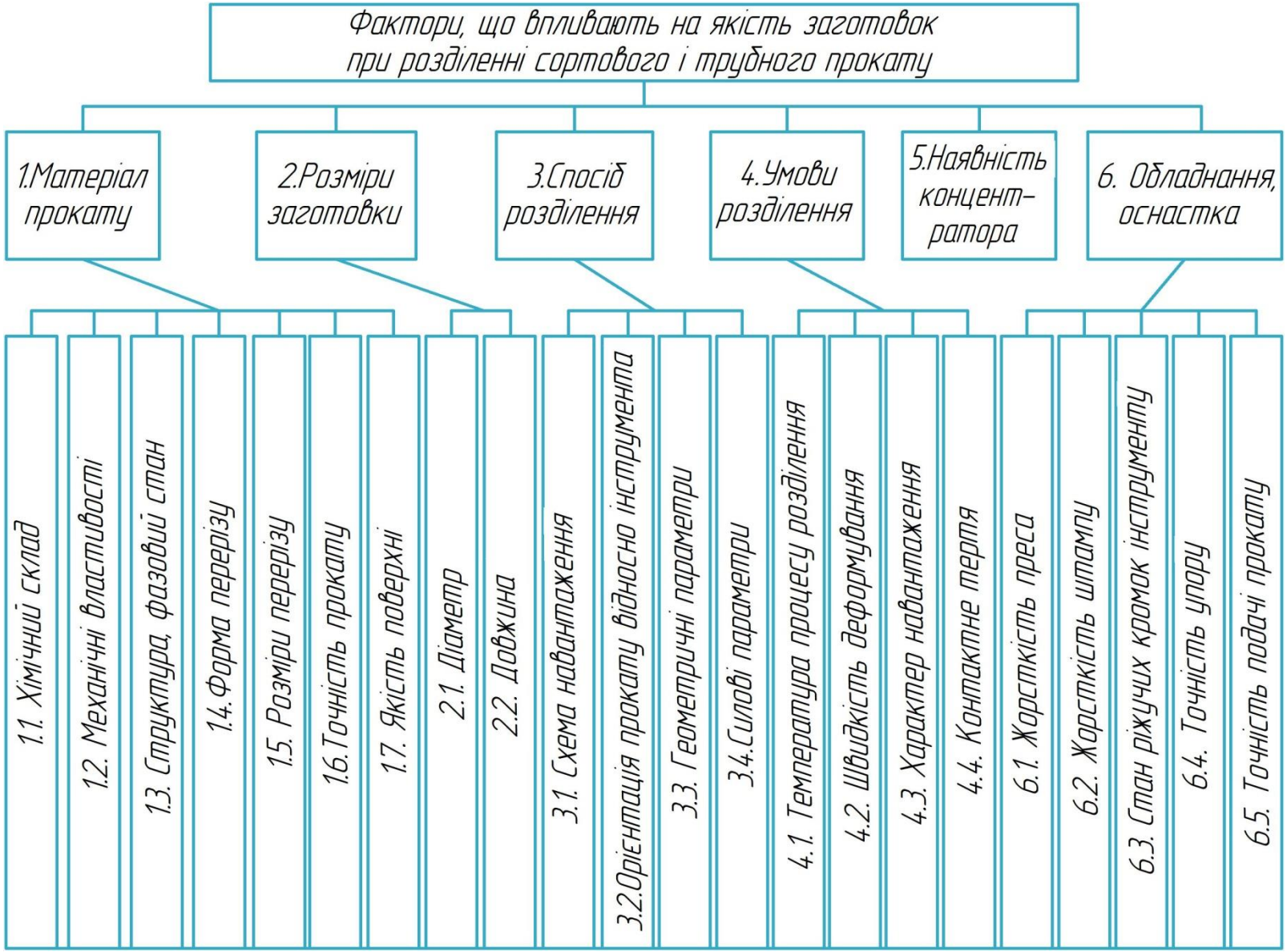



Рис. 1.3 – Класифікація факторів, які впливають на якість заготовок при розділенні сортового і трубного прокату [3]

Аналіз рис. 1.3 показує, що є фактори (1.1 – 1.7, 2.1 – 2.2), управління якими неможливе. Наприклад, складно впливати на стан поставки сортового і трубного прокату на підприємство. Тому їх треба враховувати лише для правильного вибору способу і схеми розділення.

Якість заготовок залежить від хімічного складу (1.1) матеріалу прокату. З підвищенням вмісту вуглецю в сталі знижується її пластичність, що приводить до зменшення пластичних деформацій при розділенні і сприяє підвищенню геометричної точності заготовок.

На процес розділення і якість заготовок суттєво впливають механічні характеристики матеріалу (1.2) прокату: пластичності $(\psi, \delta)$ і міцності $(\sigma_T, \sigma_B, HB)$. Від їх значень залежить ступінь пластичної деформації, характер утворення поверхні розділення, показники якості заготовок та силові характеристики процесу розділення. Впливає на процес розділення і фазовий стан (1.3) матеріалу прокату, більш високу якість можна отримати при розділенні однофазних матеріалів.

Коливання розмірів перерізу прокату і точності (1.5, 1.6) негативно впливає на якість заготовок, внаслідок необхідності збільшення поперечного зазору між інструментом і прокатом. Якість заготовок знижується за наявності дефектів на поверхні прокату (1.7).

Розміри заготовки (2) теж впливають на якість заготовки та вибір способу розділення. Відрізку зсувом застосовують як правило при діаметрах $d$ прокату (2.1) до 80 мм, а холодну ломку згином, починаючи від 80 мм і вище. При цьому довжину заготовки (2.2) бажано мати не менше $(0{,}8 \cdot d)$.

При цьому є фактори (3.1 – 3.4, 4.1 – 4.4, 6.1 – 6.5), які треба аналізувати і удосконалювати для підвищення якості заготовок. Найбільш перспективними з них є: вид схеми навантаження (3.1), швидкість деформування (4.2), характер навантаження (4.3), наявність і ефективність концентратора напружень (5), техніко-економічні характеристики обладнання і оснастки (6). Загальною ознакою усіх цих факторів є те, що усі вони пов’язані з рівнем пластичної деформації, яка виникає в процесі розділення. Перспективні напрямки управління величиною і формою зони пластичної деформації при розділенні представлені на рис. 1.4.




Рис. 1.4 – Перспективні напрямки управління величиною і формою середовища пластичної деформації при розділенні

В роботі [40] виявлено, що для підвищення якості заготовок доцільно використовувати нагрівання (4.1) або глибоке охолодження (4.2) прокату. Нагріваючи прокат, можна не тільки суттєво знизити зусилля відрізки зсувом, зменшити динамічне навантаження, а й збільшити величину пластичного етапу до відділення заготовки та підвищити геометричну точність заготовок. Виявлені наступні варіанти ефективного використання нагрівання стального прокату: підігрів охолодженого прокату із високоміцних і легованих сталей перед відрізкою зсувом до $(100 \dots 200)^{\circ}C$ для виключення тріщиноутворення; підігрів прокату із низьковуглецевих сталей до $(200 \dots 300)^{\circ}C$ (синєломкість) для підвищення крихкості і геометричної точності заготовок; нагрівання прокату з перерізом більше $2000\,мм^2$ до $400^{\circ}C$ для запобігання появи тріщин; нагрівання прокату до $(600 \dots 700)^{\circ}C$ для підвищення пластичності і покращення геометричної точності заготовок, зниження сили відрізки.

Виявлено, що зі застосуванням глибокого охолодження прокату перед відрізкою зсувом до температур холодноламкості, можна зменшити пластичність металу, скоротити етап пластичної деформації, зменшити викривлення геометричної форми заготовки. Однак у зв’язку з труднощами практичної реалізації відрізка з глибоким охолодженням не найшла широкого застосування у виробництві.

При розділенні прокату треба надавати такої орієнтації його перерізу (5), при якій під дією інструменту у прокаті виникали напруження стискання. При цьому орієнтація форми перерізу відносно напряму розділення впливає на величину зусилля та роботи деформації.

Перспективним напрямкам (1 – 3) управління величиною і формою зони пластичної деформації при розділенні приділена основна увага у дисертації. Більш детально вони розглянуті у наступних підрозділах розділу 1.

### *1.2.1 Схеми навантаження при реалізації безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату*

Є. М. Висоцький стверджує, що класифікація способів і схем ломки згином прокату (1.3, див. рис. 1.4) до сих пір недосконала. У ряді літературних джерел [8 – 10, 41], довідковій і патентній літературі [42], а також у роботах з фізики руйнування [43, 44] зроблено спроби здійснити таку класифікацію.

У роботах [8, 10] наведено чотири схеми ломки: одноопорна, двохопорна – триточковий згин, чотирьохопорна (чистий згин) і консольна, які за ознакою силового впливу відносяться до способу навантаження згином (табл. 1.1). З наведених схем тільки способи ломки при триточковому навантаженні й консольній ломці знайшли застосування в заготівельному виробництві.

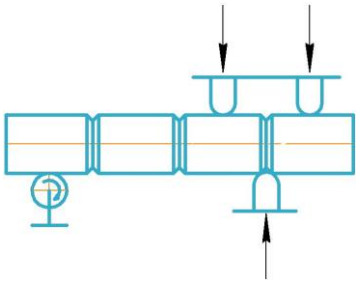
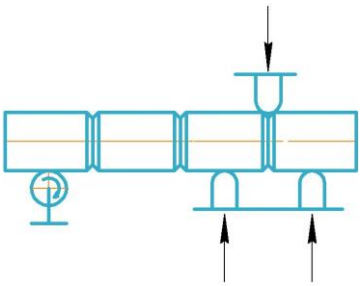
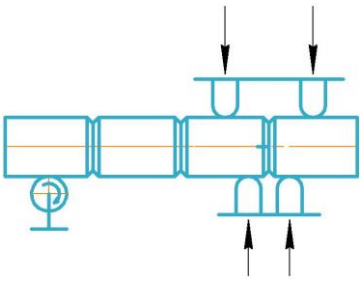
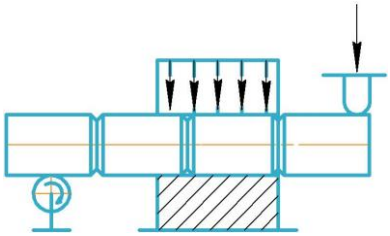
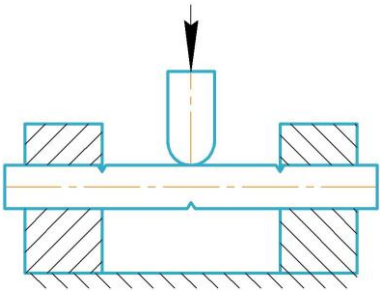
Схема, запропонована П. Є. Кислим [1], містить у собі спосіб ломки крученням (1.5) з накладенням додаткового осьового навантаження розтягання (1.1). За ознакою силового впливу на відокремлювану заготовку й прокат даний спосіб, як і ряд інших способів [45], відноситься до відомого способу навантаження крученням з розтяганням або згином (1.6). Ломка прокату крученням широко не вивчалася [46].

Однак дослідження, проведені в роботі [47] указують на обмеженість застосування даного способу через низьку якість поверхні торців заготовок, особливо для крихких матеріалів і складністю кінематики установок.

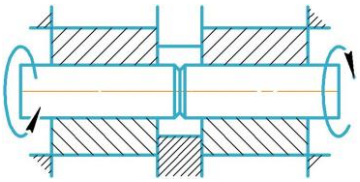
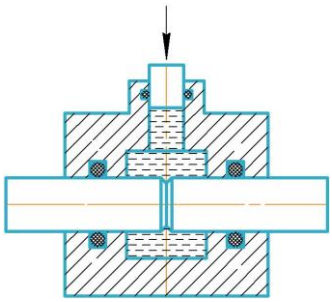
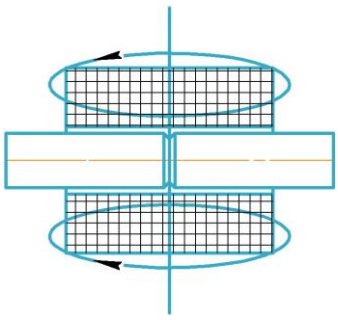
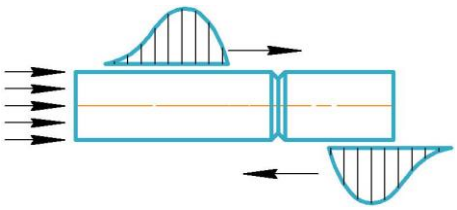
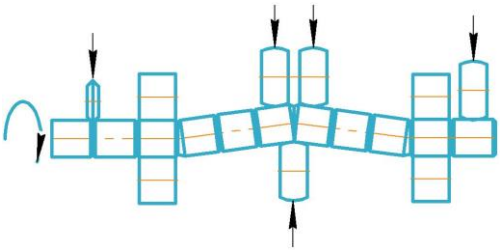
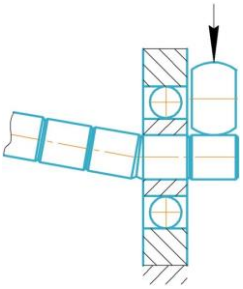
В. А. Тимощенко і В. В. Кириловський запропонували схеми ломки засновані на циклічному навантаженні прокату (3.2). Процес розділення складається із попереднього ротаційного згинання (1.3) та остаточного розділення. Число циклів підбирають таким, щоб в зоні концентратора створювалася втомна тріщина [48].

Автори заявляють, що запропоновані схеми дозволили отримати високу якість заготовок: при $l > 0{,}3 \cdot d$ відхілення торцю від перпендикулярності до продольної осі становить $(0{,}008 \dots 0{,}010) \cdot d$; відхилення торця від площинності – $(0{,}008 \dots 0{,}040) \cdot d$. Ці схеми можуть бути запропоновані для розділення матеріалів з підвищеними пластичними властивостями: алюмінієві сплави, Сталь 35, Сталь 45.

Таблиця 1.1 – Класифікація способів і схем ломки прокату

| За ознакою силового впливу | Схеми навантаження | Конструкції |
|---|---|---|
| Навантаження згинанням | Одноопорна |  |
| | Двохопорна |  |
| | Чотирьохопорна |  |
| | Консольна |  |
| | Ломка з розтяганням |  |

Продовження табл. 1.1

| | | |
|---|---|---|
| Навантаження крученням | Крученням |  |
| Навантаження стисканням | Гідростатичним і гідродинамічним обтисненням |  |
| | Обтисненням магнітним полем |  |
| Навантаження розтяганням-стисканням | Відколом за допомогою вибуху на торці |  |
| | Відколом за допомогою удару бойком | |
| Циклічне навантаження | Ротаційним згинанням прокату |  |
| | Ротаційним згинанням прокату зі зсувом |  |

Більш високу геометричну точність досягають при розділенні малопластичних матеріалів: Сталь ШХ15, Сталь 9ХС, Сталь У8, Сталь 30ХГСА та інших.

В. В. Кириловський стверджує, що раннє зародження тріщини забезпечується завдяки жорсткій складній схемі навантаження, яка забезпечує згинання прокату з розтяганням (1.6) [49].

Група дослідників: В. М. Фінкель, Ю. І. Головін, В. М. Умрихін, Г. Б. Родюков у роботах [41, 50, 51] запропонували схеми ломки прокату способом обтиснення (1.2) й відколом (1.1, 1.2).

За принципом силового впливу спосіб ломки обтисненням відноситься до добре відомого способу навантаження стисканням, а спосіб ломки відколом – до способу навантаження ударом по торцю прокату, у результаті чого в зоні концентратора напружень створюються хвилі стискання й розтягання.

В роботі [52] запропоновані схеми ломки прокату з накладенням ультразвукових коливань (комбіноване навантаження (1.6)). Однак даний метод не знайшов застосування на виробництві в силу своєї низької продуктивності і високої собівартості обладнання для його реалізації.

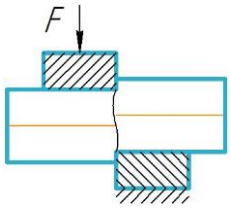
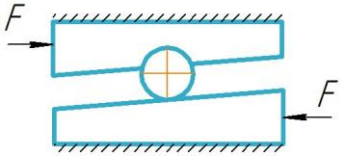
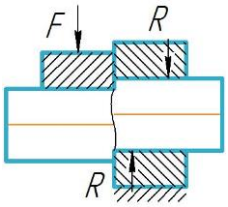
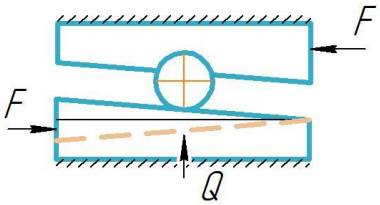
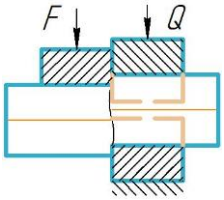
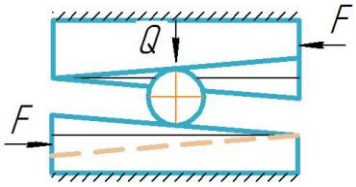
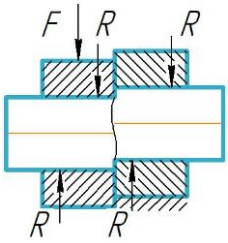
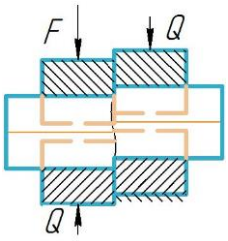
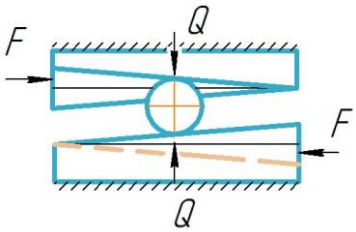
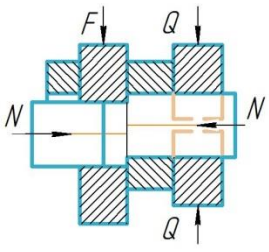
Класифікація відомих способів і схем безвідходного розділення сортового прокату зсувом (1.4) представлена у табл. 1.2.

У роботах [3, 53] виділяють чотири способи відрізки: відкрита, неповністю відкрита, неповністю закрита та закрита. Вони реалізуються з використанням наступних механічних схем: без поперечного затиску, з пасивним і активним поперечним затиском, з осьовим стисканням заготовки.

Спосіб, заснований на поступальному переміщенні розділяємих частин в одному напрямку досить добре досліджений і описаний у науково-технічній літературі [3].

Відкрита схема не обмежує переміщення заготовки у вертикальній площині. У результаті маємо вільний пластичний згин заготовки, що призводить до значного викривлення форми заготовки. Якість отриманих заготовок невисока й у сучасному промисловому виробництві цей спосіб рідко використовується.

Таблиця 1.2 – Класифікація схем відрізки зсувом

| Схеми відрізки зсувом | | За траєкторією поступального руху заготовки і профілю | |
|---|---|---|---|
| | | в одному напрямку | у двох напрямках з одночасним обертанням |
| Відкрита | |  |  |
| Неповністю відкрита | з пасивним поперечним затиском |  |  |
| | з активним поперечним затиском |  |  |
| Неповністю закрита | з пасивним поперечним затиском |  | – |
| | з активним поперечним затиском |  |  |
| Закрита з осьовим стисканням | |  | – |

Неповністю відкрита відрізка зсувом забезпечує поперечний затиск прокату і тим самим обмежує його поворот і пластичну течію у зоні деформації, але при цьому у заготовки залишається можливість повороту. При розділенні м'яких металів має місце значна утяжина й хвилястість на торці заготовки. Нерідко виникають задирки, кут скосу торця досягає $10^{\circ}$, задній торець спотворюється більше, ніж передній [54].

Застосування способу обмежується можливістю отримання заготовок довжиною не менше діаметра перерізу прокату для металів середньої й підвищеної твердості, коли не пред'являється високих вимог до геометричної точності [3].

Одержання точних заготовок цим способом можливо з низьковуглецевого сталевого прокату при високій швидкості переміщення робочого інструмента – більше 40 м/с [31, 55], але це вимагає створення спеціального обладнання.

Неповна закрита схема відрізки зсувом виключає згин прокату і заготовки. Завдяки цьому неповністю закрита відрізка з пасивним або активним поперечним затиском прокату і заготовки отримала саме широке поширення в заготівельному виробництві. Визначені технологічні параметри процесу: осьовий і поперечний зазори між ножами і прокатом, кут нахилу прутка, величина зусилля поперечного затиску.

Різновидностями схеми неповністю закритої відрізки є: реверсивна відрізка; двох- або багатоопорна відрізка.

Однією з перспективних комбінованих механічних схем деформації при розділенні прокату є схема відрізки «ексцентричним закручуванням» у втулкових ножах (різновид неповністю закритої відрізки) [56, 57], при якій рухомий втулковий ніж переміщується навколо нерухомого по колу неповного радіусу і виконує відрізку [58].

В роботі [59] запропоновані схеми поперечної прокатки для розділення сортового прокату, засновані на поступальному переміщенні розділяємих частин прокату у двох напрямках з одночасним обертанням і використанням плоских ножів. Під впливом зусилля приводу плоскі клинові ножі виконують зустрічний рух, при якому відбувається їхнє зближення. У процесі розділення прокату ріжучі крайки

ножів вдавлюються в нього, а виступи здійснюють поперечний затиск і прокату, і заготовки [53, 60, 61].

Точні короткі заготовки можна отримати лише використав спосіб закритої відрізки з осьовим стисканням. Але даний спосіб має обмежене використання внаслідок схоплювання металу прокату і ножів, а також складності реалізації [62, 63].

Коли дефекти і викривлення форми заготовок недопустимі, то застосовують комплексні заготівельно-розділювальні процеси, в яких поєднуються операція відрізки зсувом з можливостями пластичної деформації заготовки для підвищення її геометричної точності [64, 65].

Трубний прокат також розділяють безвідходними способами [66 – 69]. Як правило застосовують відрізку зсувом (поперечним зсувом, крученням) або застосуванням складного напруженого стану за рахунок одночасної дії крутного моменту і поперечного зсуву [70 – 72]. Але при цьому якість заготовок не завжди задовільна. Тому схеми відрізки удосконалюють та застосовують різні технологічні прийоми. Найбільш відомими є схеми: відрізка з проколом; послідовний двохосний зсув у горизонтальному і вертикальному напрямках; двохперехідна схема з попереднім затиском прокату до формування плоского овалу і відрізка за допомогою ножа спеціальної форми. Широко застосовується відрізка клиновими дисковими ножами (3.3, див. рис. 1.2) [73].

### *1.2.2 Геометричні і силові параметри процесу розділення*

До геометричних параметрів процесу холодної ломки згином відносять: величину плеча прикладення сили ломки, а також розміри концентратора напружень та його розташування щодо точок прикладення навантаження, довжину розділюваних частин прокату.

При реалізації способу відрізки зсувом до геометричних параметрів С. С. Соловцов у роботі [3] відносить: поперечний і осьовий зазор, кут нахилу прутка. Поперечний зазор погіршує відрізку, знижує геометричну точність

заготовок внаслідок повороту прутка при відрізці й зменшення поверхні контакту ножів із прутком. Однак, він необхідний у штампах із цільними (втулковими) ножами для забезпечення можливості введення прокату, компенсації неспіввісності установки ножів, виключення заклинювання заготовки у ножах. Величину поперечного зазору встановлюють із урахуванням практичного досвіду й стану прокату. Зменшення або повне усунення поперечного зазору в осьовій площині досягається застосуванням роз'ємних ножів, а також комбінацією розділення з редукуванням прутка у нерухомому ножі.

Осьовий зазор між ножами є важливим геометричним параметром схеми при неповністю відкритій і неповністю закритій відрізці. Від осьового зазору залежать такі показники якості заготовок, як: кут скосу, площинність торців і утворення дефектів на торцях. У той же час осьовий зазор впливає на силові, енергетичні характеристики й на роботу відрізки. Осьовий зазор призначають залежно від матеріалу, висоти поперечного перерізу, механічної схеми відрізки й температурно-швидкісних умов навантаження [40]. При неповністю відкритій і неповністю закритій відрізці заготовок від сталевих прутків з підвищеною й високою швидкістю, осьовий зазор між ножами не потрібний. У літературі приводяться суперечливі відомості щодо вибору осьового зазору в штампах з диференційованим затиском прокату [3, 32, 54, 74].

Нахил прутка при неповністю відкритій і неповністю закритій відрізці зсувом дозволяє одержати заготовки з торцями, перпендикулярними осі. Аналіз робіт з дослідження впливу кута нахилу прокату на якість заготовок показує, що раціональний кут нахилу становить $(2 \ldots 9)^{\circ}$. На практиці приймають середній кут нахилу $-4^{\circ}$, внаслідок ускладнення конструкції засобів механізації й самого устаткування [3, 75].

Сила ломки (2) значно нижча сили відрізки зсувом (1) (рис. 1.5) при інших рівних умовах.

Формули для розрахунку силових параметрів процесу розділення зведені до табл. 1.3.

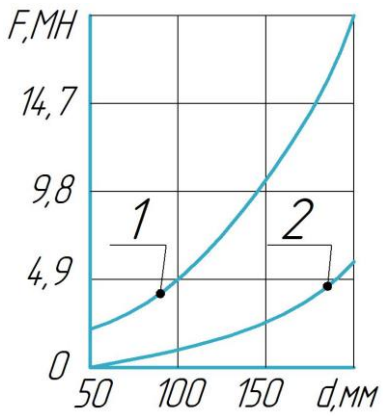



Рис. 1.5 – Графіки залежності сили розділення від діаметру прокату [17]

Таблиця 1.3 – Формули для розрахунку сил розділення сортового прокату [3, 41]

| Формули розрахунків сили розділення сортового прокату | |
|---|---|
| Способом холодної ломки згином | Способом відрізки зсувом |
| ○ за схемою триточкової ломки:<br>$F = 4 \cdot W_x \cdot \sigma/(k_\sigma \cdot l_0)$, (1.1)<br>де $\sigma$ – граничне напруження при згинанні;<br>$W_x$ – осьовий момент опору перерізу згинанню;<br>$k_\sigma$ – коефіцієнт концентрації напружень;<br>$l_0$ – відстань між опорами;<br>$F = k_1 \cdot 4 \cdot W_x \cdot \sigma_B/(k_\sigma \cdot k_{\text{імп}} \cdot l_0)$, (1.2)<br>$k_{\text{імп}} = 1{,}1 \ldots 1{,}5$ – коефіцієнт, що враховує імпульсний характер навантаження;<br>$\sigma_B$ – границя міцності;<br>$k_1 = 0{,}7 \ldots 1{,}1$ – коефіцієнт, який враховує характер розподілення навантажень на площинах контакту;<br>○ за схемою консольної схеми ломки:<br>$F = W_x \cdot \sigma/(k_\sigma \cdot l)$, (1.3)<br>де $l$ – плече прикладення навантаження. | $F = 3{,}42 \cdot \tau_p\left(0{,}17 \cdot d^2 + 0{,}004 \cdot d^4/h_g^2\right)$,(1.4)<br>де $\tau_p$ – напруження зсуву;<br>$d$ – діаметр заготовки;<br>$h_g$ – висота середовища деформації в осьовому напрямку;<br>$F = \sigma_B \cdot H^2\left[0{,}4 \cdot \varepsilon_p/tg\alpha_1 + 0{,}7\right]$, (1.5)<br>де $\varepsilon_p$ – відносна глибина ходу інструменту, при якій починається руйнування;<br>$H$ – розмір перерізу прокату;<br>$\alpha_1$ – кут нахилу ножа;<br>$F = 0{,}72 \cdot \sigma_B \cdot A$, (1.6)<br>де $A$ – площа поперечного перерізу прокату. |

### *1.2.3 Аналіз впливу концентраторів напружень на якість заготовок*

Ефективним способом локалізації руйнування є нанесення концентратора напружень, що дозволяє суттєво знизити силу розділення й поліпшити якість заготовок. Найбільшу гостроту має тріщина, вона і є самим ефективним концентратором напружень [17, 41, 43, 44].

Ефективність концентратора напружень, у першу чергу, залежить від його геометрії й місця розташування стосовно сил розділення. М. М. Давиденков [76] наголосив, що вирішальний вплив на роботу розділення має радіус закруглення у вершині $r$ та глибина концентратора $\Delta H$ (рис. 1.6).

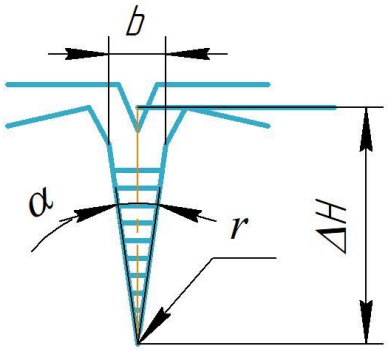



Рис. 1.6 – Параметри концентратора напружень [17]

У роботі [16] глибина концентратора напружень визначається за формулою:

$$\Delta H = k\sqrt[3]{d}, \tag{1.7}$$

де $k$ – коефіцієнт, що залежить від пластичності сталей.

Ширина $b$ й кут між стінками концентратора напружень $\alpha$ мають другорядне значення.

У роботі [77] показано, що при вдавленні інструмента в прокат на глибину $\Delta H = (0{,}01 \dots 0{,}05)H$, пластична деформація поширюється на весь переріз прокату.

Змінюючи технологічні параметри процесу ломки можна у значній мірі впливати на розміри зони пластичної деформації [77]:

- в зоні розтягання ключовим фактором є параметри концентратора напружень: глибина, радіус закруглення і кут розкриття у вершині;
- в зоні стискання – радіус кривизни опори;
- бажано щоб тріщина зароджувалася при мінімальному куті згинання прокату – $\varphi \leq 0{,}14$ рад;
- глибина концентратора напружень повинна бути не менше 5% від поперечного перерізу прокату;
- кут розкриття у вершині – не менше 0,4 рад, радіус закруглення при вершині – не менше 0,6% від розміру поперечного перерізу прокату;
- плече прикладення навантаження повинно складати $(2{,}4 \ldots 4{,}0)$ розміру поперечного перерізу прокату.

Для підвищення ефекту концентрації напружень доцільно у вершині надрізу виконати додаткові концентратори (рис. 1.7), що мають зубчасту форму дна (перемички) [77]. Рекомендована глибина додаткових концентраторів напружень

$$h \geq 0{,}916 \cdot k \cdot \sqrt[3]{r}, \tag{1.8}$$

де $k = 1 \ldots 2$ – коефіцієнт. що залежить від пластичності матеріалу (для мало пластичних вибирають менші значення).

Рекомендована кількість перемичок: від 4 до 10.

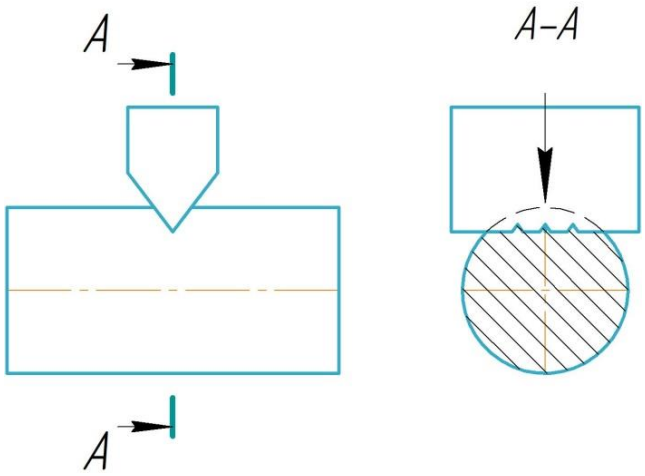



Рис. 1.7 – Схема нанесення додаткових концентраторів напружень [77]

Кількісною характеристикою концентрації напружень є коефіцієнт концентрації напружень. Більшість відомостей щодо величини коефіцієнта концентратора напружень отримані експериментальним шляхом і представлені в роботах Г. Нейбера, В. В. Вейса , Е. Хардрата, Л. Омана [78 – 80]. Найбільше поширення одержала залежність Нейбера, що зв'язує коефіцієнт концентрації напружень $k_\sigma$ і коефіцієнт концентрації деформацій $k_\varepsilon$ із пружним теоретичним коефіцієнтом концентрації $\alpha_\sigma$ [80]:

$$k_\sigma \cdot k_\varepsilon = \alpha_\sigma^2. \tag{1.9}$$

У роботі О. В. Ісаєва [81] отримана емпірична залежність сили вдавлення клинового ножа $F_B$ в прокат від глибини $\Delta H$, радіуса $r$, кута $\alpha_0$ заточки ножа й твердості матеріалу $HB$:

$$F_B = \Delta H \cdot \sqrt[6]{r} \cdot (0{,}0004 \cdot \alpha_0 + 0{,}013) HB. \tag{1.10}$$

Є. М. Висоцький [82] запропонував формулу розрахунку сили вдавлення плоского ножа:

$$F_B = 2{,}3 \cdot \varepsilon \cdot \sigma_B \cdot \alpha_0 \cdot \Delta H/2 \cdot \sqrt{d \cdot \Delta H} \cdot (1 + \alpha_0/2), \tag{1.11}$$

де $\varepsilon = 1{,}5 \ldots 3{,}0$;

$\sigma_B$ – тимчасовий опір розриву;

$d$ – діаметр прокату.

Сила нанесення концентратора на прокат парою клиноподібних роликів визначається за формулою [82]:

$$2 \cdot F_B = 2{,}3 \cdot \varepsilon \cdot \sigma_B \cdot \alpha_0 \cdot \Delta H^2/2 \cdot \left[1 + arctg\left(\alpha_0/2 \cdot \sqrt{\Delta H/d}\right)\right]. \tag{1.12}$$

### *1.2.4 Аналіз впливу характеру навантаження при розділенні на якість заготовок*

Традиційно розділення прокату проводять при статичному навантаженні на стандартному ковальсько-пресовому обладнанні (3.1, див. рис. 1.4). Перехід від статичного (3.1) до ударного (3.3) навантаження може привести до зміни механічних властивостей матеріалу – крихтування матеріалу прокату. В. М. Фінкель доводить, що пластична деформація пов'язана з генеруванням і зміщенням дислокацій – процесом, порівняним за часом зі швидкістю прикладення динамічного навантаження, що приводить до зменшення пластичної деформації [41, 43, 44]. Тому одним з перспективних напрямків підвищення якості заготовок, одержуваних безвідходними способами розділення сортового прокату, є збільшення швидкості навантаження.

Динамічне навантаження може бути, як однократним, так і багатократним ударним (3.3). Навантаження може бути циклічним (3.2). Імпульсне навантаження (3.4) відрізняється від ударного (3.3) часовими особливостями напруженого стану матеріалу прокату. Тому розділення імпульсним навантаженням (3.4) характеризується малим часом прикладення навантаження.

Значний вклад у вивчення питань впливу швидкості деформування на властивості міцності матеріалів внесли вчені: О. Ф. Іоффе, М. М. Давиденков, Є. М. Шевандін, Д. Гопкинсон, Е. Ердоган , Т. Екоборі, В. З. Партон, Д. Пірсон, Л. Д. Соколов, Г. Я. Гун, О. М. Галкін, В. М. Іонов, В. Г. Кононенко, В. К. Борисевич, В. В. Драгобецький [21, 83 – 87]. У їхніх роботах і більш пізніх дослідженнях показано, що зі збільшенням швидкості деформування збільшується опір деформації.

С. С. Соловцов [3] розділяє швидкості деформування на: звичайні – менше 1,5 м/с; підвищені – (2 ... 20)м/с; високі – більш 20 м/с. Верхня границя швидкості навантаження при розділенні прокату обмежується стійкістю штампової оснастки.

Дослідження проведені в роботі [3] підтверджують високу ефективність використання високих і підвищених швидкостей деформування при розділенні

відрізкою зсувом. Так збільшення швидкості вже до $2\,\text{м/с}$ суттєво підвищує геометричну точність заготовок. Використання підвищених швидкостей деформування $(2 \ldots 5)\text{м/с}$ – один із головних резервів удосконалення безвідходних способів розділення заготовок.

Залежність опору деформації $\sigma$ від швидкості деформації $\dot{\varepsilon}$ при різних умовах деформації звичайно представляють у вигляді лінійної, статечної й логарифмічної залежностей [86]:

$$\sigma = a \cdot \dot{\varepsilon};\ \sigma = a \cdot (\dot{\varepsilon})^n;\ \sigma/\sigma_0 = (\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)^n;$$
$$\sigma = \sigma_0 + A \cdot lg(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0);\ \sigma = \sigma_0 + B \cdot ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0), \qquad (1.13)$$

де $n$ – швидкісний показник, постійний при даній температурі й певному діапазоні швидкостей деформації;

$\sigma_0, \dot{\varepsilon}_0$ – опір деформації й швидкість деформації в статичних умовах;

$a, A, B$ – константи.

У роботі [83], виходячи з теоретичних передумов, зазначених М. М. Давиденковим, отримана формула, що дає «подвійну» логарифмічну залежність $\sigma$ від $\dot{\varepsilon}$:

$$lg(\sigma/\sigma_0) = n \cdot lg(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0), \qquad (1.14)$$

де $n = D_1/H_E$;

$D_1$ – коефіцієнт температурної залежності опору деформації;

$H_E$ – релаксійна енергія активації процесу відпочинку й самодифузії.

Дана формула добре відповідає експериментальним даним при низьких і високих температурах.

Як відзначає В. М. Іонов [86], зміна швидкості деформування приводить до істотних змін механічних властивостей матеріалу:

○ зі збільшенням швидкості навантаження напруження текучості $\sigma_T$ збільшується (особливо для матеріалів з вираженою ділянкою текучості);

○ напруження міцності $\sigma_B$ збільшуються зі зростанням швидкості навантаження. При цьому руйнування з великою швидкістю деформування викликає меншу залишкову деформацію, ніж руйнування з малою швидкістю за інших рівних умов.

Результати експериментальних досліджень дозволили М. М. Давиденкову [83] зробити висновок, що випробування на удар при високій швидкості навантаження можуть виявити в деяких матеріалах схильність до крихкості. Чутливість до крихкості при високій швидкості навантаження змінюється паралельно чутливості до крихкості при низьких температурах.

При значному збільшенні швидкості навантаження розподіл деформації по довжині й поперечному перерізу зразків суттєво змінюється у зв'язку із проявом сил інерції матеріалу зразка й локальним виділенням теплоти деформації. Теплота при великій швидкості деформування не встигає поширитися по всьому перерізу зразка й, локалізуючись у певних площинах, може викликати значне місцеве нагрівання – вище температури перлито-аустенітного перетворення. Велика кількість теплоти, яка при цьому виділяється, приводить до значного місцевого зниження опору й локалізації пластичної деформації.

Як відзначає С. С. Соловцов [3], зі збільшенням швидкості деформування напруження текучості зростає інтенсивніше, ніж тимчасовий опір. Швидкісний коефіцієнт $n_{ui} = \sigma_V/\sigma_0$ (де $\sigma_V$ – опір деформуванню при великій швидкості; $\sigma_0$ – опір деформуванню при малій швидкості деформування), що характеризує вплив швидкості на опір деформуванню, залежить від ряду факторів, у тому числі від температури плавлення металу. З підвищенням температури плавлення, швидкісний коефіцієнт зменшується. Вплив швидкості зменшується зі збільшенням змісту в сталі легуючих елементів.

У роботі В. М. Іонова [86] розглядається кількісна зміна $\sigma_T$ залежно від швидкості деформації $\dot{\varepsilon}$, яка описується співвідношенням:

$$\sigma_T = \sigma_T^0\left(1 + C \cdot ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)\right)^n, \qquad (1.15)$$

де $\sigma_T^0$ – напруження текучості при швидкості деформації $\dot{\varepsilon}_0$ ;

$C$ і $n$ – постійні, отримані з експерименту.

Експериментальні дослідження поведінки деяких металів залежно від швидкості деформування показують, що при миттєвому збільшенні напруження вище границі пружності, текучість наступає з деякою затримкою, що залежить від величини напруження й властивостей матеріалу. Це явище й служить причиною підвищення значень динамічних напружень текучості при високій швидкості навантаження. Запізнювання текучості характеризується часом [86]:

$$t_1 = t_0 \cdot exp(\sigma/\sigma_1), \tag{1.16}$$

де $t_0$ й $\sigma_1$ – постійні, отримані з експерименту.

Руйнування тіла при динамічному навантаженні наступає при $\sigma_{Bд} > \sigma_{Bс}$, причому $\sigma_{Bд}$ збільшується зі збільшенням $\dot{\varepsilon}$, але меншою мірою, ніж $\sigma_{Tд}$ (де $\sigma_{Tд}$ й $\sigma_{Bд}$ – напруження текучості й міцності при динамічному навантаженні; $\sigma_{Bс}$ – напруження міцності при статичному навантаженні).

У роботі [88] показано, що відношення динамічного напруження міцності до статичного для різних матеріалів може коливатися від 0,59 до 1,30, а при підвищених температурах – від 0,71 до 6,00. Воно сильно залежить, як від швидкості деформування, так і від матеріалу, підданого деформуванню. Зі збільшенням статичного напруження текучості це відношення помітне зменшується. Наприклад, для сталі ШХ15 відношення динамічного напруження текучості до статичного менше одиниці і зменшується зі збільшенням швидкості деформації.

У роботі [89] розглядаються результати випробувань сплавів ВН8, ВК15, ВК20. Для досліджуваних матеріалів спостерігається чітка залежність міцності від швидкості навантаження. Так, для сплаву ВН8 напруження міцності зростає в середньому з 1300 МПа при швидкості навантаження $(3 \dots 4)$м/с, до 1510 МПа при 20 м/с (приблизно на 17%) і до 1940 МПа при 30 м/с (на 50%). Для твердих сплавів ВК15 і ВК20 в аналогічних умовах навантаження напруження

міцності підвищується більш ніж на 22% при 20 м/с: з 1750 МПа до 2150 МПа для сплаву ВК15 і з 1640 МПа до 2000 МПа для сплаву ВК20.

Підвищення швидкості навантаження при холодній ломці згином прокату дозволяє забезпечити мінімально можливий рівень пластичної деформації, що передує зародженню магістральної тріщини, низьку енергоємність процесу [17, 41].

Експериментальні дослідження, проведені в роботах [3, 32, 40], показали, що підвищення швидкості деформування дозволяє одержати високоякісні заготовки із застосуванням досить простої схеми відрізки зсувом. Наприклад, при неповністю відкритій відрізці зсувом підвищення швидкості понад 30 м/с приводить до різкого зниження показників неточності при відносній довжині заготовок $l/d \geq 3$. Зменшується глибина вдавлення ножа, як до початку руйнування, так і до повного відділення заготовки від прутка. Зменшується кут відхилення магістральної тріщини, спрямляється її траєкторія, зменшується величина середовища пластичної деформації, зменшуються бічні утяжини. Мікро- і макротріщин на поверхні зрізу не виявлене. Останнє пояснюється наступним [86]:

- мала тривалість процесу деформування $t = 0{,}005\,c$, за яку дислокації в поздовжньому напрямку заготовки не встигають вийти на поверхню розділення, а відповідно й не встигають виникнути тріщини;
- істотне нагрівання металу в зоні деформації $T = 1000^{\circ}C$, що приводить до зняття внутрішніх напружень.

Дослідження, проведені на території країн близького й далекого зарубіжжя, дозволяють зробити наступні висновки:

1. Використання підвищених і високих швидкостей – ефективний шлях підвищення якості заготовок при реалізації безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату, насамперед на пластичному етапі розділення.

2. Перспективним представляється використання підвищених швидкостей навантаження в діапазоні $(2 \ldots 20)$м/с, як при відрізці зсувом, так і при холодній ломці згином.

## 1.3 Аналіз обладнання і оснастки для розділення сортового і трубного прокату

### *1.3.1 Аналіз типового і спеціалізованого ковальсько-пресового обладнання для процесів розділення сортового і трубного прокату*

Відповідно до розглянутих безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату на мірні заготовки, проаналізуємо обладнання і оснастку для їх реалізації в розрізі вимог, пропонованих до сучасного заготівельного виробництва. Основні вимоги такі: висока продуктивність і коефіцієнт корисної дії; жорсткість, надійність і довговічність; простота конструкції й низька вартість; достатній ступінь механізації й автоматизації; мінімальні габарити, вага, експлуатаційні витрати й простота обслуговування [90 – 92].

Обладнання для розділення сортового і трубного прокату, що випускаються вітчизняними й закордонними фірмами є, як правило, типовим ковальсько-пресовим устаткуванням (механічні, гідравлічні преси) або спеціально спроектованим для цих цілей устаткуванням (сортові ножиці, холодноломи тощо) [93].

При цьому треба враховувати, що розділення прокату на заготовки займає особливе положення серед усіх технологічних процесів обробки металів тиском. На рис. 1.8 показано типовий графік «сила відрізки зсувом – відносна деформація» $F = f(\varepsilon)$. Спочатку сила збільшується до максимуму – $F_{max}$, а в момент формування магістральної тріщини – миттєво зменшується до нуля [94].

Увесь робочий процес розділення складається із двох фаз: навантажувальної, зі швидким, але монотонним зростанням технологічного зусилля до максимуму й розвантажувальної. Для більшості операцій розділення характерно те, що розвантаження наступає майже негайно після досягнення максимуму зусилля й триває долі мілісекунд (рис. 1.9) [95 – 97].

У першій фазі, крім витрати енергії на рух механізмів, відбувається накопичення її в пружнодеформованих елементах конструкції машини. У результаті чого накопичується значна величина потенційної енергії деформації.

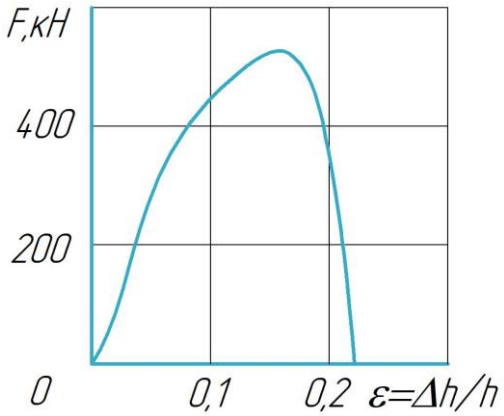



Рис. 1.8 – Типовий графік «сила відрізки зсувом – відносна деформація» $F = f(\varepsilon)$ при розділенні прокату із сталі 45 [3]

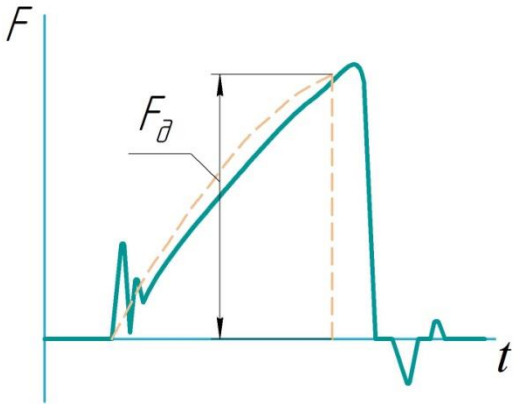



Рис. 1.9 – Зміна зусилля деформування при роботі головного виконавчого механізму при операціях розділення

У другій фазі накопичена енергія різко вивільняється, що приводить до появи динамічного навантаження у вигляді пружної віддачі, протилежної за знаком зусиллю деформування. Величина пружної віддачі залежить від ряду факторів: жорсткості різних елементів і преса в цілому; зусилля протитиску; стану й конструкції ріжучих крайок; крихкості або пластичності матеріалу, що розділяється; кута повороту кривошипа в момент відколу і т.д. і дорівнює до $(0{,}1\ldots0{,}7)$ зусилля деформування [98, 99].

Жорсткістю $C$ називається відношення величини сили $F$ на повзуні преса до збільшення закритої висоти $\Delta h$ преса під дією цього зусилля [99]:

$$C = F/\Delta h. \tag{1.17}$$

Рекомендується визначати жорсткість відношенням різниці номінального зусилля $F_H$ й зусилля, яке дорівнює $\varphi \cdot F_H$, до різниці деформацій преса при цих зусиллях [99]:

$$C = (F_H - \varphi \cdot F_H)/(\Delta_H - \Delta_\varphi), \tag{1.18}$$

де $\varphi = 0{,}3 \ldots 0{,}4$.

Збільшення жорсткості преса приводить до зменшення енергії, яка витрачається на пружну деформацію конструкції. При цьому підвищується коефіцієнт корисної дії роботи преса [100].

В роботі [99] приводяться дані про те, що для пресів зусиллям $630, 2500, 6300$ кН збільшення жорсткості в 1,4 рази дає економію споживаної енергії близько 5%. Підвищення жорсткості преса збільшує його точність, а також динамічну стійкість. При цьому маса преса не змінюється або зменшується.

Отже, підвищення жорсткості преса є прогресивним напрямком удосконалення всього парку ковальсько-пресового обладнання, у тому числі й технологічних машин для операцій розділення сортового і трубного прокату.

Однієї з найпоширеніших груп ковальсько-штампувальних машин є група кривошипних ковальсько-пресових машин. Враховуючи особливості операцій розділення і можливості виконавчих механізмів кривошипних пресів, можна зробити висновок про те, що в якості головного виконавчого механізму для таких машин, доцільно використовувати механізми з невеликим числом ланок, тому що збільшення числа ланок веде не тільки до подорожчання преса, але й часто до погіршення його динамічних показників.

Найпоширенішою конструкцією головного виконавчого механізму є традиційна схема кривошипно-повзунного механізму [101, 102].

Можна виділити два напрямки підвищення жорсткості кривошипних пресів: підвищення жорсткості станини; підвищення жорсткості головного виконавчого механізму за рахунок нових конструктивних схем.

Підвищення жорсткості станини призводить до різкого збільшення маси преса, і як наслідок, до його подорожчання [103].

Найбільш раціональним є підвищення жорсткості головного виконавчого механізму. При створенні нових типів механічних пресів ідуть по шляху досягнення меншої матеріалоємності при одночасному збільшенні показників жорсткості й точності [104].

Дослідження, проведені для визначення піддатливості сортових ножиць із традиційною конструктивною схемою виконавчого механізму, показали, що основна її частка припадає на головний виконавчий механізм і становить для різних конструкцій пресів до 40…60% [105, 106].

Тому у машинобудуванні розширюється область застосування різних модифікацій компактних виконавчих механізмів [102] с укороченим кінематичним ланцюгом, які у порівнянні із традиційними мають багато переваг. По-перше, їхнє застосування приводить до зменшення відстані від осі головного вала до столу, завдяки чому вдається зменшити висоту вертикальних пресів на (20…25)% та збільшити жорсткість у 3 рази, уникнути руйнувань, що пов'язані із пружною віддачею на операціях розділення. По-друге, завдяки розвиненим поверхням сполучення повзуна із шатуном і станиною вдається різко знизити рівень шуму при технологічних операціях. По-третє, порівняно легко добитися стійкого плоского контакту повзуна й станини на всій ділянці робочого ходу повзуна, що позитивно впливає на стійкість штампів і довговічність напрямних.

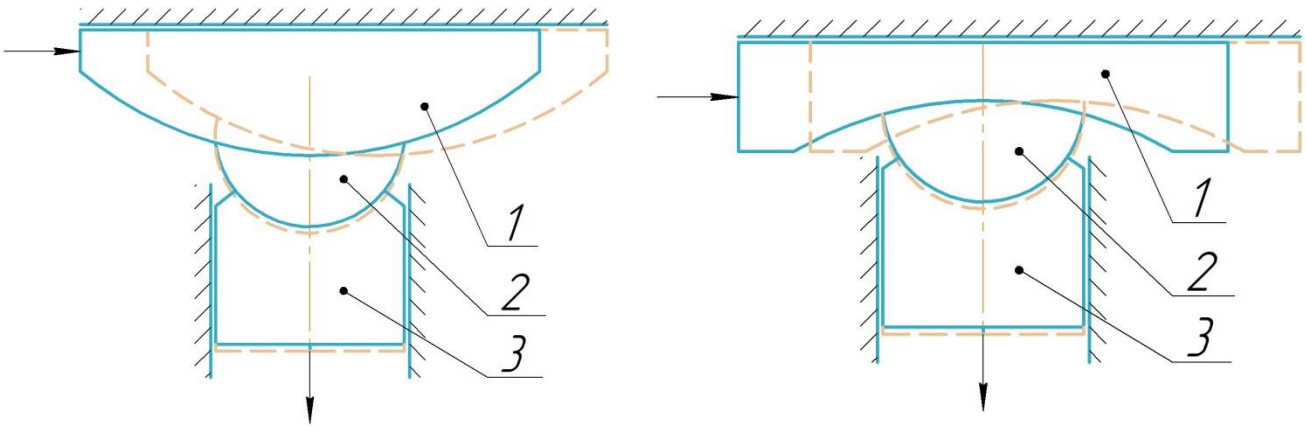
Одним зі шляхів, спрямованих на підвищення жорсткості пресів, є створення головного виконавчого механізму з додатковою ланкою, яка сприймає технологічне зусилля. Це знижує або повністю усуває вплив пружного прогину вала на загальну піддатливість конструкції. Таким механізмом може бути кривошипно-клиновий виконавчий механізм, який запропонований фірмою «*Eumuco*» (Німеччина) [107]. Кривошипно-клиновий механізм відрізняється від кривошипно-повзунного наявністю додаткової ланки – клина. Використання клина дозволило підвищити жорсткість преса на (30…35)% [106].

У роботах В. В. Харлашкина під керівництвом д-ра техн. наук, проф. Л. Л. Роганова був розглянутий клиношарнірний механізм із перпендикулярним напрямком переміщення клина щодо напрямку переміщення повзуна, визначені його кінематичні й енергосилові параметри [108 – 112]. У клиношарнірного механізму (рис. 1.10, а) одна з робочих поверхонь клина 1 виконана опуклою циліндричною, яка сполучена з додатковою ланкою – шарніром 2. Шарнір 2 має другу робочу поверхню, яка також виконана по радіусу й сполучається із

циліндричною поверхнею повзуна 3. Переміщення клина уздовж нерухомих напрямних приводить до зміни кута між прямою, перпендикулярною напрямку переміщення клина, і прямою, що з'єднує центри циліндричних поверхонь. А це, у свою чергу, дає можливість мати змінне співвідношення між приводним зусиллям на клині й виконавчим зусиллям на повзуні. На основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень був спроектований прес із клиношарнірним механізмом на базі карбувального колінно-важільного преса. Це дало можливість знизити масу преса на 2000 кг, габарити по висоті – на 500 мм при збільшенні жорсткості преса у 1,5 рази.

Таким чином, відмінностями клиношарнірного механізму є: збільшена поверхня контакту, що сприймає технологічну силу; невелика висота ланок за напрямком дії робочої сили, що приводить до зменшення їх пружної деформації й, відповідно, зменшенню величини накопиченої енергії пружної деформації в механізмі; висока жорсткість; змінність співвідношення між приводною і технологічною силою; технологічність виготовлення.

Запропоновано нестандартний виконавчий механізм [113, 114] – клиношарнірний механізм із увігнутим клином (рис. 1.10, б), у якому рух починається з положення увігнутого клина 1 при куті повороту шарніра 2 $\varphi = 0^{\circ}$, коли сила на повзуні 3 максимальна [115 – 117].




а б

Рис. 1.10 – Принципова схема клиношарнірного механізму: а – з опуклим клином; б – з увігнутим клином

Дослідження й розробки в області безвідходного розділення прокату показали, що збільшення швидкості деформування, навіть до $(2{,}0 \dots 5{,}0)\text{м}/c$, при розділенні прокату дозволяє підвищити геометричну точність заготовок. Наприклад, при відрізці зсувом найбільший ефект отриманий при розділенні прокату з низьковуглецевих сталей [118]. Ряд пристроїв, для високошвидкісного розділення, в основному круглого дрібносортного прокату з конструкційних, інструментальних, жароміцних сталей і деяких алюмінієвих сплавів, заснований на використанні енергії вибуху порохових зарядів або газових середовищ, стисненого повітря [85, 119, 120].

Устаткування із застосуванням вибухових речовин розвитку в промислових умовах по відомих причинах не одержало. У якості машини-знаряддя для імпульсного різання застосовують копри [118, 120]. У теперішній час впровадження швидкісного розділення стримується відсутністю промислового встаткування.

Дані недоліки подолані в конструкціях високошвидкісних молотів і прес-молотів з гідропружним приводом, які розроблялися на протязі багатьох років у ДДМА під керівництвом Л. Л. Роганова. Основною особливістю гідропружного привода є використання для розгону рухомих частин і технологічного навантаження енергії пружної деформації стислої рідини й пружнодеформованих деталей ковальсько-пресової машини [121 – 123]. Такий привод дозволяє забезпечити: точне дозування енергії або сили при деформуванні заготовки; створення устаткування для деформування в широкому діапазоні швидкостей, енергій і сил; виключення повторного удару по заготовці за рахунок зниження до нуля сили, що діє на інструмент із боку робочого циліндра; єдиний тип привода молотового й пресового устаткування; екологічно чисте використання енергії за рахунок замкненої безвихлопної системи живлення; застосування для системи живлення стандартної, освоєної промисловістю гідроапаратури й насосів; підвищення ККД за рахунок зниження втрат на рух рідини по гідролініях і через гідроапаратуру.

Ударне технологічне навантаження здійснюється за допомогою гідропружного циліндра, який як акумулятор енергії використовує заздалегідь стислу рідину. Обладнання з гідропружним приводом може бути реалізованим, як на базі

стандартного ковальсько-пресового обладнання: кривошипних, гідравлічних пресів, так і у вигляді оригінального обладнання: молотів і прес-молотів. Модернізація стандартного ковальсько-пресового обладнання є більш рентабельним рішенням, особливо для дрібносерійного й серійного багатономенклатурного виробництва заготовок, коли використання дорогого й витратного обладнання стає економічно не вигідним.

На рис. 1.11 показані можливі конструктивні схеми прес-молота з гідропружним приводом, який розміщений і закріплений під станиною кривошипного пресу. При цьому статико-динамічне навантаження заготовки відбувається в зустрічних напрямках. Схеми характеризуються простотою конструкції і відрізняються конструктивними рішеннями щодо зменшення динамічного впливу на деталі кривошипного преса [124].

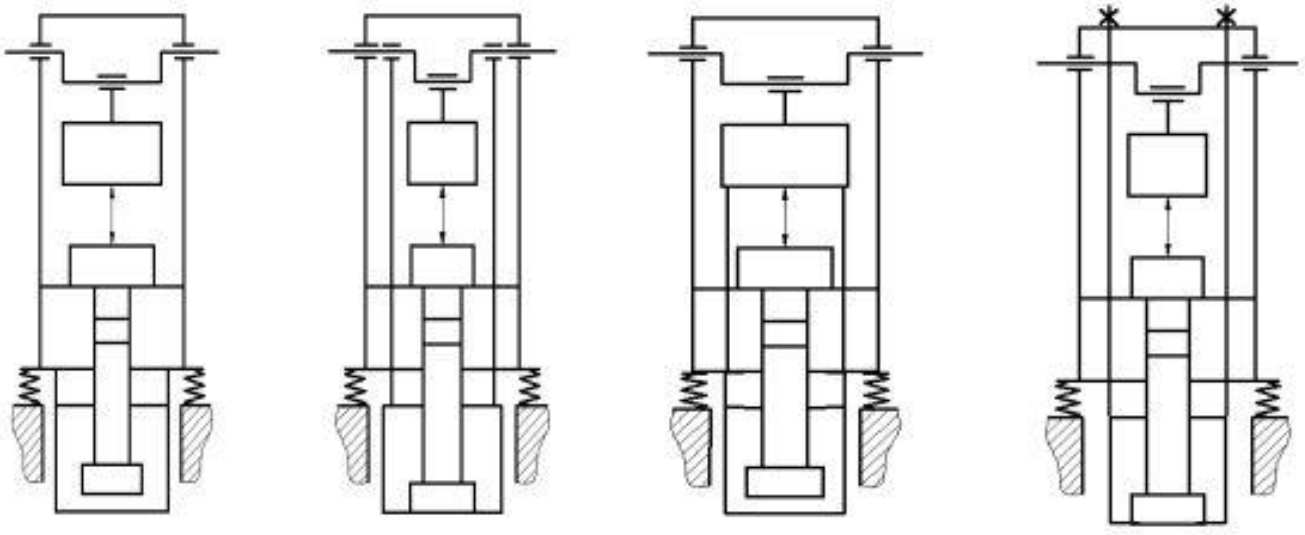


Рис. 1.11 – Конструктивні схеми прес-молота [124]

Найбільший інтерес для розділення сортового і трубного прокату представляє група способів безвідходної відрізки зсувом у штампах на пресах [2, 3, 125]. З одного боку, дана група досить вивчена й класифікована [3, 17, 41], а з іншого, потребує удосконалення й реалізації нових способів розділення, а також нових схем обладнання й оснастки для їхньої реалізації.

### *1.3.2 Аналіз штампової оснастки для реалізації безвідходних операцій розділення сортового і трубного прокату*

Для класифікації штампової оснастки при реалізації безвідходних операцій розділення сортового і трубного прокату обрана ознака «обмеження повороту прокату і заготовки (прокату-заготовки) в процесі розділення» (рис. 1.12) [126]. З погляду евристики основним протиріччям є те, що, з одного боку, між інструментом і заготовкою поперечний зазор повинен існувати, щоб вільно ввести прокат, а з другого – не повинен існувати, щоб виключити поворот заготовки при відрізці зсувом й тим самим підвищити її якість.

Поперечний зазор завжди негативно впливає на якість розділення. З його збільшенням зростає неоднорідність напруженого стану у середовищі деформації, що стає причиною збільшення хвилястості поверхні зрізу. Поперечний зазор усувається за допомогою різних конструкцій упорів (1.1), активного затиску (2), за рахунок деформування прокату-заготовки (3): редукуванням, висадкою тощо.

Схеми із застосуванням упорів (1.1), втулкових ножів (1.2) не дозволяють створити навантаження на прокат-заготовку перед початком процесу розділення. Різниця між схемами полягає в тому, що втулковий ніж дозволяє знизити радіальні зазори й кутовий перекіс прокату до мінімуму й створити радіальні навантаження на прокат-заготовку у процесі розділення.

Зменшенню зазорів, а, отже, і підвищенню точності відрізки в цьому випадку сприяє застосування каліброваного прокату [5], але при цьому зростає собівартість заготовок. Дослідження високошвидкісного розділення показують позитивний вплив інерційності прокату-заготовки на якість розділення [38, 40]. Однак даний параметр недостатньо керований, оскільки потрібні заготовки різної (відмінної від оптимальної) довжини й маси.

Найпоширеніші схеми з активним поперечним затиском за рахунок інструменту (2). Виключення поперечного зазору між прокатом і інструментом може бути досягнуте за рахунок пластичної деформації прокату-заготовки.

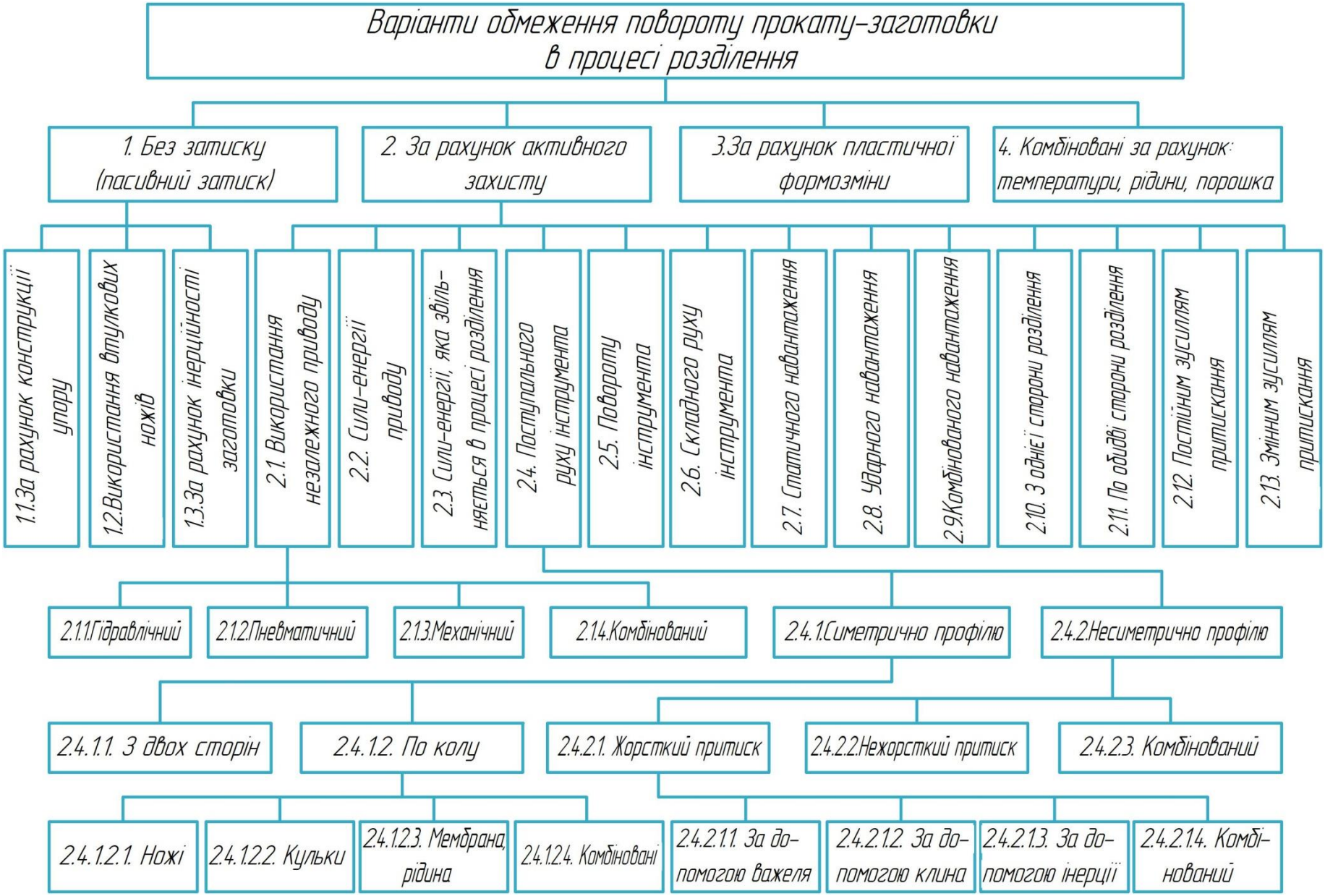



Рис. 1.12 – Класифікація варіантів обмеження повороту прокату-заготовки в процесі розділення

Сучасні конструкції штампів дозволяють поєднати формотворчі і розділювальні операції [62, 127]. Наприклад, редукуванням заготовки при її подачі до інструменту за рахунок пластичної деформації. Однак такі схеми не знайшли широкого застосування у виробництві через організаційно-технічні труднощі, пов'язані з підготовкою прокату (очищення, травлення, фосфатування) і можливості відрізки обмеженої номенклатури металів, що мають відносно невисоку міцність й підвищену пластичність [38]. Комбіновані схеми (4) затиску прокату-заготовки з використанням зміни температури інструмента, подачі рідини, порошків й інші практично не знаходять застосування через низьку продуктивність і складність реалізації.

При активному затиску (2) поперечні сили можуть бути постійними по величині протягом процесу розділення (2.12), або змінними (2.13) за певним законом (диференційований затиск).

Обладнання з постійним затиском (2.12) випускають вітчизняні спеціалізовані підприємства по випуску ковальсько-пресового устаткування і за кордоном фірми: $Pels$ ($Erfurt$), $Eumuco$ (Німеччина), $Ficep$ (Італія), $Lamberton$ (Англія) і ін. [128].

Принципова відмінність штампів з диференційованим затиском (2.13) полягає в тому, що зусилля затиску прокату-заготовки змінюється пропорційно зусиллю відрізки. При всіх перевагах штампів з диференційованим затиском загальним і істотним для них недоліком є надмірна складність конструкцій і трудомісткість обслуговування. Це в ряді випадків є причиною відмови від їхнього застосування. Крім того для таких штампів характерні підвищені витрати енергії на подолання тертя, яке у свою чергу приводить до інтенсивного зношування контактних поверхонь.

При цьому затискання прокату-заготовки може бути застосованим, як по одну сторону від площини розділення (2.10), так і з двох сторін (2.11). Це дозволяє стабілізувати положення заготовки і прокату в процесі розділення. Найбільше поширення у вітчизняній і світовій практиці одержало обладнання з активним поперечним затиском прокату-заготовки по обидві сторони від площини розділення

(2.11) [129 – 133], оскільки воно забезпечує одержання мірних заготовок більш високої якості в порівнянні з іншими відомими способами різання зсувом. Крім того, можливе здійснення однострумкового й багатострумкового розділення прокату в широкому діапазоні змін поперечних перерізів вихідної заготовки.

Відзначимо базову конструкцію штампу з диференційованим затиском, запропоновану С. Ш. Яшаєвим [3, 134] (рис. 1.13).

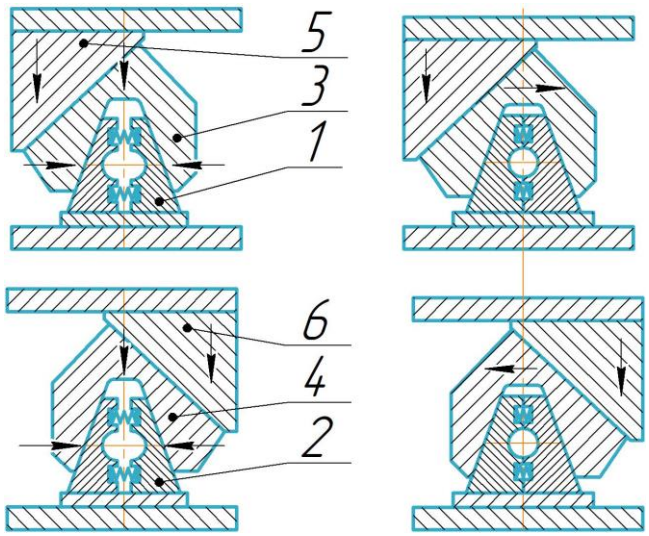



Рис. 1.13 – Конструктивні схеми роботи штампу з диференційованим затиском [134]

Прокат і заготовка затискаються ножами-піввтулками 1 і 2, що мають форму клина. Ножі укладені у повзушки 3 і 4, які горизонтально переміщуються клиновими з'єднаннями. При ході повзуна преса вниз верхні клини 5 і 6 переміщують повзушки 3, 4 спочатку вниз, а потім горизонтально назустріч одна одній. У такий спосіб відбувається затиск прокату-заготовки в ножах-піввтулках 1, 2 і остаточна відрізка заготовки. Затиск прокату-заготовки може бути реалізований за рахунок незалежного приводу (2.1), який може бути гідравлічним (2.1.1), пневматичним (2.1.2) або механічним (2.1.3). Найбільше поширення має обладнання з механічним приводом (2.1.3). Реалізація ударного (2.8) і комбінованого (2.9) навантаження забезпечує підвищення якості заготовок. Але їх використання обмежене внаслідок складності конструктивної реалізації обладнання і оснастки,

особливо у разі застосування штампів з диференційованим затиском прокату-заготовки.

По довжині заготовки і прокату можуть бути прикладені різні за величиною навантаження, які можуть приводити, і до пластичних деформацій. До таких випадків відноситься нанесення концентратора напружень за рахунок локальної пластичної деформації прокату. Нанесення концентратора напружень може проводитися як при поступальному русі інструмента (2.4), з поворотом (2.5), так і при їх комбінації (2.6) [17, 38, 41].

### 1.4 Сучасні підходи до реалізації способу холодної ломки згином

Внаслідок пластичної деформації, що передує руйнуванню, зароджуються мікротріщини у скупченні дислокацій. Зростання тріщини визначають нормальні напруження [135]. Рух мікротріщини – це результат накопичення ушкоджень в процесі пластичної деформації, який закінчується створенням нових вільних поверхонь розділення. У начальній стадії пластична зона виникає в області максимальних дотичних напружень. Під впливом зміцнення напруження перерозподіляються і пластична деформація займає область безпосередньо попереду тріщини, в якій зароджуються нові мікротріщини та інші дефекти. У заключній стадії система мікротріщин втрачає стійкість, що відповідає фізичному критерію початку руху тріщини. Повільне зростання тріщини супроводжується збільшенням пластичної зони. У випадку, коли тріщина розповсюджується достатньо швидко, але не доганяє границю своєї пластичної зони, трапляється крихке руйнування зі швидкістю звука. Якщо ж тріщина наздоганяє границю пластичної зони, трапляється в’язке руйнування [41].

Причиною нестабільності розвитку тріщини є те, що навантаження впливає на тріщину через матеріал деталі. При цьому у матеріалі накопичується пружна енергія. У випадку коли в процесі руйнування ця енергія вивільняється, то нею не завжди можна управляти. Глюкліх [136] виходить із відомої умови поширення тріщини

$$-\partial U/\partial c = \partial W/\partial c, \quad (1.19)$$

де $U$ й $W$ – пружна енергія, накопичена й релаксована відповідно;

$c$ – довжина тріщини.

На його думку, у звичайних умовах тріщина, як правило, нестабільна. Однак є виключення, коли тріщина залишається стабільною, навіть якщо задовольняється наведена вище умова. Саме ці випадки й становлять інтерес із погляду використання теорії процесу в інженерній практиці.

Існують три умови досягнення стабільності [136]:

1. Відношення $\partial W/\partial c$ непостійне, але швидко зростає з довжиною тріщини $c$. При цьому, незважаючи на те, що $(-\partial U/\partial c)$ збільшується з ростом $c$, нерівність $-\partial U/\partial c < \partial W/\partial c$ виконується.

2. Відношення $(-\partial U/\partial c)$ не залежить від $c$, тобто сила руйнування не збільшується.

3. Відношення $(-\partial U/\partial c)$ є функцією, що зменшується з довжиною тріщини $c$, тобто руйнуюча сила зменшується.

Величина споживаної енергії залежить від механічних властивостей матеріалів. У пластичних матеріалах енергія зростає в результаті збільшення зони текучості у вершині тріщини. Енергія, що витрачається на пластичну деформацію, пропорційна розмірам тріщини. Тобто $\partial W/\partial c$ збільшується з ростом довжини тріщини $c$. Аналогічне явище може спостерігатися й при відсутності збільшення зони деформації лише внаслідок зміцнення. У крихких матеріалів втрата енергії може бути пов'язана з утворенням системи мікротріщин, що передують магістральній тріщині.

Таким чином, стабільність траєкторії тріщини визначається, по-перше, властивостями матеріалів. Завдяки їм опір руйнуванню зростає з довжиною тріщини й відтерміновує катастрофічне некероване руйнування, якщо не виключає його взагалі. Наявність в матеріалі пластифікуючих добавок зменшує швидкість тріщини і збільшує величину пластичної деформації. А по-друге – характером зміни навантаження в часі.

Наявність зусиль стискання уздовж траєкторії можливого руйнування створює вузький деформований коридор, що забезпечує просування тріщини в необхідному напрямку і по певній траєкторії. По-перше напруження стискання, які виникнуть по всьому перерізу зразка, змусять тріщину йти точно по заданому напрямку. По-друге, при зовнішньому обтисканні в сталі виникають напруження розтягання, що прагнуть розірвати зразок по осі. Вони порівняно невеликі, але все-таки сприяють руйнуванню й підштовхують тріщину.

Дуже важливо вести холодну ломку металу так, щоб не створювати в ньому значної пластичної деформації.

При цьому можуть виникнути системи з багатьох мікро- і макротріщин. Існує методика оцінки пластичності прокату, що дозволяє визначити умови, при яких забезпечується задовільна якість заготовок [137, 138]. Методика побудована на порівнянні діаграми пластичності даного матеріалу з областю допустимих для даного процесу значень пластичних властивостей. Для зменшення викривлень форми перерізу прокату, що формуються на стадії згинання і передує появі тріщини руйнування, необхідно виключити в зоні розтягання вихід пластичної деформації на зовнішню поверхню поза концентратором.

При руйнуванні по металу рухаються численні групи пружних хвиль. Природа їх різна і падати на поверхню зразка вони можуть під будь-якими кутами. Отже, і відбиваються вони довільно. Тому взаємодія їх із тріщиною багатоваріантна і тріщина далеко не завжди виходить на поверхню під прямим кутом. Потрібні спеціальні підходи, щоб виключити вплив відбитих хвиль на зростаючу тріщину. У роботах [16, 139, 140] Є. М. Висоцького і В. В. Гришаєва розглядається переважний напрямок поширення тріщини, який обумовлений напрямком найбільших напружень розтягання і може бути визначений за формулою:

$$tg2\alpha = 2 \cdot \tau_{xy} / (\sigma_x - \sigma_y), \qquad (1.20)$$

де $\alpha$ – кут між нормаллю до площини найбільшого напруження розтягання й віссю OX;

$\tau_{xy}$ – дотичні напруження;

$\sigma_x, \sigma_y$ – напруження розтягання – стискання (з боку опори) в зоні передбачуваної площини розділення.

Автори зробили висновок про те, що умова $\sigma_x - \sigma_y > 0$, по суті, є критерієм стійкості траєкторії тріщини. Якщо $\sigma_x - \sigma_y < 0$, тріщина поширюється нестійко. Зі збільшенням плеча навантаження створюється ситуація $\sigma_x - \sigma_y = \sigma_x - \left(\sigma_y^- + \sigma_y^+ > 0\right) < 0$, при якій тріщина може ухилитися убік.

Щоб тріщина не встигнула дістати зони напружень стискання і відхилитися, необхідно, щоб час поширення тріщини був в три рази більшим чверті періоду вільних коливань деформованої частини зразка: $\tau > 3 \cdot T/4$, де $\tau$ – повний час поширення тріщини; $T$ – період вільних згинних коливань незакріпленого стрижня, довжина якого дорівнює плечу навантаження. При нерівних плечах навантаження тріщина йде у бік більшого плеча внаслідок того, що з його боку під опорою рівень напружень стискання нижче, ніж у короткому плечі. При консольному навантаженні, якщо вільний кінець досить короткий – $l < 2{,}5 \cdot d$, тріщина буде рухатися під опору і фінішує на краю опори. При $l > 2{,}5 \cdot d$ тріщина буде рухатися у вільну частину стрижня.

На картину розвитку поля поблизу опори порушення симетрії вносить різниця інерційних сил, створюваних прискореним рухом недеформованих ділянок зразка. Більш коротка частина зразка притискається до опори меншою силою інерції, ніж довга. Тому тріщина відхиляється у сторону короткого недеформованого кінця.

Автори [16, 139, 140] зробили висновок про те, що ефективним шляхом підвищення геометричної точності заготовок є керування швидкістю зростання тріщини. Швидкість тріщини повинна бути можливо більшою з метою зниження енергоємності розколу. При цьому вона не повинна бути надмірною, щоб уникнути появи складного рельєфу на поверхні руйнування. Віддають перевагу діапазону від $1000$ м/с до $1500$ м/с. При цьому енергоємність процесу низька, а тріщина ще досить стійка [41].

На траєкторію тріщини впливають внутрішні залишкові напруження. Перехід тріщини із зерна в зерно сталі створює дрібну шорсткість розколу. Чутлива тріщина й до структурних складових матеріалу прокату. Однак при швидкості тріщини 1000 м/с і вище тріщина здатна однаково успішно зростати й по фериту, і по перліту. При таких швидкостях тріщина стає крихкою й ріже будь-які компоненти сталей. Погіршують поверхню розділення дислокації, міжзеренні границі й інші дефекти в сталі [41, 136].

## 1.5 Теоретичні і експериментальні дослідження процесів безвідходного розділення сортового і трубного прокату

Завдання теоретичного дослідження процесів безвідходного розділення сортового і трубного прокату на мірні заготовки незалежно від обраного способу зводяться до визначення наступних характеристик:

- кінематики відносного руху інструмента й розділяємого прокату;
- геометричної точності форми отриманих заготовок;
- інтегральних сил і моментів, що діють на інструмент і розділяємий прокат;
- енерговитрат на здійснення процесу розділення.

Знання цих характеристик дозволить не тільки виробити систему керування процесом розділення, але й доказово встановити і пояснити переваги та недоліки того або іншого способу розділення.

Вивчення й удосконалення процесів безвідходного розділення прокату ведеться на основі єдиної теорії, яка встановлює закономірності й взаємозв'язок між пластичним етапом й етапом руйнування [20, 74, 87, 141, 142]. В основу загальної теорії процесів розділення покладені диференціальні й інтегральні методи обчислення [143].

Диференціальними методами аналізуються процеси енергосилової контактної взаємодії елементарних об’ємів твердого тіла у осередках деформації й напружено-деформованого стану. Інтегральні методи дозволяють аналізувати процеси

енергосилової контактної взаємодії інструмента з заготовкою [144]. Дані методи доповнюють один одного.

При математичному моделюванні процесів розділення використовуються деформаційна теорія й теорія пластичної течії [145 – 148]. Теорія пластичної течії дозволяє при крововому аналізі фіксувати момент переходу окремих частин тіла із пружного стану в пластичне і навпаки [149].

Існуючі рекомендації з вибору способу розділення сортового прокату пов'язані із традиційними механічними характеристиками матеріалу: твердістю, границею текучості, границею міцності, ударною в’язкістю тощо. Однак використання традиційних механічних характеристик матеріалу не завжди дозволяє зробити правильний вибір способу розділення для матеріалів у стані поставки [24, 25].

Для крихкого руйнування найбільш відомим є енергетичний критерій руйнування Гриффітса, згідно з яким повна дисипація енергії системи «зразок – тріщина» дорівнює потужності прикладених сил [43]:

$$\sigma = \sqrt{2 \cdot E \cdot A/(\pi \cdot l)}, \tag{1.21}$$

де $\sigma$ – напруження руйнування;

$E$ – модуль Юнга;

$A$ – поверхнева енергія стінок тріщини віднесена до одиниці її площі;

$l$ – половина довжини тріщини.

Теорія Гриффітса не враховує того факту, що при руйнуванні реального металевого матеріалу має місце пластична деформація, яка може бути врахована наступним чином [43]:

$$\sigma = \sqrt{2 \cdot E \cdot (A_{\text{пов}} + A_{\text{деф}})/(\pi \cdot l)}, \tag{1.22}$$

де $A_{\text{пов}}, A_{\text{деф}}$ – затрати енергії на формування вільної поверхні стінок тріщини та протікання пластичної деформації.

У механіці пружно-пластичного руйнування використовують критерії руйнування, що основані на понятті $J$ – інтеграла, оскільки у вершині тріщини завжди створюється зона пластичної деформації і у процесі зростання тріщини енергія, яка асоційована з полем пластичної деформації, значно перевищує енергію, необхідну для створення нової вільної поверхні.

На даний час запропоновано багато критеріїв, за допомогою яких можна оцінювати використаний ресурс пластичності. Однак їхнє практичне використання для різних процесів обробки металів, особливо для процесів розділення сортового прокату, часто викликає труднощі, пов'язані з доцільністю застосування того або іншого підходу. Огляд стану розвитку теорії деформованості наведений в роботах [150, 151].

Проблема оцінки схильності матеріалу до руйнування на стадії проектування є важливою для усіх процесів обробки металів тиском, у тому числі для процесів безвідходного розділення сортового прокату. І може бути вирішена за допомогою феноменологічної теорії деформування [20, 151 – 167], яка базується на експериментальних даних про механічні властивості матеріалів. Застосування феноменологічних критеріїв руйнування [151, 161, 162] можливе, якщо відомі механічні характеристики досліджуваних матеріалів, діаграми або поверхні пластичності [152]. При побудові діаграм пластичності матеріалів використовують граничні величини накопиченої пластичної деформації [152, 155, 158, 168].

Критерії деформованості Мора, Шлейхера-Надаї, Давиденкова-Фрідмана й ін. [152] використовують у випадках порівняно незначних пластичних деформацій. При високих значеннях пластичних деформацій використовують критерії, представлені в роботах С. І. Губкіна, Г. А. Смирнова-Аляєва, В. Л. Колмогорова, В. А. Огороднікова, Г. Д. Деля, Ю. Г. Калпіна й ін. [159, 169, 170].

Відомим критерієм оцінки граничних деформацій є критерій Г. А. Смирнова-Аляєва [168]:

$$e_i = \int_0^{t_0} \varepsilon_i \cdot d\tau \le e_p(\eta), \qquad (1.23)$$

який можна записати як:

$$\psi = e_u / e_p(\eta) \leq 1, \tag{1.24}$$

де $e_p(\eta)$ – гранична деформація в момент появи перших тріщин;

$\psi$ – використаний ресурс пластичності;

$e_u$ – інтенсивність деформації;

$\eta$ – показник напруженого стану

Критерій В. Л. Колмогорова [20] можна представити у вигляді:

$$\psi = \int_0^{t_p} (E(t-\tau) \cdot B(\tau) \cdot \dot{e}_i(\tau) / e_p[\eta(\tau)]) d\tau \leq 1, \tag{1.25}$$

де $\dot{e}_i$ – інтенсивність швидкості деформацій;

$B(\tau)$ – величина, яка враховує швидкість розвитку тріщин і їх заліковування при холодному деформуванні;

$E(t-\tau)$ – коефіцієнт, який ураховує заліковування дефектів при високих температурах, монотонно зменшується від 1 до 0 зі збільшенням аргументу.

В. А. Огороднiков [158] запропонував залежність граничної деформації від: схеми напруженого стану, історії деформування й градієнта пластичних деформацій:

$$\psi = \int_0^{e_i} \left(1 + 0{,}2 \cdot arctg(d\eta / de_i)\right) x \, e_i^{0{,}2 \cdot arctg(d\eta/de_i)} / \left(e_p \cdot \eta(e_i)\right)^{1+0{,}2 \cdot arctg(d\eta/de_i)} \leq 1. \tag{1.26}$$

В роботах В. А. Огороднікова [35, 171, 172] запропоновано методику, сутність якої полягає в інтегруванні функції залежності інтенсивності напружень і інтенсивності деформацій єдиною кривою течії матеріалу, що не залежить від виду напруженого стану. В роботі [151] він висунув гіпотезу про те, що на пластичність впливає третій інваріант тензора напружень $I_3(T_\sigma)$.

До сих пір тривають суперечки відносно побудови поверхонь граничних деформацій. Наприклад, у роботі [161] запропонований критерій деформованості, в

якому залежність пластичності від схеми напруженого стану задається поверхнею граничних деформацій у координатах: гранична деформація $e_p$, показник напруженого стану $\eta$ і параметр Лоде-Надаі $\mu_\sigma$:

$$\psi = \int_0^{e_u} n \cdot e_u^{n-1} \cdot de_u / \left(e_p \cdot (\eta, \mu_\sigma)^n\right) < 1, \qquad (1.27)$$

де $n = 1 + a \cdot d\eta/de_u - b \cdot d\mu_\sigma/de_u$;

$a, b$ – постійні, які залежать від матеріалу,

$e_p\ (\eta, \mu_\sigma)$ – поверхня граничних деформацій.

Вірогідність розрахунків граничних деформацій за критерієм (1.27) вище, ніж за критеріями (1.25), (1.26), саме при реалізації об'ємного напруженого стану. Головний недолік критерію (1.27) полягає в тому, що побудова поверхні граничних деформацій $e_p\ (\eta, \mu_\sigma)$ вимагає досить складних й трудомістких експериментальних досліджень. І. О. Сіваком і В. А. Огороднiковим розроблена методика побудови поверхонь граничних деформацій $e_p\ (\eta, \mu_\sigma)$ шляхом простих випробувань на розтягання, стискання, чистий зсув й випробувань на осадження циліндричних зразків в оболонках різної товщини [151, 161].

Фізично більш виправданим є вибір у ролі параметру пластичності роботи пластичної деформації до руйнування. Про можливість використання енергетичного аналога діаграми пластичності для запису критерію деформації без руйнування вказано у роботі [173]. У роботі Л. Г. Степанського [174] для прогнозування руйнування металу запропонована гіпотеза щодо сталості граничної роботи головних напружень розтягання в одиничному обсязі матеріалу.

При цьому для застосування енергетичних підходів до оцінки деформованості металів необхідні значні обсяги експериментальних досліджень впливу умов і параметрів деформування на питому роботу руйнування, як при простому, так і при складному навантаженні [175]. Для визначення роботи деформування при розділенні прокату застосовують методи В. А. Огороднікова, засновані на методиці твердості і використання діаграм граничної пластичності [151, 176].

У роботі [177] у якості міри пластичності запропоновано застосувати роботу, витрачену на пластичну деформацію елементарного обсягу від початку деформації до появи в цьому обсязі мікротріщини

$$q_p = \int_0^{t_p} \sigma_{ij} de_{ij}. \tag{1.28}$$

Критерій деформування при цьому має вигляд:

$$\psi = \int_0^{e_i^*} \sigma_i de_i / A_p(\eta), \tag{1.29}$$

де $\psi$ – енергетичний ступінь використання запасу пластичності;

$\sigma_i = C \cdot e_i^n$ – інтенсивність напруження;

$C$ і $n$ – константи кривої течії матеріалу;

$A_p(\eta)$ – питома робота формозміни до моменту руйнування при постійному показнику напруженого стану, тобто, по суті, енергетичний аналог діаграми пластичності.

Використання двох показників напруженого стану (параметра Лоде-Надаї й показника жорсткості напруженого стану) дозволяє більш точно оцінити використаний ресурс пластичності.

Слід відмітити модифікований критерій Кокрофта-Петема-Оха [178]:

$$\psi = \int_0^{\dot{\varepsilon}_p} d\bar{\varepsilon}_p / \bar{\varepsilon}_f(\chi), \tag{1.30}$$

де $\chi = \sigma_i / \sigma_{cp}$,

$\bar{\varepsilon}_f(\chi)$ – деформація, яка відповідає руйнуванню при $\chi = const$.

У роботі В. М. Михалевича [160] для визначення граничних деформацій одержали розвиток тензорні моделі накопичення ушкоджень. В роботах Г. Д. Деля, для середовищ із початковою анізотропією, установлені явні критерії залежності для циклічного гарячого деформування.

У зв’язку зі значним розбігом експериментальних даних, отриманих при дослідженні руйнування металів в процесах обробки металів тиском [179, 180], в роботі [21] запропонована імовірнісна модель руйнування. Вибір інтенсивності деформацій, як кількісної міри пластичності, не є оптимальним, оскільки допускає грубе допущення про те, що увесь приріст деформацій рівноправний і вносить однаковий вклад у процес накопичення ушкоджень.

Різноманіття сучасних теорій пластичності, що аналізують процеси деформування твердого тіла диференціальними методами, може бути розділене на дві групи. Перша група поєднує теорії пружно-пластичних деформацій, в основі яких знаходяться рівняння, що встановлюють зв'язок між напруженнями й деформаціями. Другу групу утворюють теорії пластичних течій, що базуються на рівняннях, які встановлюють зв'язок між напруженнями й швидкостями деформацій. Обидві групи теорій надають можливість побудови замкнених систем, загалом, нелінійних диференціальних рівнянь, що визначають процеси пружно-пластичного деформування твердих тіл [144].

Для визначення загального виду просторового пружно-пластичного деформування твердих тіл використовується замкнена система, що складається з вісімнадцяти нелінійних рівнянь із вісімнадцятьма невідомими [144]. До складу цієї системи входять: три диференціальні рівняння рівноваги; шість рівнянь Коші або шість рівнянь нерозривності (умов Сен-Венана); шість фізичних рівнянь, що відбивають конкретні властивості пружно-пластично деформованого тіла; три рівняння, що визначають інтенсивність напружень, деформацій і функціональний зв'язок між ними. З математичної точки зору ця система повністю визначає загальний стан просторового пружно-пластичного деформування твердого тіла. Однак наявність великої кількості нелінійних диференціальних рівнянь обмежує можливість їх розв'язку в загальному виді. Практично система має розв'язок лише в окремих випадках, що відносяться до одно- або двомірних завдань (плоских, осесиметричних).

Наприклад, ця система може бути використана при математичній обробці даних, отриманих експериментально-теоретичним методом візіопластичності [181],

який використовується для визначення деформованого й напруженого стану в стаціонарних процесах плоскої або осесиметричної течії. Такий підхід був використаний для аналізу напруженого деформованого стану у середовищі деформації при неповністю закритій відрізки зсувом [182]. На основі експериментальних досліджень, виконаних методом візіопластичності, визначалася функція переміщення часток металу уздовж осі. Аналогічні дослідження були виконані для неповністю закритої відрізки з активним поперечним затиском. Подібні дослідження відрізняються досить високою трудомісткістю.

У класі тривимірних завдань застосовується метод розрахунків деформуючих зусиль за наближеними рівняннями рівноваги і умовою пластичності [183, 184]. Одне з положень цього методу передбачає зведення задачі до осесиметричної або плоскої.

При аналізі процесів обробки матеріалів тиском використовуються також методи верхньої й нижньої оцінки [184], балансу робіт [21, 168, 170, 185, 186]. Практика показала, що ці методи дозволяють одержати коректний результат при розв'язку об'ємних завдань, які характеризуються стаціонарністю й можливістю зведення механічної схеми деформації до двомірного завдання. Так, наприклад, при аналізі розділення сортового прокату з використанням методу верхньої оцінки процес розділяється на чотири стадії, кожної з яких відповідає єдино можливе поле швидкостей. Такий аналіз дозволяє розібратися з механізмом утворення утяжини й форми поверхні зрізу, але картина деформованого стану в зоні розділення представляється досить наближеною [3].

Для аналізу процесів розділення прокату добре розвинений і широко використовується метод ліній ковзання [3, 61, 75, 187, 188]. Отримані результати розрахунків при використанні цього методу мають експериментальне підтвердження [3, 62]. В роботах С. С. Соловцова [3, 30, 32] зазначено, що загальний теоретичний аналіз напруженого стану процесу розділення ускладнюється внаслідок наявності етапу руйнування, у процесі якого здійснюються зародження і розвиток тріщини. Тому аналіз напруженого стану виконують для пластичного етапу розділення.

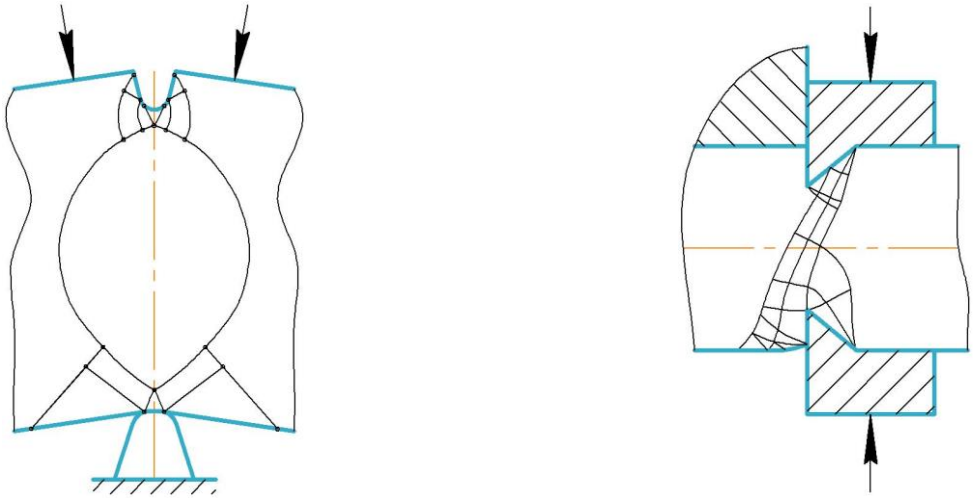
Однак при вивченні пластичного етапу виникають певні труднощі, пов’язані з: нерівномірністю розподілу напружень і деформацій, значною локалізацією і невизначеністю границь середовища деформацій; немонотонністю процесу пластичної деформації, зміною напрямку головних осей у процесі розділення; об’ємним характером напруженого стану; невизначеністю контактних умов; великими деформаціями, що досягають критичних величин і передують руйнуванню; наявністю концентраторів напружень [3].

Таким чином, можливості метода ліній ковзання обмежені внаслідок складності урахування контактного тертя між інструментом і прокатом. При цьому приймаються наступні допущення до розрахунку: задача плоска; тертя або не враховується, або рахується постійним; зміцнення матеріалу не враховують; поля ліній ковзання не відповідають граничним умовам у швидкостях.

З урахуванням вищезазначеного, складно виконати теоретичний аналіз пластичного етапу розділення. Тому процес максимально схематизують і приймають ряд допущень. Не зважаючи на це, отримані приблизні теоретичні рішення дозволяють виявити вплив окремих факторів на процес розділення.

На підставі аналізу тільки пластичного етапу неможна розрахувати траєкторію тріщини, але можна прогнозувати її початковий напрям розвитку. Так, у роботах [74, 138] В. А. Тимощенко розглядає вплив умов навантаження на характер пластичної течії металу при триточковій схемі ломки прокату з використанням методу ліній ковзання (рис. 1.14, а). В роботі [81] вирішено завдання визначення характеру пластичної течії при відрізці зсувом у ножах з ріжучими елементами (рис. 1.14, б).

За допомогою аналітичних методів отримані рішення щодо напружено-деформованого стану у випадку ідеалізованих постановок задач: площина з напівнескінченною та кінцевою тріщиною, простір з дисковидною тріщиною тощо. Однак є багато практичних задач, які потребують урахування інерційних ефектів, які виникають при динамічному навантаженні і швидкому розвитку магістральної тріщини [189].



а б

Рис. 1.14 – Поле ліній ковзання: а – при триточковій схемі ломки з концентратором напружень; б – при відрізці зсувом у ножах з ріжучими елементами [81, 138]

Для проведення теоретичних досліджень інтенсивно розвиваються чисельні методи розв'язку рівнянь, з'являються нові програмні продукти, що дозволяють моделювати процеси обробки матеріалів тиском з урахуванням характерних особливостей їх реалізації. При виборі того або іншого методу теоретичних розрахунків слід виходити з того, що похибка обчислення обраного методу повинна перебувати в границях похибок сучасних методів вимірів обчислених характеристик.

### *1.5.1 Моделювання процесів розділення сортового і трубного прокату методом скінченних елементів*

Метод скінченних елементів на даний час є сучасною альтернативою методам теоретичного аналізу процесів обробки металів тиском [190 – 195]. Ефективність метода скінченних елементів підтверджена успішними прикладами застосування в різноманітних технічних і технологічних додатках, в тому числі при аналізі процесів розділення сортового прокату [196].

Для моделювання та дослідження процесів розділення сортового і трубного прокату використовують загальноінженерні скінченно-елементні пакети $Qform$, $Deform$, $Abacus$, $ANSYS$, $LS-DYNA$ [191 – 194, 197]. Однак використання метода скінченних елементів для моделювання безвідходних процесів розділення прокату має ряд проблем, пов'язаних насамперед із складністю постановки завдання та тим, що вони не завжди дозволяють контролювати момент руйнування.

Метод скінченних елементів не тільки використовує класичні рівняння механіки, а й додає до них багато власних допущень: використовуються спрощені екстремальні принципи, безперервність суцільного середовища забезпечується тільки у вузлах, в результаті чого порушується умова сталості об'єму; приймається, що поля переміщень, деформацій і напружень для кожного елемента мають спрощений вид; приймається конденсація – зменшення розмірності системи рівнянь шляхом виключення деяких ступенів вільності. Оскільки метод скінченних елементів ґрунтується на прийнятті цілого ряду спрощених гіпотез, це обов'язково вимагає ретельної підготовки комплексу вихідних даних із наступною перевіркою отриманих рішень [198, 199].

Програмний комплекс Deform – це потужна система моделювання технологічних процесів, призначена для аналізу тривимірної (3D) поведінки металу при реалізації різних процесів обробки тиском. Комплекс Deform дозволяє заглянути «усередину» технологічного процесу, простежити за течією металу, виявити дефекти, визначити залишкові деформації, макро- і мікроструктуру, фазовий состав і ін.

Зазначимо, що до переваг застосування метода скінченних елементів при дослідженні процесів розділення сортового і трубного прокату можна віднести можливості використання (побудови) великої кількості варіантів. Крім того, комп'ютерна імітація технології дозволяє значно знизити матеріальні витрати на виготовлення коштовного технологічного оснащення і доробки технології. Це дозволяє на етапі аналізу відмовитися від використання неефективного технологічного процесу. Завдяки цьому заощаджуються матеріальні ресурси і час.

### *1.5.2 Експериментально-аналітичні та експериментальні методи*

Достовірність результатів теоретичної моделі повинна бути підтверджена порівнянням із експериментально отриманими величинами досліджуваних параметрів. Тому наукове дослідження повинно поєднувати, як аналітичні, так і експериментальні методи.

Для вивчення процесів розділення сортового і трубного прокату широко використовуються експериментальні та експериментально-аналітичні методи, що дозволяють отримати інформацію про локальні явища пластичної течії [168].

Ці методи добре представлені в узагальнюючих роботах [200, 201] і в роботах, що описують конкретні методи, в тому числі метод ділильних координатних сіток [152, 200, 202, 203], муарових смуг [203], вимірювання твердості [202], поляризаційно-оптичний метод [203], метод тензометрії [204].

**Висновки до розділу 1.**

1. Проведено аналіз, виявлено сучасні тенденції та шляхи розвитку безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату, обладнання і оснастки для їх реалізації. Незважаючи на великий обсяг робіт, виконаних у цьому напрямку, необхідним є проведення додаткових теоретичних і експериментальних досліджень для пошуку нових схем і підвищення можливостей відомих безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату та обладнання, оцінки технологічних можливостей, моделювання технологічних режимів, розробки методик розрахунку і проектування технологічних процесів з урахуванням особливостей зовнішнього силового і кінематичного впливу.

2. Нові схеми та технологічні режими можуть бути реалізовані на існуючому ковальсько-пресовому обладнанні, у конструкцію якого внесені незначні зміни. Здійснення інших запропонованих способів, у силу новизни закладених у них принципів, вимагає спеціального устаткування: прес-молотів, які забезпечують точне дозування енергії, статичне, динамічне і статико-динамічне навантаження

заготовки; механічних пресів із застосуванням компактних виконавчих механізмів і інше.

3. Для дослідження процесів безвідходного розділення сортового і трубного прокату використовується широкий спектр методів аналітичного, експериментально-аналітичного, чисельного і фізичного моделювання. Комп'ютерне моделювання вивело дослідження на новий високий рівень для імітації процесу розділення, спостереження за процесами формозміни заготовки, визначення енергосилових параметрів процесу розділення. Незважаючи на велику кількість досліджень, присвячених оцінці ступеня витрати ресурсу пластичності, актуальним є створення нових методик вибору безвідходного способу розділення сортового і трубного прокату із матеріалів з різними механічними характеристиками.

4. Перспективним напрямком удосконалення процесів безвідходного розділення є автоматизація проектування процесів розділення сортового і трубного прокату на підставі систематизації та класифікації відомих способів, конструктивних схем обладнання і оснастки для їх реалізації, накопичення даних і створення інформаційних банків із розрахунковими і методичними рекомендаціями, схемами деформування.

На основі проведеного аналізу сформульовано **мету** та **задачі** роботи, що викладені у вступі дисертації.

# РОЗДІЛ 2
# ВИБІР НАПРЯМКІВ І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

## 2.1 Класифікація безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату

Для систематизації інформації щодо відомих безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату, на підставі робіт [205, 206] розроблено граф безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату (рис. 2.1, 2.2).

Вузли графа, які допускають багатоваріантне рішення позначені зафарбованим колом, а одноваріантні – незафарбованим колом. Поле схем навантажень, яке потрібно створити, може виступати як основа для створення графа цілей, а варіанти способів розділення прокату, можуть бути оцінені експертами з погляду досягнення поставлених цілей. Таким чином, може бути реалізований алгоритм методу морфологічного аналізу [207].

Аналіз стану безвідходних способів розділення сортового прокату і труб показує, що відносно велика в'язкість конструкційних сталей часто вимагає одночасного застосування декількох способів для керування рівнем пластичної деформації при розділенні. Найбільш доцільною буде певна комбінація параметрів схеми навантаження, параметрів технології нанесення концентратора напружень і швидкості деформування.

Тому для класифікації обрано найбільш перспективні ознаки: схема навантаження (1.1), характер навантаження (1.2), спосіб передачі сили від інструмента до прокату-заготовки (1.3), наявність і параметри концентратора напружень (1.4), напрямок руху інструмента (1.5).

На підставі аналізу, представленому у розділі 1, за видом деформації (1.1) найбільший інтерес представляють комбіновані схеми навантаження (2.6).

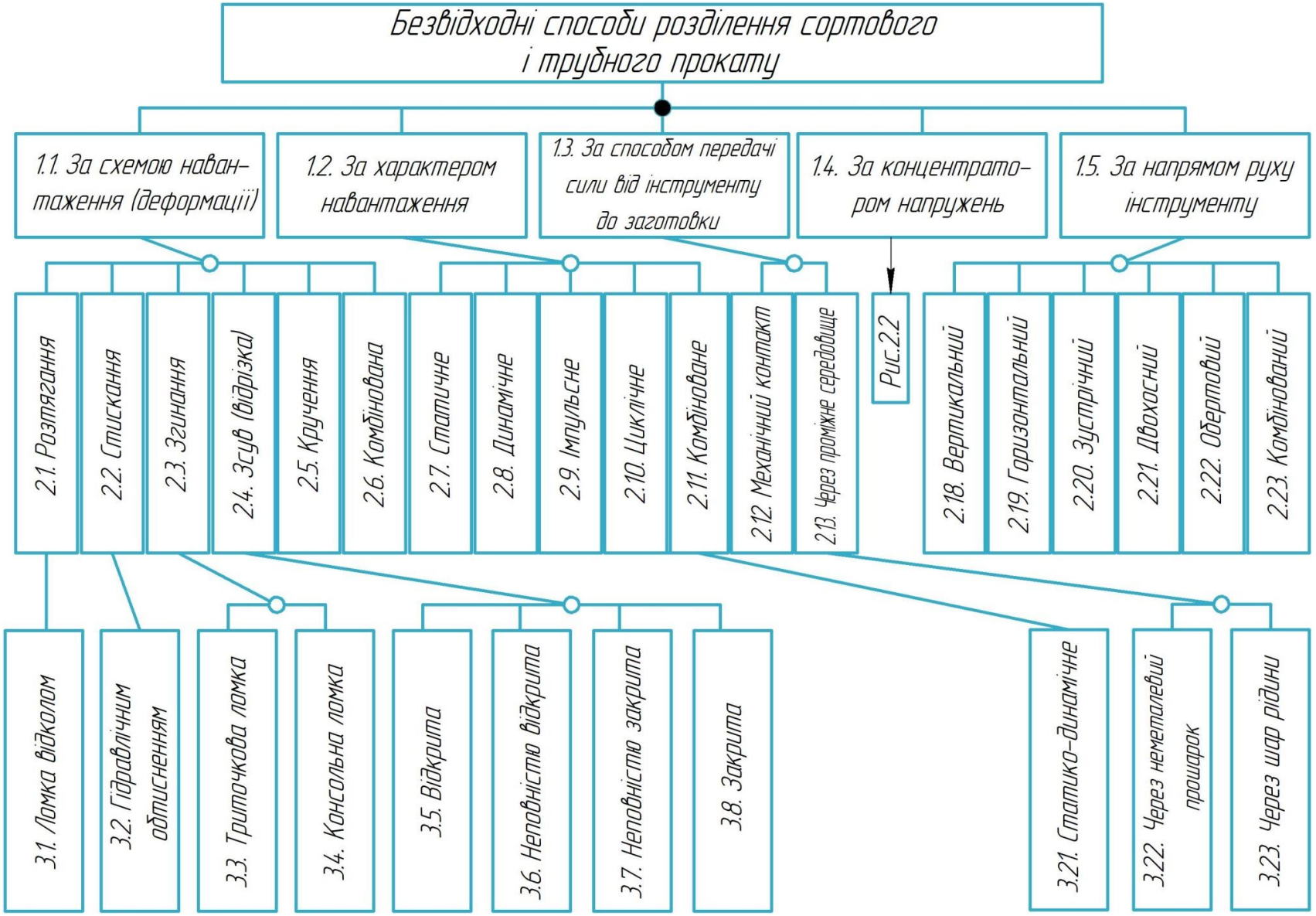



Рис. 2.1 – Граф безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату

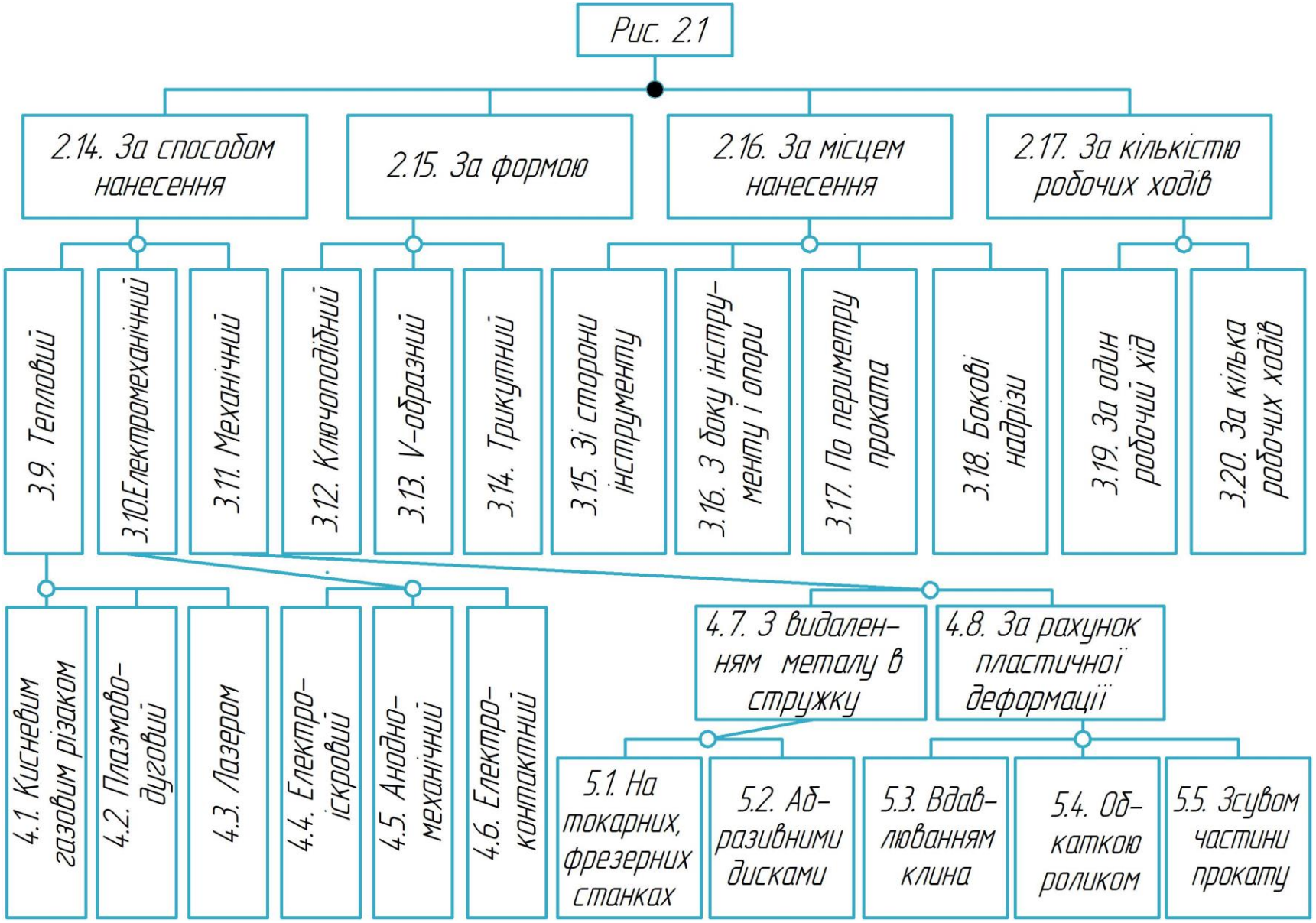



Рис. 2.2 – Граф безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату

На підставі виконаної класифікації вирішували задачу синтезу комбінованих схем навантаження (деформації) обробки засобами комбінаторики [208 – 212].

Структура комбінованого методу обробки (*КМО*) може бути представлена у вигляді:

$$КМО = \langle П, С, О \rangle, \tag{2.1}$$

де *П* – множина елементів – процесів фізичної, хімічної або іншої природи;

*С* – множина властивостей цих процесів;

*О* – множина відносин між ними.

Отже, кожному комбінованому методу обробки відповідає деякий набір одиничних ідентифікуємих процесів, протікання кожного з яких супроводжується заданим впливом на об'єкт обробки в результаті реалізації деякого фізико-технічного ефекту [208]:

$$\text{КМО} \Leftrightarrow \langle \text{П}_1, \text{П}_2, \dots, \text{П}_n \rangle, n \in N. \tag{2.2}$$

Якщо потужність множини *П* відома й дорівнює $N$, то загальна кількість можливих комбінацій по $2, 3, \dots, N$ парціальних процесів підраховується як сума відповідних сполучень елементів даної множини [213]. Далеко не всі елементи сформованої в такий спосіб множини можуть бути практично реалізовані або використані.

У роботі [214] сформульовані основні принципи, що формують необхідні й достатні умови доцільної реалізації комбінованого методу обробки:

○ принцип сумісності одиничних складових процесів полягає в можливості їхнього спільного протікання в обмеженій області простору, розміри якої регламентуються характером розв'язуваних даних комбінованого методу обробки технологічних задач;

○ принцип сумісності парціальних процесів у часі визначає можливість їх одноразового або послідовного здійснення;

- принцип сумарності впливів полягає в тому, що кількісні характеристики впливу на об'єкт кожного зі складових процесів повинні мати один порядок величини;

- принцип ефективності сполучення обґрунтовує доцільність розробки даного комбінованого методу обробки;

- принцип енергетичної сумісності одиничних процесів.

За допомогою розробленої програми з використанням засобів комбінаторики проведено пошук варіантів реалізації безвідходних способів розділення сортового прокату за ознаками класифікації 1 – 8 (рис. 2.3) [215].

Отриманий набір комбінацій для найбільш перспективних варіантів за ознаками 2 (рис. 2.4, а), 4 (рис. 2.4, б), 5 (рис. 2.4, в), дозволяє цілеспрямовано формувати раціональні сполучення, нові схеми, післядії фізико-механічних простих методів впливу у просторі і часі, реалізувати окремі якості у циклі обробки, розробляти прогресивні комбіновані технологічні процеси розділення сортового і трубного прокату.

Можливі схеми реалізації безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату (за ознакою 5) представлені на рис. 2.5.

Частина отриманих результатів – схем навантаження (деформації), досліджена у дисертаційній роботі (у наступних розділах). Інші схеми навантаження ще доведеться дослідити у наступних роботах.

Варіанти схем навантаження «гідростатичним обтисненням» були виключені внаслідок: складності герметизації гідропорожнини високого тиску з введеним у неї прокатом; необхідності забезпечення високих значень критичних тисків для розділення, що приводить до ускладнення конструкції встаткування й підвищенню вимог до його надійності й безпеки роботи.

За характером навантаження (1.2, див. рис. 2.1) перспективним представляється динамічне (2.8), імпульсне (2.9) і комбіноване (2.11) статико-динамічне (3.21) навантаження.




Рис. 2.3 – Основні ознаки реалізації безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату

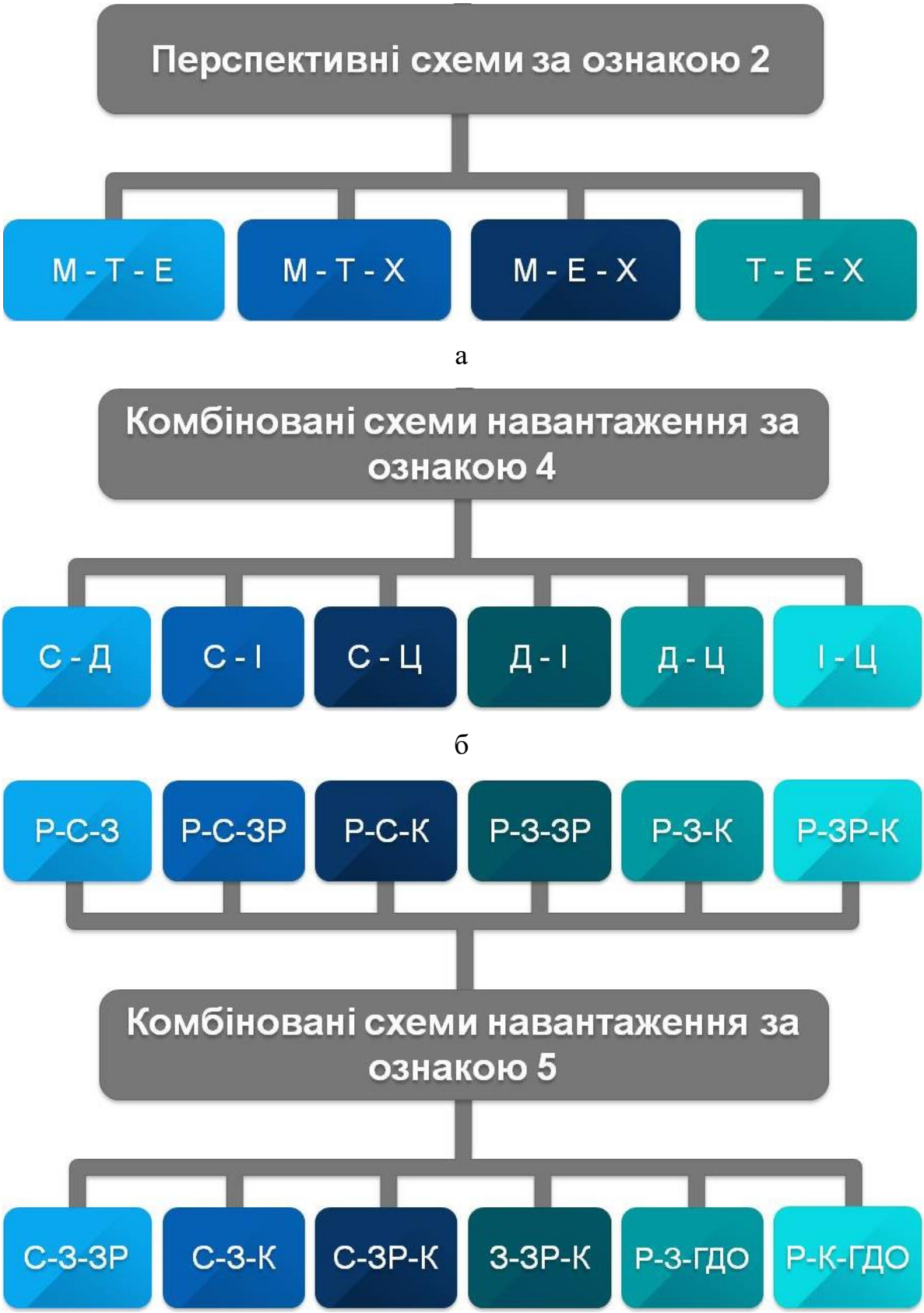



Рис. 2.4 – Основні результати синтезу комбінованих схем реалізації безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату

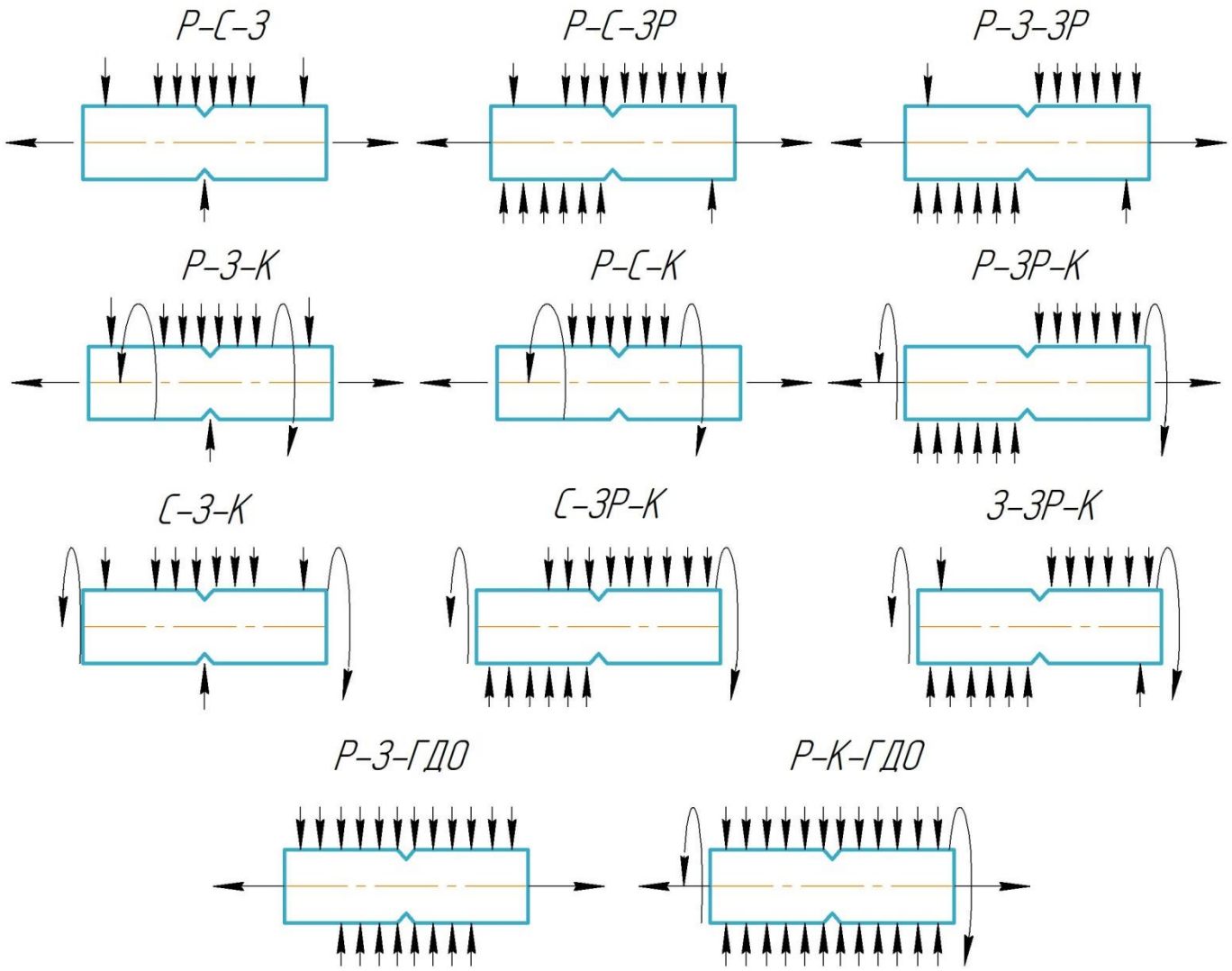



Рис. 2.5 – Схеми реалізації безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату

В Інтернеті наведена інформація щодо способу розділення сортового і трубного прокату шляхом трансформації кінетичної енергії, в якому використовується ефект від сильного удару у вузькому діапазоні (2.9), що дозволяє здійснити розділення по молекулярній будові матеріалу. Заявлена ширина зони ділянки у зоні площини розділення – (0,025…0,075) мм. Від миттєвої трансформації енергії ця ділянка нагрівається до високої температури й відразу остигає. При цьому усувається місцеве загартовування матеріалу й не потрібна відпустка. При всіх описаних вище перевагах відсутні відомості щодо практичного застосування цього способу розділення. Тому ця інформація носить декларативний характер.

Результати динамічної ломки згином показали, що геометрична точність заготовок суттєво залежать від способу й інтенсивності передачі їм зусилля (1.3) [17, 41]. Перевагу слід віддати безопорній схемі навантаження, яка виключає будь-який жорсткий контакт поверхні прокату з інструментом (механічний контакт (2.12)), що реалізовано у способі ломки прокату гідравлічним обтисненням (3.2).

Реалізація схем розділення сортового і трубного прокату через неметалевий прошарок (3.22) або через шар рідини (3.23) ускладнена із-за конструктивних особливостей [41].

Ломка прокату відколом (3.1) – один з перспективних напрямків розвитку способів безвідходних способів розділення заготовок [41]. Під ломкою прокату відколом розуміють вид руйнування за схемою розтягання шляхом відриву в результаті інтенсивного короткого імпульсу стискання, який створюється на одному із торців штанги прокату високошвидкісним ударом. Ударна хвиля поширюється вглиб і, досягнувши вільної поверхні, відбивається у вигляді хвилі розтягання. Даним способом можна отримати, як одиничну заготовку, так і одночасно розділити всю штангу на будь-яку кількість заготовок. Розділення можна здійснити, як за рахунок одного ударного імпульсу великої амплітуди, так і за рахунок повторних імпульсів розтягання малої тривалості. Однак спосіб ломки прокату відколом не знайшов застосування в промисловості насамперед внаслідок його невивченості, складності реалізації й необхідності забезпечення високих значень швидкостей удару.

Спосіб ломки прокату гідростатичним обтисненням полягає в тому, що прокат з нанесеним концентратором напружень уводиться в гідропорожнину циліндра й обтискається гідростатичним тиском [205]. Як зазначено у роботі [41], реалізація такої схеми навантаження забезпечує відсутність на поверхні зламу відколів і макротріщин. Однак подібне устаткування з реалізацією «пінч-ефекту» не знайшло широкого застосування в промисловості внаслідок недостатньої вивченості, конструктивних недоробок і істотних недоліків даного способу розділення.

Руйнування прокату гідродинамічним тиском спрощує проблему герметизації гідропорожнини, оскільки руйнування можливе навіть при величині зазору між

поверхнею прокату й ущільненням $(0{,}1 \dots 0{,}2)$мм. Однак усі інші недоліки, які наявні при руйнуванні гідростатичним обтисненням, у даній схемі не подолані [41].

Отримання геометрично точних заготовок способом ломки може бути досягнуто тільки при одночасному прийнятті додаткових заходів, у тому числі за рахунок нанесення ефективних концентраторів напружень.

Значну роль у процесі зародження тріщини у вершині концентратора напружень відіграє спосіб його нанесення на прокат (2.14). Способи нанесення концентратора напружень можна розділити на теплові (3.9), електромеханічні (3.10) й механічні (3.11) [17, 41].

Надрізи, зроблені різаком (3.9) ефективніші за механічні (3.11) за рахунок високого перепаду температур. Однак при нагріванні відбувається зміна структури металу в прилягаючих до концентратора напружень зонах. Це не завжди відповідає вимогам, які висуваються до геометричної точності заготовок [17].

Нанесення надрізу електромеханічними способами (3.10), а також за допомогою лазера (4.3) забезпечує ефективний концентратор напружень. Зона термічного впливу при цьому майже відсутня, а сам надріз має правильну геометричну форму, мінімальний радіус закруглення у вершини. Застосування даних способів нанесення концентратора напружень на виробництві стримується через низьку продуктивність процесу. Крім того, як теплові (3.9), так і електромеханічні способи (3.10) вимагають наявності обладнання, яке ускладнює технологічний цикл розділення [41].

Механічні способи (3.11) нанесення концентратора напружень знайшли найбільше застосування на виробництві. Надрізи, зроблені з видаленням прорізного металу в стружку (4.7), характеризуються підвищеною витратою металу й інструмента, високою вартістю останнього, шкідливими умовами виробництва й порівняно низькою продуктивністю процесу. Спосіб нанесення концентратора напружень методом пластичної деформації (4.8) є найбільш прийнятним, як для компонування робочих схем розділення, що працюють в один цикл, так і з погляду безвідходності процесу [17].

Вдавлення клинового ножа (5.3) в прокат приводить до швидкого затуплення його робочої крайки й зниження гостроти надрізу. Підвищити стійкість інструмента можна за рахунок нанесення концентратора напружень за допомогою роликів (5.4), але при цьому вузол нанесення концентратора виходить громіздким через виникаючі значні розпірні сили, ускладнюється конструкція встаткування [17, 41]. Нанесення концентратора напружень може відбуватися за рахунок зсуву частини прокату відносно профілю (5.5).

Ефективність концентратора напружень у першу чергу залежить від його геометрії (2.15) й місця розташування відносно сил розділення (2.16).

Із трьох форм концентратора: ключоподібного (3.12), $V$ – подібного (3.13), трикутного (3.14), які розглянуто у роботах [83, 216], максимальну концентрацію пластичної деформації й зниження ударної в'язкості забезпечує трикутний надріз (3.14) [17].

При способі холодної ломки згином, тріщина звичайно зароджується в одній точці, а потім перетинає весь зразок. Тому концентратор напружень, нанесений по всьому периметру перерізу (3.17) прокату або нанесений з боку інструменту і опори (3.16), не має особливих переваг перед однобічним (3.15). У роботі [217] вказується на застосування гострих додаткових бокових надрізів (3.18), які сприяють зменшенню пластичної деформації по товщині зразка, наближаючи умови руйнування до умов плоскої деформації, що приводить до випрямлення фронту тріщини і дозволяє задавати напрямок її поширення.

За напрямком руху інструмента (1.5) у ковальсько-пресовому обладнанні і штампах можливі наступні варіанти руху: вертикальний (2.18), горизонтальний (2.19), зустрічний (2.20), двохвісний (2.21), обертовий (2.22) та комбінований (2.23).

Спосіб відрізки зсувом у штампах втулковими ножами із уведенням в отвір труби ножів-оправок при вертикальному русі ножів (2.18) не знайшов широкого застосування через утворення на торцях заготовок утяжин і заусенців [3, 187].

Одним з методів поліпшення геометричної точності розділення труб є послідовний двохосьовий зсув (2.21) у горизонтальному (2.19) й вертикальному

(2.18) напрямках. Однак це негативно позначається на продуктивності процесу розділення [218].

На підставі виконаної класифікації безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату запропоновано нові способи розділення і обладнання для їх реалізації [219 – 227].

У дисертаційній роботі запропонований і досліджений спосіб триточкової холодної ломки (3.3) згином (2.3) при комбінованому (2.11) статико-динамічному навантаженні. Запропонований і досліджений спосіб комбінованого навантаження (2.6) за схемою «зсув – кручення» – неповністю закрита схема відрізки (3.7). При цьому інструмент здійснює складний плоский рух. Така схема відрізка отримала назву відрізки зсувом «ексцентричним закручуванням» у втулкових ножах (комбінований рух (2.23)) [56].

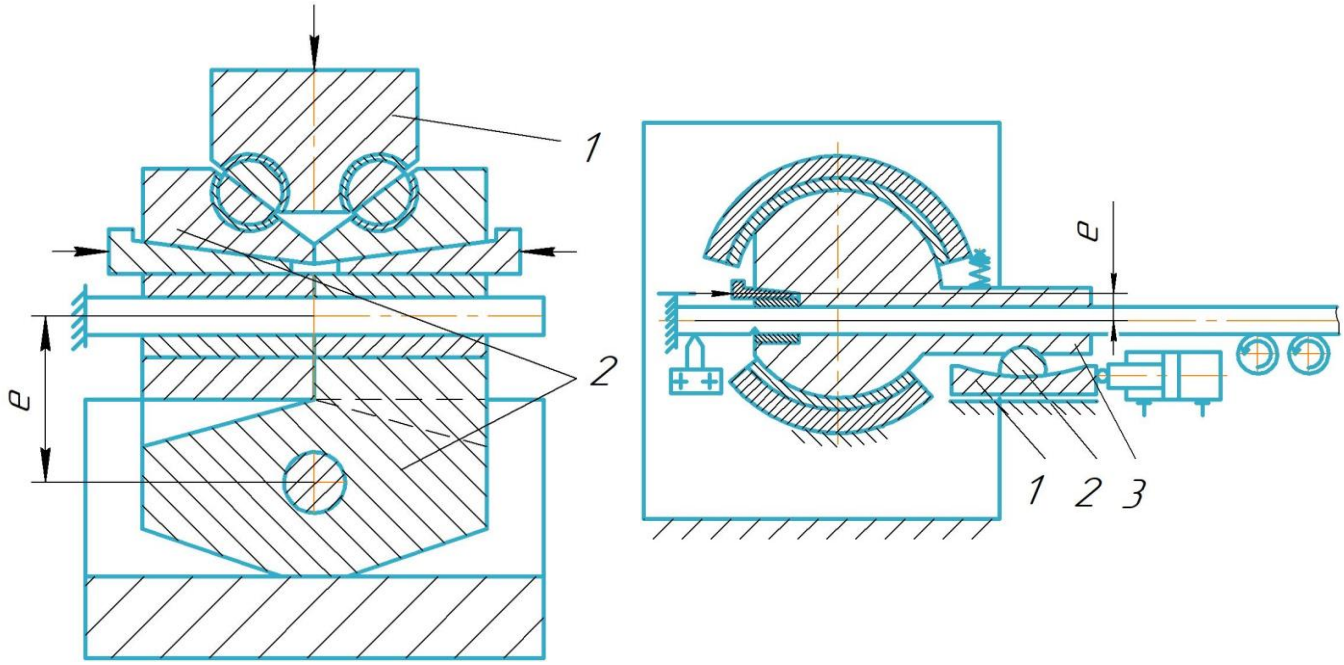
При відрізці «ексцентричним закручуванням» заготовка, що відрізається, здійснює круговий рух навколо осі, зміщеної відносно осі труби на певну відстань, яка називається ексцентриситетом $e$, величина якого не перевищує величини радіуса прокату $r$. Даний спосіб відрізки є сполученим комбінованим процесом: відрізки зсувом і кручення. Він поєднує позитивні сторони обох процесів. При цьому, площа поверхні розрізки ділиться на дві зони: зону чистого кручення й зону зсуву частин трубного прокату по дузі. Питома частка зазначених зон залежить від величини ексцентриситету $e$. При $e = 0$ має місце чисте кручення, при $0 < e < r$ – «ексцентричне закручування», при $e \geq r$ – відрізка по дузі, а при $e = \infty$ маємо відрізку еквівалентну поступальному переміщенню частин трубного прокату [228].

Також в дисертаційній роботі запропоновані і досліджені способи розділення сортового і трубного прокату, в яких нанесення концентратора напружень здійснюється механічним способом (3.11) за один робочий хід (3.19) за рахунок енергії розвантаження преса, яка вивільняється в момент розділення заготовки. Розглянуто два варіанти нанесення концентратора напружень:

- за рахунок вдавлення клина (5.3) трикутної форми (3.14);
- зсувом частини прокату відносно профілю (5.5),

як з боку інструмента (3.15), так і з боку інструмента та опори (3.16).

Перспективним напрямком є створення додаткових напружень розтягання у зоні концентратора напружень при реалізації схем холодної ломки згином (рис. 2.6) [229].




а б

Рис. 2.6 – Конструкції установок для холодної ломки прокату згином

Оскільки основною причиною нестабільності тріщини є близькість її вершини до нейтральної лінії, що рухається перед нею і за якою розташована зона напружень стиску, орієнтованих нормально до площини розділення, то збільшення зони напружень розтягання за рахунок зміщення осі прикладення згинальної сили від осі прокату на величину ексцентриситету $e$, дозволяє стабілізувати траєкторію тріщини та підвищити геометричну точність заготовок.

Запропоновано дві конструктивні схеми пристроїв для реалізації розглянутого вище способу ломки згином. В першій схемі (рис. 2.6, а) прокат з попередньо нанесеним концентратором напружень вводять в отвори ломників 2, що встановлені з можливістю обертального руху відносно нерухомої осі, яка зміщена від осі прокату на величину ексцентриситету $e$ [230]. Після затиску прокату під дією сили приводу бойок 1 рухається вниз передає навантаження на ломники 2, що

обертаються навколо осі і створюють момент згинання прокату. Це призводить до ломки прокату у площині концентратора напружень і відділення заготовки.

В наступній конструкції установки (рис. 2.6, б) [231] прокат з попередньо нанесеним концентратором напружень вводять в отвір ломника 3 до упору і затискають за допомогою механізму затиску. Клин 1 діє на шарнір 2, який повертається навколо своєї осі і передає силу на ломник 3. Ломник 3 обертається навколо своєї осі, здійснюючи згинання і розділення прокату у площині концентратора напружень.

Для реалізації гідродинамічної ломки (3.2, 3.23, див. рис. 2.1) запропоновано ряд конструкцій установок (рис. 2.7). На рис. 2.7, а наведена конструкція гідродинамічного холоднолому для розділення труб на мірні заготовки, який працює у такий спосіб. Труба 2 з попередньо нанесеними концентраторами напружень розміщається в корпусі 1 і ущільнюється за рахунок переміщення грундбукс 7 в осьовому напрямку за допомогою гідроциліндрів 8. В кільцеву порожнину 5 по каналу 9 подається під тиском робоча рідина. Привод ударної дії наносить удар по плунжеру 3, який розганяється і створює гідродинамічний тиск у кільцевій порожнині 5, що охоплює зовнішню поверхню труби 2. При цьому у стінці труби створюється пружно-напружений стан та виникають напруження розтягання. Коли величина напруження досягає границі міцності $\sigma_B$ – труба розділяється [232, 233].

Одночасне навантаження труби гідродинамічним тиском із зовнішньої і внутрішньої поверхонь та повздовжньою ударною силою дозволяє реалізувати складний напружений стан у зоні концентратора напружень, який ускладнює пластичну деформацію та забезпечує високу геометричну точність заготовок (рис. 2.7, б – г).

При цьому створення гідродинамічного тиску забезпечує зростання тріщин одразу із кількох міст по всьому периметру концентратора напружень. Зменшується величина тиску рідини для ломки труби. Крім того, рідина діє на концентратори напружень, що нанесені на зовнішній поверхні, і створює додаткове розклинювання.

Труба 1 з попередньо нанесеними множинними концентраторами напружень 2 розміщається у робочій камері (див. рис. 2.7, б) [234].

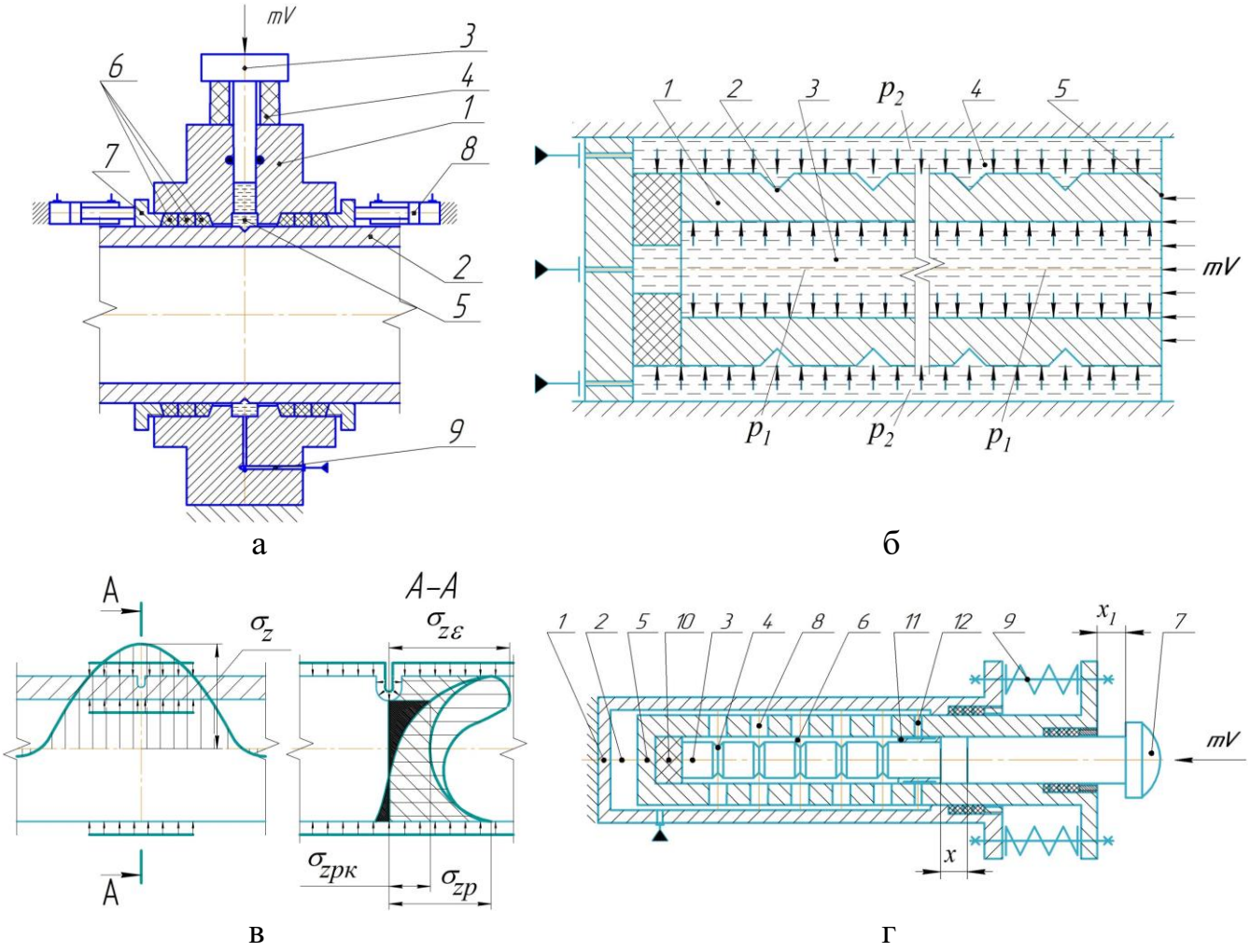


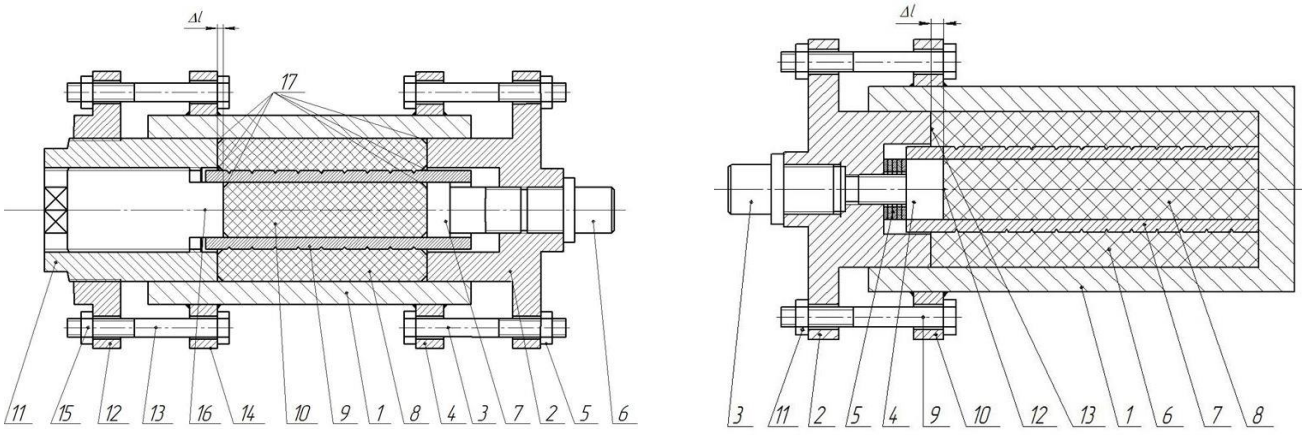

Рис. 2.7 – Установки для розділення труб на мірні заготовки гідродинамічною ломкою, епюра осьових напружень розтягання та розподіл осьових напружень у площині розділення [232 – 236]

До внутрішньої 3 і зовнішньої 4 поверхонь труби 1 подають рідину під тиском. Після цього на одному з торців 5 збуджують ударну хвилю стиску. Під дією ударного імпульсу сили $(m \cdot V)$ труба 1 переміщується в робочій камері і створює гідродинамічний тиск на внутрішній 3 і зовнішній 4 поверхнях труби 1. Спільний вплив на заготовку гідродинамічного тиску і поздовжньої хвилі стиску дозволяє знизити приблизно на $(20…30)\%$ величину тиску в робочій камері, спростити конструкцію вузлів ущільнення, що позитивно позначається на надійності роботи установки.

Для виключення деформації стінки труби необхідно щоб питоме навантаження, що діє на трубу з внутрішньої порожнини було більше питомого навантаження із зовнішнього боку труби $(p_1 > p_2)$. Епюра осьових напружень

розтягання та розподіл осьових напружень у площині розділення (переріз А-А) представлені на рис. 2.7, в. У площині розділення труби (переріз А-А) виникають стискаючі тангенціальні, радіальні і осьові напруження $\sigma_z$. Осьові напруження $\sigma_{z\varepsilon}$, які сприяють зародженню тріщини у площині розділення, складаються із: напружень розклинювання $\sigma_{z\text{рк}}$, які виникають під дією робочої рідини високого тиску у зоні концентратора напружень; напружень розділення $\sigma_{z\text{р}}$ стінок труби від питомого навантаження, прикладеного з боку зовнішньої і внутрішньої поверхонь труби. Удосконалена конструктивна схема установки для розділення способом гідродинамічної ломки представлена на рис. 2.7, г. Вона дозволяє розділяти не тільки трубний, а й сортовий прокат, здійснюючи одночасне множинне розділення прокату на мірні заготовки.

Альтернативою рідині, яку складно герметизувати у робочій порожнині розділення, може бути пружне тіло (3.22), наприклад гума, поліуретан тощо (рис. 2.8).




а б

Рис. 2.8 – Установки для розділення труб на мірні заготовки [235, 236]

Запропоновані установки не потребують герметизації порожнини високого тиску, що значно спрощує їх конструкцію. При цьому використання в якості робочого тіла гуми дозволяє забезпечити рівномірне навантаження по периметру заготовки та виключити металевий контакт інструмента із трубою. В результаті чого маємо менші контактні напруження та мінімальний рівень пластичної деформації

заготовок при забезпеченні їх високої геометричної точності. При цьому за один цикл роботи машини здійснюється множинне розділення труби на визначену кількість заготовок, що підвищує продуктивність процесу розділення.

На рис. 2.9 представлена конструкція установки, в якій реалізована схема відрізки зсувом із зустрічним напрямком руху інструмента. Трубний прокат 1 затискається у патроні 2 металорізального верстату за допомогою затискних піввтулок 3. Відрізний ролик 4 і контрролик 5 уводяться в контакт відповідно із внутрішньою й зовнішньою поверхнями труби 1. Патрон 2 верстата разом з трубою 1 приводиться в обертання. Одночасно здійснюється подача відрізного 4 і контрролика 5 на врізання до повного відділення трубчастої заготовки. Відрізка відбувається локально по периметру трубчастої заготовки, що забезпечує зниження сили відрізки. З огляду на те, що трубчаста заготовка спочатку зсувається відрізним роликом у напрямку від осі труби, а потім контрроликом у протилежну сторону до центра заготовки, то у цьому випадку проявляється ефект Баушингера [206].

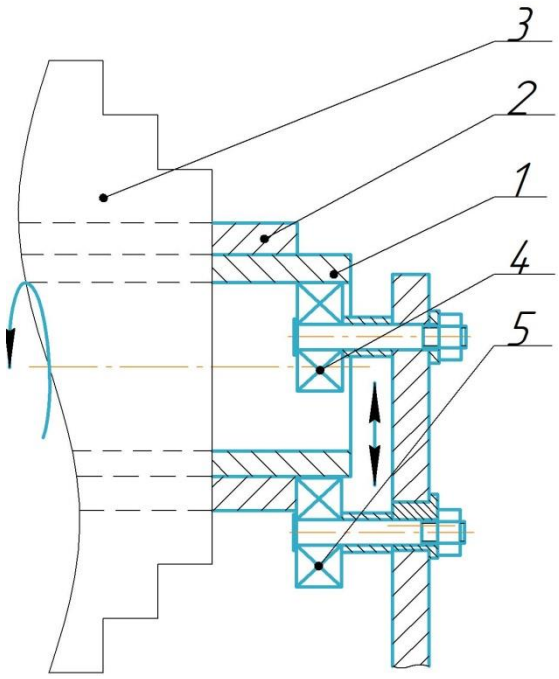



Рис. 2.9 – Установка для відрізки трубчастих заготовок

При цьому зменшуються енергосилові параметри процесу відрізки і підвищується геометрична точність заготовок.

## 2.2 Класифікація компактних виконавчих механізмів для реалізації способів безвідходного розділення сортового і трубного прокату

Як було зазначено у розділі 1, перспективним напрямком підвищення ефективності використання механічного обладнання для безвідходного розділення сортового і трубного прокату є застосування компактних виконавчих механізмів пресів.

Для класифікації компактних виконавчих механізмів кривошипних пресів розроблений граф (рис. 2.10). При складанні графа спиралися на відомі класифікації виконавчих механізмів, розроблені Є. М. Ланським, О. М. Банкетовим і В. І. Власовим [101, 102, 237 – 241]. Використання графа дозволяє систематизувати інформацію не тільки про відомі, але й можливі варіанти структурних схем. На схемах вхідна ланка позначена цифрою 1, вихідна ланка – 3.

Вузли графа, що допускають різноманітні розв'язки позначені зафарбованим колом, а одноваріантні – незафарбованим.

Першою ознакою систематизації є тип компактного виконавчого механізму (1.1): короткошатунний (2.1), клиношарнірний (2.2) та коротколанковий (2.3).

За розташуванням у просторі (1.2) компактні виконавчі механізми можуть бути плоскими (2.4) і просторовими (2.5) – з опорною поверхнею у вигляді півсфери, що дозволяє збільшити жорсткість за рахунок збільшення площі опори.

За напрямом руху (3.1) компактний виконавчий механізм може бути розташований горизонтально (4.1), вертикально (4.2) або під певним кутом нахилу.

За структурною ознакою компактні виконавчі механізми діляться на механізми з нижчими кінематичними парами – важільні (2.7), з вищими кінематичними парами – кулачкові (2.6) і змішаного типу (2.8).

Кулачкові механізми (2.6) відрізняються від важільних наявністю вищої пари в зчленуванні й змінністю радіуса кривошипа. Більш складним є механізм змішаного типу (2.8), у якому скомбіновані кулачок і важільний зв'язок.

Як правило, виконавчі механізми кривошипних пресів є важільними механізмами (2.7). При цьому вони найбільш вивчені.

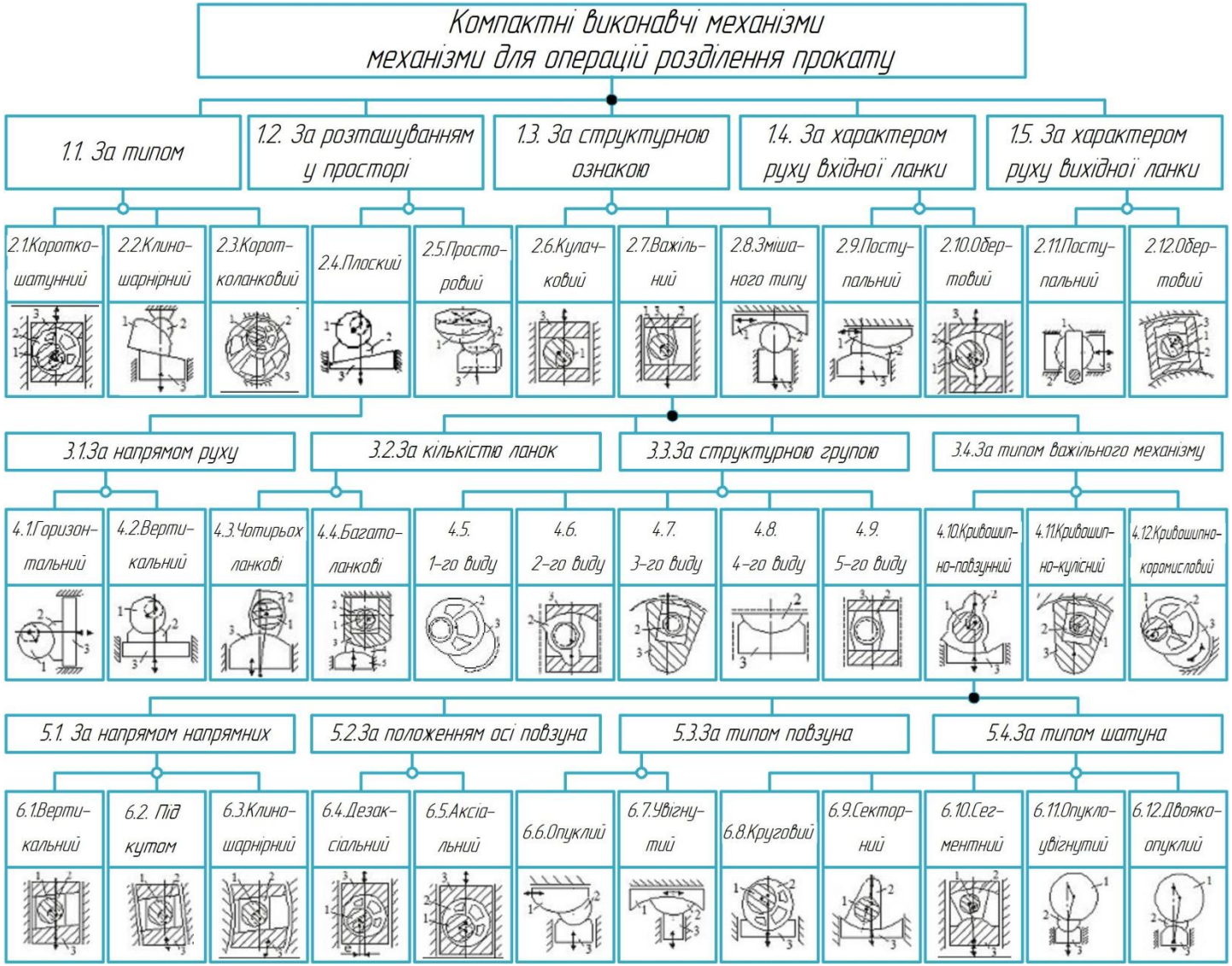



Рис. 2.10 – Граф компактних виконавчих механізмів механічних пресів для операцій безвідходного розділення сортового і трубного прокату

Важільні механізми можна розділити на групи за кількістю ланок (3.2): чотирьох ланкові (4.3) і багатоланкові (4.4). До групи чотирьохланкових механізмів відносяться механізми, застосовувані в тих випадках, коли особливих вимог до кінематичних параметрів не пред'являється. Перевагами таких механізмів є компактність і простота [102].

Залежно від характеру руху (1.5) вихідної ланки компактні виконавчі механізми можна розділити на кривошипно-повзунні (4.10) з повзуном, що рухається поступально (2.11), кривошипно-кулісні (4.11) і кривошипно-коромислові (4.12), у яких вихідна ланка робить коливальний (обертовий) рух (2.12) [102].

Як і будь-який плоский важільний механізм другого класу, компактні виконавчі механізми можуть бути утворені шляхом нашарування на первинний механізм груп Ассура п'яти видів (4.5 – 4.9), утворюючи чотирьохланковий механізм із однією структурною групою (4.3) або багатоланковий із двома й більш групами (4.4) [102].

Найбільше поширення в якості головного виконавчого механізму в більшості пресів для операцій розділення, знайшов кривошипно-повзунний механізм (4.10) [102].

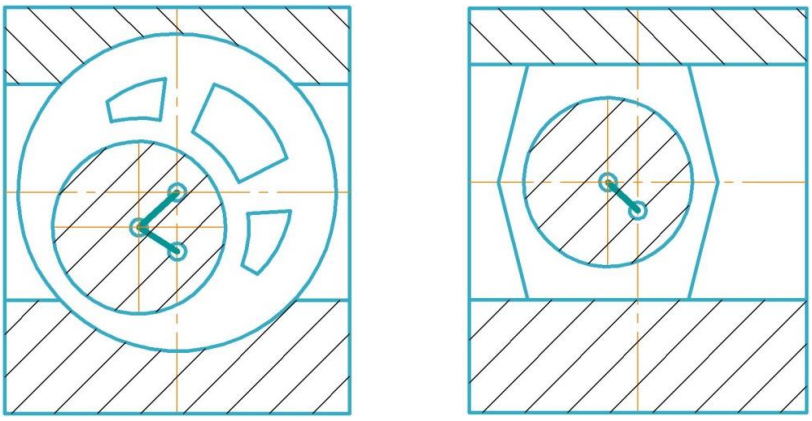
Кривошипно-коромисловий механізм (4.12) з рухом виконавчого органа по дузі застосовують у виконавчих механізмах листових і сортових ножиців середніх розмірів [102].

Із короткошатунних механізмів (2.1) найбільш доцільним є застосування кривошипно-кругового механізму (рис. 2.11, а) або кривошипно-кулісного механізму (рис. 2.11, б).

Порівняння параметрів пресів із кривошипно-круговим виконавчим механізмом і сортових ножиць із традиційним виконанням кривошипно-повзунного механізму, показує, що комплекс спеціальних конструктивних рішень дозволив, не змінюючи масу, в (2,2…3,0) рази збільшити жорсткість пресів, суттєво зменшити габаритні розміри, поліпшити енергетичні показники.

Преси із кривошипно-круговими механізмами більше інших пристосовані для гасіння динамічних навантажень завдяки комбінації найвищої, у порівнянні з усіма

існуючими конструкціями, жорсткості з найбільшою площею контакту опор ковзання. Це, по суті, єдині преси, що забезпечують при виконанні операцій розділення рівень шуму в припустимих границях без яких-небудь захисних екранів і інших пристосувань. Кривошипно-круговий механізм більш технологічний у виготовленні та має коефіцієнт корисної дії на 15% більше, ніж кривошипно-кулісний механізм.



а б

Рис. 2.11 – Компактні головні виконавчі механізми [102]

На підставі висновків, виконаних у розділі 1, перспективним напрямком розвитку компактних виконавчих механізмів є застосування клиношарнірних механізмів (2.2, див. рис. 2.10), що мають форму опорної поверхні змінної клиновидності [242 – 245]. Для них характерна наявність між клином і повзуном, додаткової ланки – шарніра, а також те, що вони, на відміну від звичайних клинових механізмів, забезпечують змінне співвідношення між приводним і виконавчим зусиллями.

Для вибору раціональної схеми розділення трубного прокату і забезпечення необхідної кінематики руху ножів при відрізці «ексцентричним закручуванням» перспективними є наступні конструктивні схеми механізмів (рис. 2.12). Прийняті позначення: 1 – кривошип; 2 – шатун або куліса; 3 – повзун; 4 – кулісний камінь.

У кривошипно-повзунному механізмі (див. рис. 2.12, а) [246] виконано круговий паз $A/$. У ньому розміщено кривошип 1 у вигляді вкладиша $B$, у якості якого може бути використаний відрізний інструмент (ніж, ролик).

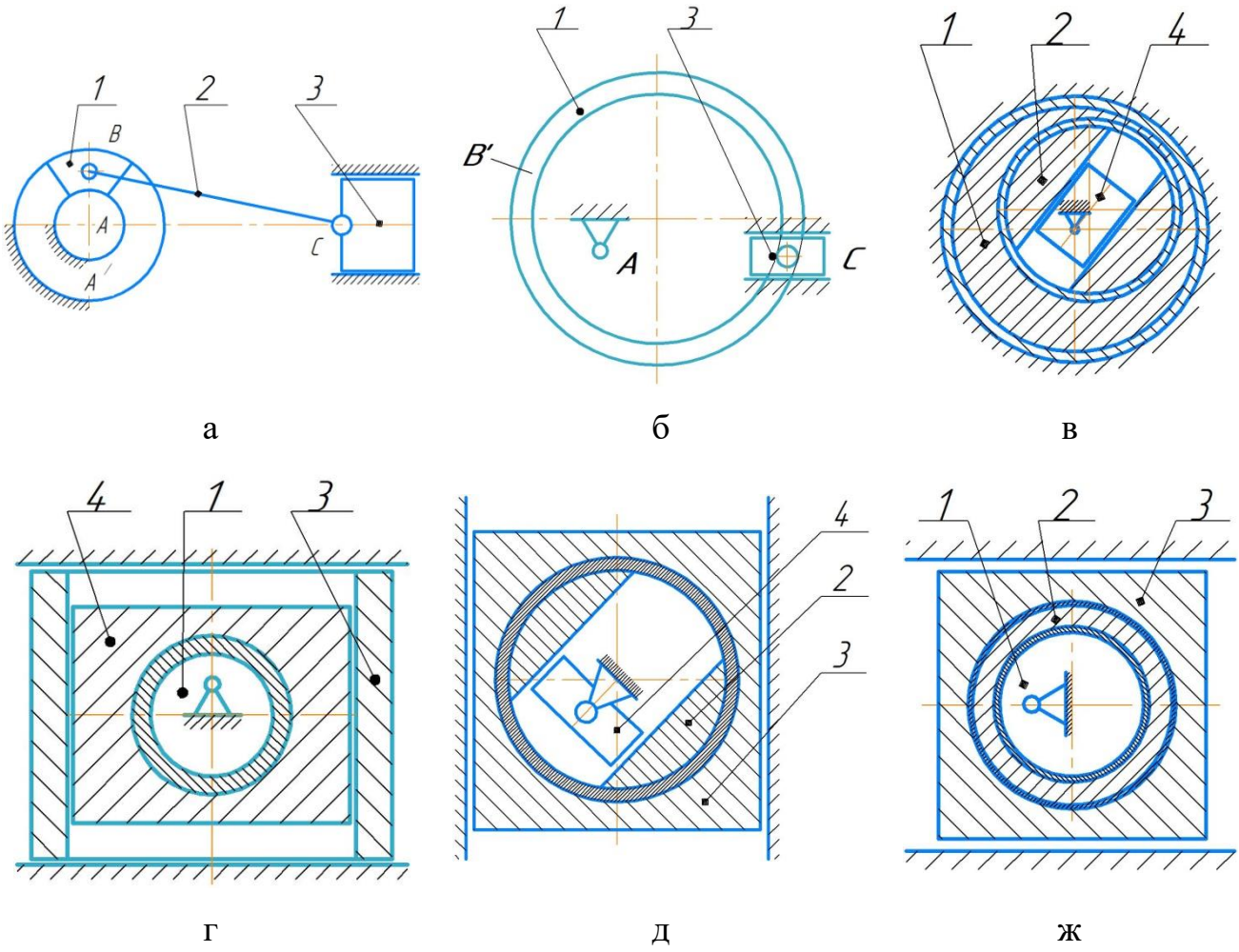



Рис. 2.12 – Конструктивні схеми механізмів для розділення трубного прокату

У механізмі (див. рис. 2.12, б) [246] кривошип виконаний у вигляді ексцентрика із круговим пазом $B/$, який взаємодіє з сполученим вузлом «шатун + шарнір $C$». Така конструктивна схема механізму також дозволяє забезпечити задану траєкторію руху відрізного інструмента по периметру труби.

Кривошипно-кулісні механізми забезпечують задану кінематику руху різального інструменту при відрізці труби (див. рис. 2.12, в).

Для забезпечення багаторазового відносного зсуву частини трубного прокату, що відрізається, у декількох радіальних напрямках можна використовувати синусний механізм (див. рис. 2.12, г), у якому кривошип 1 у вигляді ексцентрика

поміщено усередину кулісного каменя 4. Кулісний камінь 4, у свою чергу, розташований усередині повзуна 3, який є одночасно кулісою [246].

Для цих цілей можна застосувати тангенсний механізм (див. рис. 2.12, д) – різновид кулісного механізму, у якому кулісний камінь 4 поміщено усередину куліси 2, яка, у свою чергу, перебуває усередині повзуна 3 [246].

Найбільш перспективною із розглянутих схем відрізки представляється схема відрізки труб «ексцентричним закручуванням» з використанням кривошипно-кругового механізму (див. рис. 2.12, ж) [247].

На підставі виконаної класифікації компактних виконавчих механізмів для реалізації операцій розділення сортового і трубного прокату можна зробити висновок про те, що найбільш доцільним є застосування компактних виконавчих механізмів: кривошипно-кругового механізму, кривошипно-кулісного механізму, клиношарнірного механізму з увігнутим клином або їх комбінацій.

## 2.3 Методика проведення теоретичних досліджень

На підставі виконаного аналізу відомих критеріїв оцінки ресурсу пластичності, їх переваг і недоліків, можна зробити висновок про те, що вони застосовуються для операцій обробки металів тиском, які супроводжуються значними пластичними деформаціями. Процес руйнування при реалізації безвідходних способів розділення прокату супроводжується незначними пластичними деформаціями. А у ряді випадків, коли розмір зони пластичної деформації малий у порівнянні з довжиною тріщини, руйнування можна вважати квазікрихким. З урахуванням того, що інструментом при реалізації безвідходних способів розділення прокату є тріщина, а вибір способу розділення сортового і трубного прокату є інженерним завданням, яке не повинне вимагати складних розрахунків та експериментів, то для його вирішення доцільним є використання синергетичних критеріїв руйнування, запропонованих В. А. Скудновим [248 – 251].

Поняття «синергія» означає сумуючий ефект, який полягає у тому, що при взаємодії двох або більше факторів їх дія суттєво переважає ефект кожного

окремого компонента у вигляді простої їх суми. Таких критеріїв всього п’ять: «гранична питома енергія деформації» (показник в'язкості металу) – $W_c$, «критерій зародження тріщини» – $K_{\text{зт}}$, «критерій поширення тріщини» – $K_{\text{рт}}$, «критерій крихкості» – $P_{\text{хр}}$ і критерій «масштаб» – $M$.

Найважливішою характеристикою структурно-енергетичного стану полікристала є гранична питома енергія (робота) деформації, витрачена на деформацію одиниці його обсягу до моменту руйнування – $W_c$ (гранична питома енергія деформації). Величину $W_c$ визначали в процесі випробувань циліндричних зразків на розтягання як площу під кривою на діаграмі «дійсне напруження – дійсна деформація» і розраховували за формулою [252]:

$$W_c = 0{,}5 \cdot (\sigma_{\text{т}} + \sigma_{\text{к}}) \cdot \varepsilon^{lim}, \tag{2.3}$$

де $\sigma_{\text{т}}$ – границя текучості;

$\sigma_{\text{к}}$ – дійсний опір руйнуванню, який дорівнює $\sigma_B(1+\delta)$;

$\sigma_B$ – границя міцності;

$\delta$ – відносне подовження;

$\varepsilon^{lim}$ – дійсне звуження площі поперечного перерізу зразка до моменту руйнування, яке дорівнює $ln(1/(1-\psi))$;

$\psi$ – відносне звуження.

Гранична питома енергія – показник в'язкості металу: чим більше питома робота деформації, тим сутужніше руйнування, тобто сутужніше зароджуються й поширюються тріщини. Надалі $W_c$ будемо позначати як «показник в'язкості металу».

До переваг синергетичних критеріїв руйнування можна віднести те, що на відміну від інших показників матеріалу (границі текучості, границі міцності, ударної в'язкості та інших), розрахованих для одного певного типу деформації, гранична питома енергія деформації придатна для навантаження будь-якого типу й служить для визначення інших критеріїв руйнування.

Решта синергетичних критеріїв є похідними від критерію «гранична питома енергія деформації».

«Критерій зародження тріщини» кількісно визначає здатність матеріалу пручатися виникненню тріщин при деформації (чим вище $K_{\text{зт}}$, тим сутужніше в матеріалі зароджуються тріщини) [252]:

$$K_{\text{зт}} = W_C / \sigma_{\text{т}}. \tag{2.4}$$

«Критерій поширення тріщини» кількісно визначає здатність матеріалу пручатися вільному руху тріщин при деформації в умовах досягнення критичного напруженого стану (чим вище $K_{\text{рт}}$, тим сутужніше в матеріалі поширюються тріщини) [252]:

$$K_{\text{рт}} = W_{C\text{кр}} \cdot \sigma_{\text{т}}, \tag{2.5}$$

де $W_{C\text{кр}}$ – критична гранична питома енергія деформації, яка визначається при критичному напруженому стані (тривісному розтяганні), коли енергія деформації, що затрачується на пластичну деформацію, дорівнює енергії, яка витрачається на пружне викривлення об’єму: $W_{C\text{кр}} \cong 0{,}75 \cdot W_C$.

«Критерій крихкості» кількісно оцінює поняття «крихкість» по співвідношенню попередніх критеріїв (чим вище $P_{\text{хр}}$, тим більше «критерій поширення тріщини» перевищує «критерій зародження тріщин» і метал протистоїть крихкості) [252]:

$$P_{\text{хр}} = K_{\text{рт}}^2 / (K_{\text{зт}} \cdot \sigma_{\text{т}}). \tag{2.6}$$

«Масштаб» ураховує взаємозв'язок розмірів зразка й чутливості сталей до руйнування (за характеристиками пружності) [252]:

$$M = e_{xx} / P_{\text{хр}}, \tag{2.7}$$

де $e_{xx} = E \cdot W_{C_{\text{кр}}}^2 / \big((1+\mu)\cdot(1-2\cdot\mu)\big)$;

$E$ – модуль Юнга;

$\mu$ – коефіцієнт Пуассона матеріалу.

Оскільки модулі $E$ й $\mu$ уважаються структурно-нечутливими величинами, то в розрахунках для всіх сталей приймали $E = 2{,}1 \cdot 10^5$МПа, $\mu = 0{,}28$.

Для практичного використання, з метою вибору способу розділення сортового і трубного прокату, необхідно мати мінімальну кількість синергетичних критеріїв руйнування [253, 254]. Для того, щоб обрати найбільш інформативні критерії застосовували методи кластерного аналізу. Такий аналіз призначений для розбивки вихідної множини об'єктів на задане або невідоме число класів – кластерів на підставі деякого критерію, який відповідає наступним вимогам розбивки [255 – 261]:

- усередині кластера об'єкти повинні бути тісно пов'язані між собою;
- об'єкти різних кластерів повинні бути далекими один від одного;
- за інших рівних умов розподіл об'єктів по кластерах повинний бути рівномірним.

Кластеризація об'єктів виконується в багатомірному просторі, складеному із векторів, компоненти яких являють собою параметри об'єктів, що описують їхній стан. Тоді кластером буде група векторів, відстань між якими усередині цієї групи менше, чим відстань до сусідніх груп.

У зв'язку з високою розмірністю завдань кластеризації, одним з найбільш ефективних інструментів для їхнього розв'язку є застосування нейронних мереж, які є універсальним засобом апроксимації функцій [258 – 260].

У цей час існує кілька видів спеціальних нейронних мереж, призначених для розв'язку завдань кластеризації. Найбільше поширення одержали так звані самоорганізовані структури, зокрема, самоорганізовані карти Кохонена [260, 261].

Основними відмінностями самоорганізованих карт Кохонена є:

- кожний нейрон являє собою $n$ – мірний вектор-стовпець $w = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$, де $n$ визначається розмірністю вхідних векторів;

o нейрони розташовуються на двох шарах у вузлах двовимірної сітки (що пов'язано з відображенням просторових структур великої розмірності на площині) із прямокутними або шестикутними гніздами;

o при взаємодії (навчанні), величина якої визначається відстанню між нейронами на карті (для шестикутної сітки відстань між нейронами більше збігається з евклідовою відстанню), на одній ітерації відбувається модифікація не одного нейрона (переможця), а і його сусідів;

o мережа є самонавчальною, бо результат навчання залежить виключно від структури вхідних даних.

Таким чином, самоорганізовані карти Кохонена можна вважати одним з методів проекції багатомірного простору в простір з більш низькою розмірністю (двовимірний), при цьому вектори, схожі у вихідному просторі, опиняються поруч і на отриманій карті [260, 262].

Для зниження трудомісткості й строків реалізації наукових досліджень доцільно застосовувати теоретичні методи аналізу, які засновані на розробці й чисельної реалізації математичних моделей, у достатньому ступені фізичні процеси, що повно відбивають реальні.

В основу теоретичних розробок покладені методи математичного моделювання напружено-деформованого стану зони деформації з використанням методу ліній ковзання.

Для дослідження технологічних процесів безвідходного розділення сортового і трубного прокату застосовано метод скінченних елементів, який має широкі можливості і універсальність. Метод скінченних елементів знайшов широке застосування для вирішення задач аналізу пластичної деформації заготовок, розрахунку напружено-деформованого стану в технологічних завданнях обробки металів тиском [190, 191, 194, 263, 264]. Для теоретичного аналізу напружено-деформованого стану у зоні розділення застосовувався програмний комплекс Deform.

В основу теоретичних досліджень обладнання і оснастки для безвідходного розділення сортового і трубного прокату були покладені аналітичні й

графоаналітичні методи теорії механізмів і машин, методи математичного моделювання, у тому числі з використанням обчислювальної техніки, а також методи статистичного аналізу. Головними напрямками теоретичних досліджень виконавчих механізмів є структурний, кінематичний і динамічний аналізи механізмів з урахуванням їх специфіки. Графоаналітичні методи дослідження кінематичних і силових параметрів плоских механізмів мають достатню для звичайних практичних розрахунків точність і можуть бути застосовані до механізмів будь-якої складності. Принципово будь-яке завдання, яке вирішено графічно, може бути вирішено й аналітично, але в більшості випадків аналітичні рівняння є настільки складними, що практичне їх застосування є досить проблематичним. Однак для дослідження простих механізмів аналітичний шлях цілком придатний. Крім того, аналітичні формули дозволяють з'ясувати вплив окремих параметрів на характер руху виконавчого механізму, установити вид кривих, які описують окремі точки механізму й підібрати розміри механізму за заданими умовами. З метою підтвердження вірогідності отриманих результатів, в окремих випадках розрахунки виконані як з використанням аналітичних, так і графоаналітичних методів.

Розрахунки компактних виконавчих механізмів проведені за структурними групами Ассура, які є геометрично й статично визначеними системами, з визначенням передатних функцій усіх елементів короткошатунних і клиношарнірних механізмів з увігнутим клином: лінійних і кутових координат ланок, а також їх перших і других похідних за узагальненою координатою [265]. Динамічний розрахунок компактних виконавчих механізмів проведений з використанням рівнянь рівноваги груп Ассура. Для розв'язку отриманих нелінійних, внаслідок необхідності обліку тертя, систем рівнянь рівноваги, використаний метод Ньютона [266].

Для розв’язку диференціальних рівнянь, що описують деформування елементів системи «прес-молот – оснастка – зразок» використовували метод скінченних різниць.

## 2.4 Вибір методів експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження були проведені з метою уточнення вихідних даних для чисельної реалізації математичних моделей і оцінки ступеня їх вірогідності. Також результати експериментальних досліджень були використані для оцінки ефективності запропонованих технічних рішень і розроблених на їхній основі практичних рекомендацій.

Для проведення експериментальних досліджень було використано стандартне і оригінальне обладнання та оснастка (рис. 2.13 – 2.19).

На рис. 2.13 представлені фотографії прес-молота конструкції ДДМА, на якому проведено комплекс експериментальних досліджень щодо статичної, динамічної і статико-динамічної холодної ломки за схемою триточкової ломки та процесів використання енергії розвантаження преса для нанесення концентратора напружень.

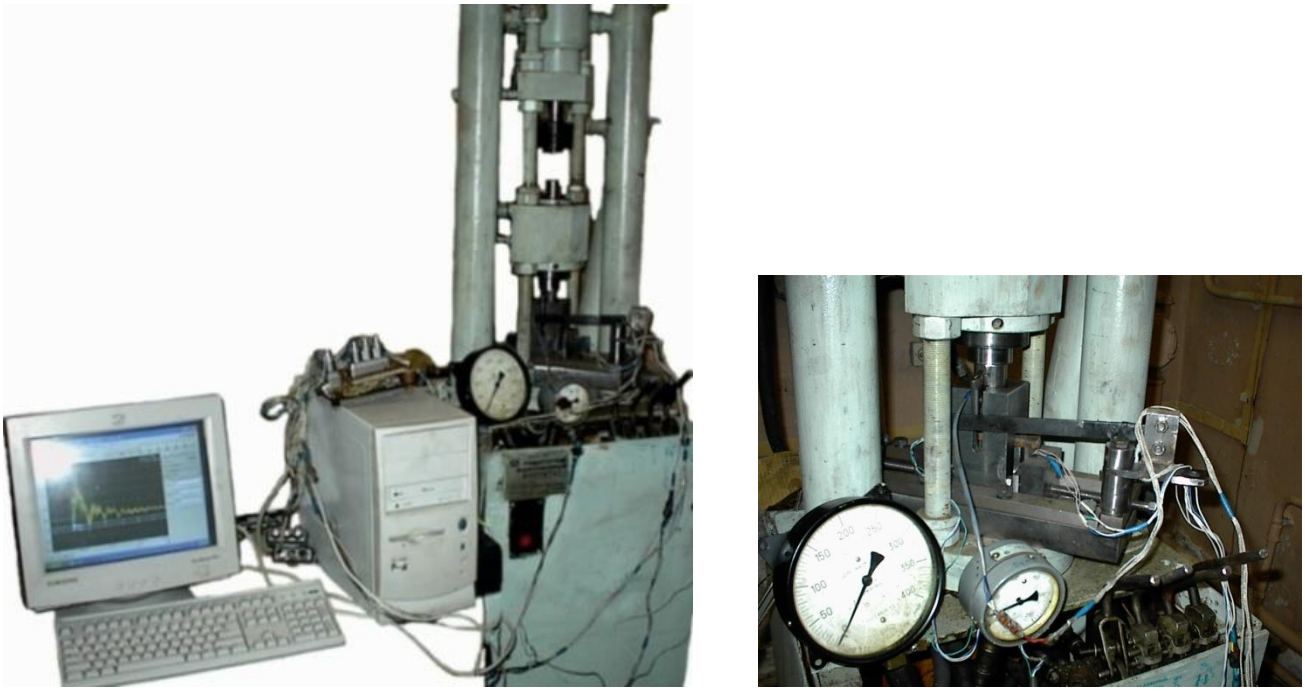


Рис. 2.13 – Фотографії прес-молота конструкції ДДМА

Прес-молот працює у такий спосіб. Динамічне навантаження зразка здійснюється за допомогою гідропружного циліндра, який як акумулятор енергії

використовує заздалегідь стислу рідину. Насосом створюється тиск у робочій камері гідропружного циліндра. При досягненні заданої величини тиску керуюча порожнина відсікається від зливу й з'єднується з нагнітанням. Відбувається розгерметизація керуючої порожнини. Робоча рідина під високим тиском діє на всю площу верхнього торця штока. Шток разом з бабою прискорено рухається вниз. При цьому він навантажує проміжний пуансон та ломник, що установлені по осі гідравлічного циліндра. Під дією ударного навантаження відбувається технологічна операція. Для реалізації режиму статико-динамічного навантаження в конструкції прес-молота передбачений плунжер. Плунжер переміщується під дією високого тиску рідини в гідроциліндрі і навантажує торець ломника. При цьому відбувається попереднє статичне деформування зразка в одному напрямку з напрямком його остаточного розділення. Після цього відбувається динамічне (ударне) навантаження зразка до руйнування. Цикл роботи прес-молота відновляється.

На рис. 2.14 представлені фотографії лабораторного ручного гвинтового преса для проведення експерименту щодо визначення граничної деформації зразків за схемою триточкової холодної ломки згином.

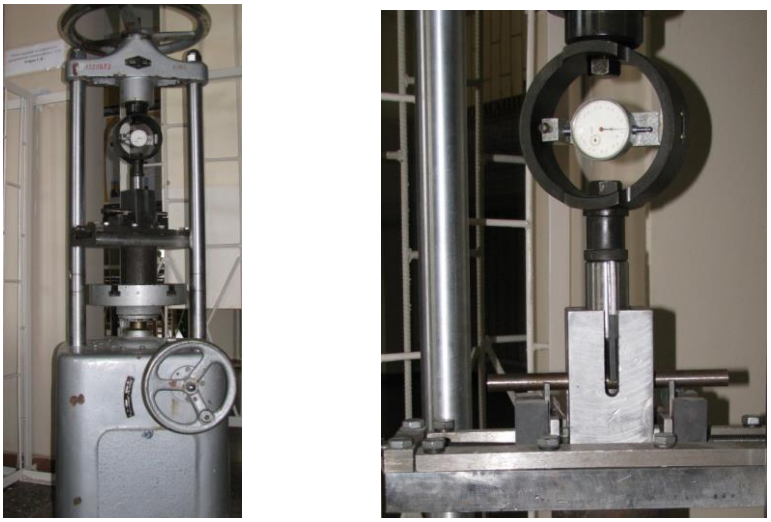
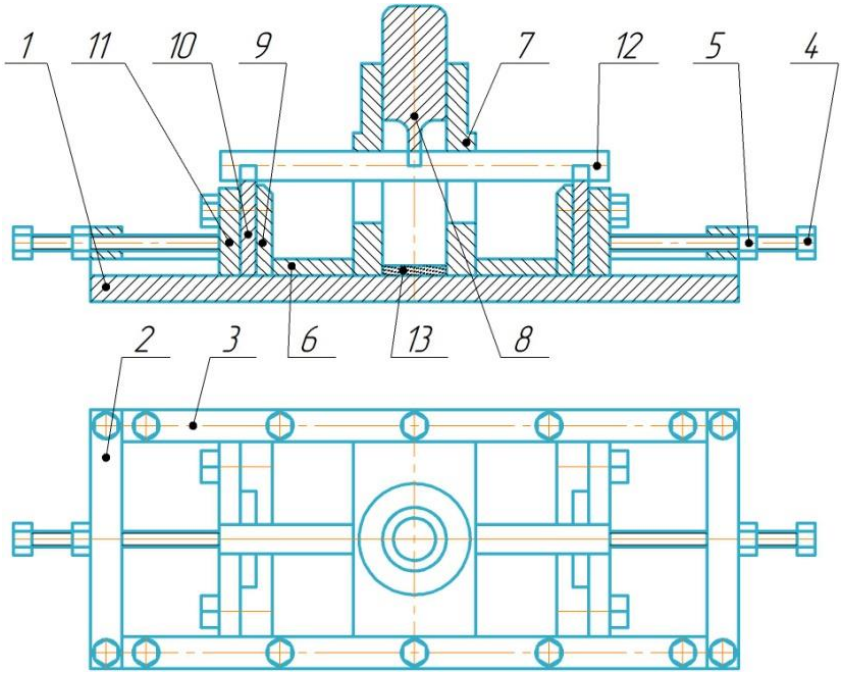


Рис. 2.14 – Фотографії лабораторного ручного гвинтового преса з оснасткою

На рис. 2.15 представлені конструкція і фотографії оригінальної експериментальної установки для проведення експериментальних досліджень щодо

статичної, динамічної і статико-динамічної холодної ломки за схемою триточкової ломки.

Установка складається зі станини 1, у напрямних якої розміщаються вузли ломника й опор, установлених з можливістю зворотно-поступального руху, обмеженого упорами 2 і накладками 3, які кріпляться до станини 1 болтами.




а



б



в

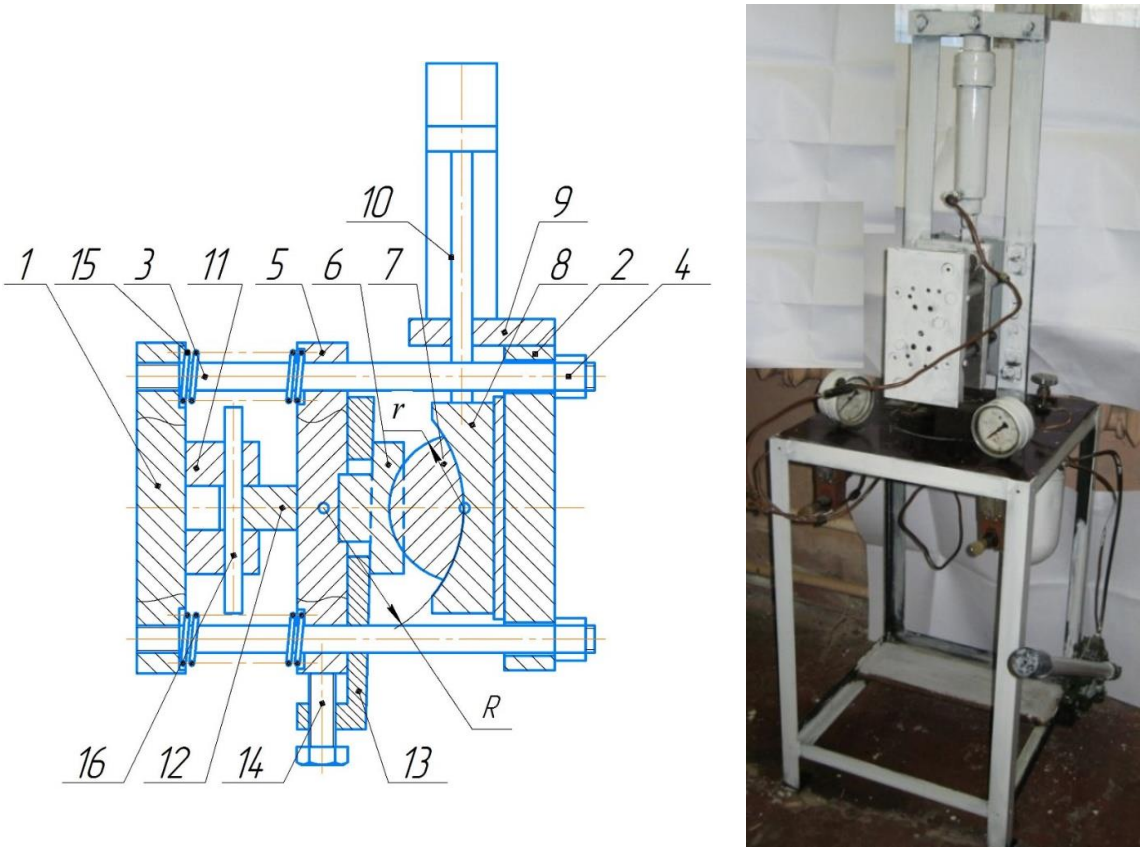
Рис. 2.15 – Конструкція (а) і фотографії (б, в) експериментальної оснастки для ломки прокату

Положення вузлів ломника й опор фіксується за допомогою болтів 4, укручених в упори 2, гайок 5 і проставок 6. Вузол ломника складається з корпуса 7, самого ломника 8, установленого з можливістю зворотно-поступального руху в

напрямних корпуса 7. Вузли опор складаються з корпусів 9 і опорних пластин 10, які втримуються накладками 11 за допомогою болтів із шайбами. Заготовка 12 розміщається симетрично на опорах 10 за схемою триточкової ломки згином. Контроль механізму руйнування зразка здійснюється за допомогою дзеркала 13.

Для проведення експериментів за консольною схемою холодної ломки згином установка додатково комплектується механізмом затиску прокату (рис. 2.15, в).

Для дослідження геометричних, кінематичних і енергосилових параметрів клиношарнірного механізму з увігнутим клином запропонована конструкція установки з клиношарнірним приводом (рис. 2.16).




а б

Рис. 2.16 – Конструкція (а) і фотографія (б) експериментальної установки з клиношарнірним приводом

Установка складається з бічних плит 1, 2, з'єднаних шпильками 3 з гайками 4. На шпильках 3 установлена проміжна плита 5 із закріпленим повзуном 6, у пазу

якого розміщений шарнір 7 з радіусом $r$ обпертий на клин 8, що має увігнуту поверхню з радіусом $R$. На плиті 2 закріплена траверса 9, до якої прикріплений приводний гідроциліндр 10, шток якого впирається в клин 8. На плиту 1 установлені втулкові ножі 11, які контактують плоскими ріжучими гранями з верхнім півтулковим ножем 12, закріпленим на проміжній плиті 5. У пазу повзуна 6 установлений додатковий клин 13 з постійним кутом нахилу, який опирається на плиту 5. Клин 13, який переміщується болтом 14 служить для вибірки зазорів у клиношарнірному механізмі. Між плитами 1 і 5 установлені пружини 15.

Установка працює в такий спосіб. Зразок 16 установлюється у втулкових ножах 11. Болтом 14 переміщується клин 13, вибираючи зазори й пружно деформуючи деталі, які утворюють силовий ланцюг установки: плити, повзун, шарнір, клин, шпильки. Після цього подається тиск у приводний циліндр 10, шток якого починає переміщувати клин 8. Клин 8 діє на шарнір 7, який повертається й передає рух повзуну 6. Повзун 6 діє на плиту 5 з ножем 12, здійснюючи відрізку заготовки зсувом. Установка повертається у вихідне положення під дією пружин 15.

Для дослідження процесу розділення трубчастих заготовок та зразків з П – подібним профілем використовувалася установка (рис. 2.17), яка складається із корпусу 4, в якому закріплено нерухомий ніж 2, а рухомий ніж 3 у свою чергу закріплений на вихідному валу 5. Зразок 1 розміщається в отворі ножів 2, 3. Вал 5 обертається в підшипниках 6. При цьому вісь обертання вала 5 зміщена щодо осей обертання ножів 2, 3 на величину ексцентриситету $e$.

Установка працює в такий спосіб. При включенні привода рухомий ніж 3 робить обертовий рух щодо своєї осі. При цьому на початковому етапі відрізки зразок 1 заклинюється між ножами 2, 3. Потім відбувається пластичне вдавлення ріжучих крайок ножів 2, 3 у зразок 1 зі створенням концентратора напружень. При цьому відбувається одночасне кручення відрізаємої заготовки в площині концентратора напружень до руйнування. Після здійснення рухомим ножем повного оберту на $360^{\circ}$ осі ріжучих ножів знову збігаються один з одним і цикл роботи повторюється.

Для проведення експерименту по нанесенню концентратора напружень за рахунок вдавлення клинового інструменту розроблена оснастка, конструкція якої представлена на рис. 2.18.

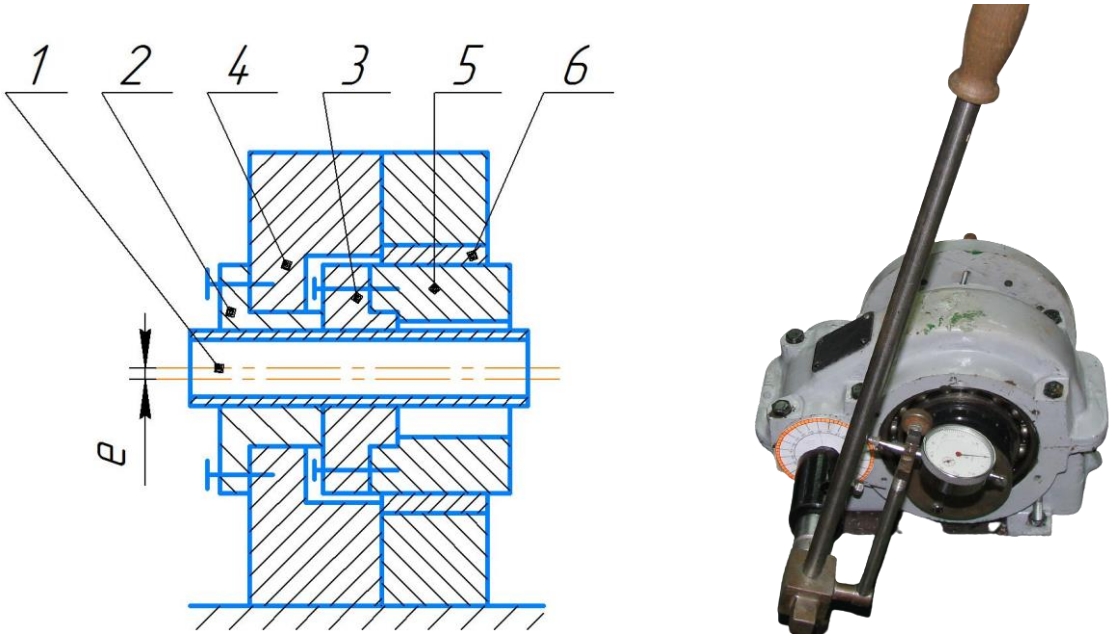
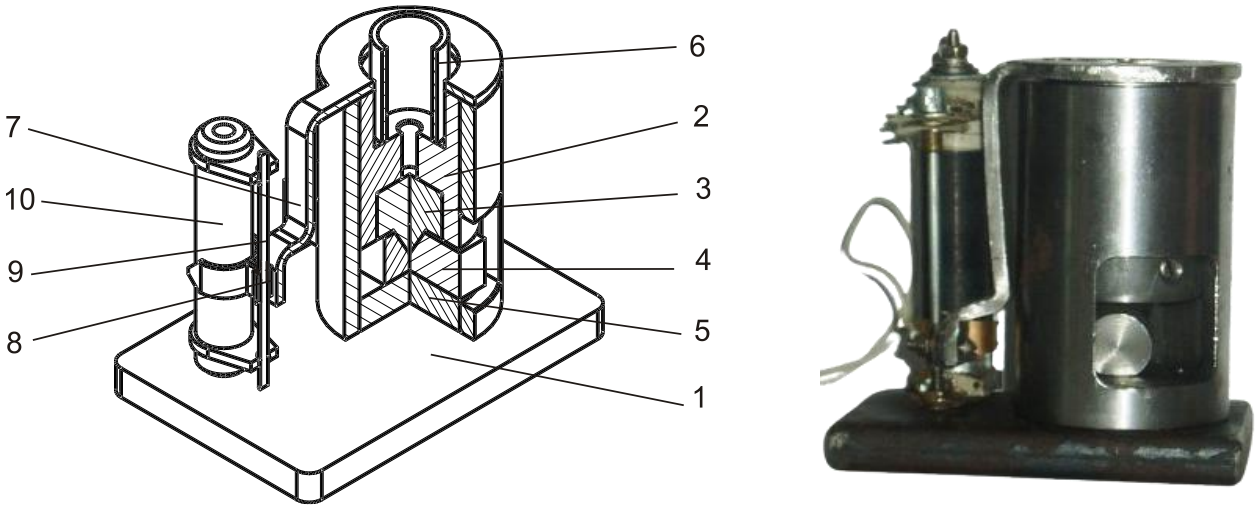



Рис. 2.17 – Конструкція й фотографія експериментальної установки для розділення П – подібних і трубчастих заготовок за схемою «ексцентричного закручування»

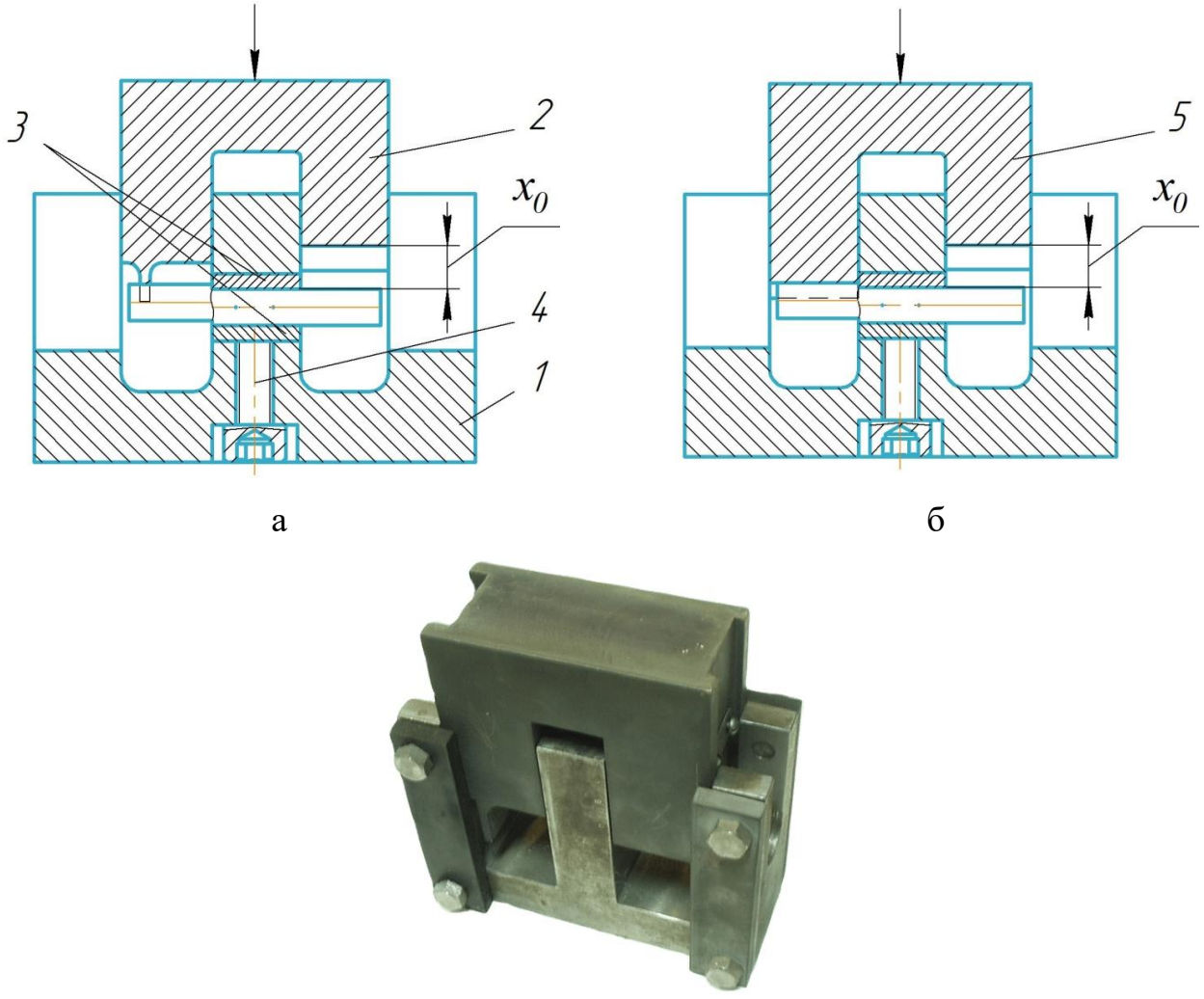



а б

Рис. 2.18 – Конструктивна схема (а) і фотографія (б) експериментальної оснастки для дослідження процесу нанесення концентратора напружень вдавленням клинового інструменту

Оснастка складається зі станини 1, у якій з можливістю зворотно-поступального руху встановлений повзун 2, де закріплюється інструмент 3 клиноподібної форми. У пазах станини розташовується зразок 4, який укладається на опору 5. У глухому отворі повзуна 2 установлена мездоза 6 і до неї, за допомогою важеля 7, жорстко прикріплена повзушка 8 з можливістю зворотно-поступального руху щодо напрямної 9 котушки опору 10 з діаметром дроту 0,08 мм [267].

Для проведення експерименту по розділенню зразків консольною ломкою згином та відрізкою зсувом з нанесенням концентратора напружень за рахунок зсуву частини зразка відносно профілю розроблена експериментальна установка, конструкція якої представлена на рис. 2.19.




а б

в

Рис. 2.19 – Конструктивні схеми експериментальної установки: для консольної ломки (а), для відрізки зсувом (б) і фотографія (в) установки

Конструкція установки (рис. 2.19, а) розроблена для реалізації схеми консольної ломки з попередньо нанесеним концентратором напружень за рахунок зсуву частини зразка відносно профілю для ломки наступної заготовки. Установка складається зі станини 1, у напрямних якої встановлений ніж-ломник 2 з можливістю зворотно-поступального руху. Ніж-ломник 2 має П – подібну форму, з однієї сторони на якому розміщено ломник, а з іншої сторони – ніж, який зміщений відносно ломника на величину $x_0$. Зразок затискається за допомогою затискних піввтулок 3 гвинтом 4.

Установка працює в такий спосіб. Під дією зусилля преса $F$ ніж-ломник 2 рухається вниз, здійснюючи ломку зразка за консольною схемою з попередньо нанесеним концентратором напружень. У момент руйнування зразка система «прес – ніж-ломник – зразок» стає динамічно неврівноваженою. Ніж-ломник 2 розганяється на ході $x_0$ й наносить на зразок концентратор напружень за рахунок зсуву частини зразка відносно профілю для ломки наступної заготовки.

Для відрізки зразка за схемою (див. рис. 2.19, б) зсувом з попередньо нанесеним концентратором напружень установка додатково комплектується ножем 5.

Для проведення експериментальних досліджень застосована методика виміру енергосилових параметрів, заснована на методі тензометрії. У якості датчиків застосовувалися фольгові тензорезистори, включені за півмостовою і мостовою схемами. У якості мездоз використовувалися деталі оснастки (рис. 2.20). Для проведення експериментів використовувалося універсальне обладнання багатоканального збору інформації на базі шини USB (Rev 1.1) – модуль $\mathrm{E}-440$, для введення, висновку й обробки аналогової й цифрової інформації на ПЕОМ. Модуль $\mathrm{E}-440$ має наступні функціональні характеристики:

- сучасний цифровий сигнальний процесор $ADSP-2185M$ фірми Analog Devices, Inc. з тактовою частотою роботи 48 МГц;
- 16 диференціальних каналів або 32 каналу із загальною землею для аналогового введення з можливістю автоматичного коректування нуля;
- максимальна частота роботи $14^{mu}$ бітного АЦП – 400 кГц,

що дозволяє використовувати дане обладнання для дослідження багатьох процесів і ударних зокрема.

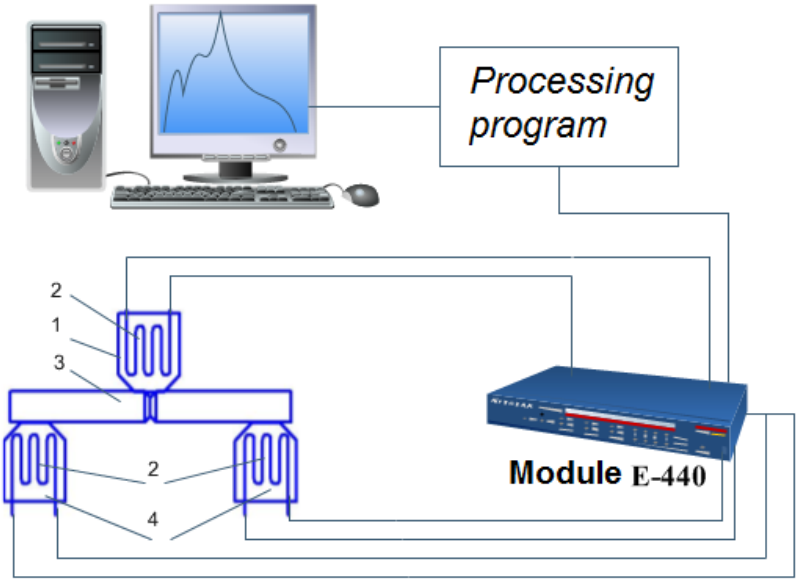



Рис. 2.20 – Схема реєстрації експериментальних даних: 1 – ломник, 2 – тензодатчики, 3 – зразок, 4 – опори

Особливо важливим є можливість одночасного запису відразу декількох каналів (використовувалося до 3 каналів). Реєстрація й обробка результатів вимірів проводилася за допомогою розробленого програмного забезпечення.

В експериментах використовувалися зразки циліндричної форми із сталей з різними механічними властивостями.

Вимір геометричних параметрів, що характеризують геометричну точність заготовок, проводили методом прямого виміру з використанням універсального вимірювального інструмента. Якість поверхні зламу й геометричну точність заготовок досліджували методом макроструктурного аналізу з виміром абсолютних і відносних величин викривлень геометричної форми.

Обробку та аналіз результатів експериментів здійснювали з використанням стандартних методів теорії ймовірності і математичної статистики [268, 269] (Додаток А).

**Висновки до розділу 2.**

1. На підставі розробленої класифікації безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату, засобами комбінаторики виконаний синтез перспективних комбінованих схем навантаження (деформації), які дозволяють підвищити ефективність роботи обладнання та геометричну точність отриманих заготовок. Найбільш перспективні із них досліджені у наступних розділах дисертації: триточкова холодна ломка згином комбінованим статико-динамічним навантаженням; процеси розділення комбінованим навантаженням, який є сполученим процесом відрізки зсувом і кручення; процеси розділення сортового прокату комбінованим навантаженням за рахунок активних зусиль деформування пресом та реактивних зусиль пружної деформації технологічної системи, що дозволяє послідовно за один робочий хід виконувати операції нанесення концентраторів напружень та остаточне розділення; процеси розділення комбінованим навантаженням у штампах з диференційованим затиском прокату.

2. Запропонована класифікації компактних виконавчих механізмів пресів і обґрунтована доцільність використання перспективних механізмів: клиношарнірних, кривошипно-кругових, кривошипно-кулісних та їх комбінацій, які забезпечують найбільш сприятливий силовий і кінематичний режим навантаження при виконанні операцій безвідходного розділення сортового і трубного прокату, що дозволяє зменшити величину енергосилових параметрів розділення та шкідливі наслідки розвантаження преса після зняття технологічного навантаження.

3. Попри наявність відомих рекомендацій щодо вибору того або іншого безвідходного способу розділення прокату, до сих пір не розроблено універсального підходу для реалізації такого вибору. Відомі рекомендації засновані на використанні традиційних механічних характеристик матеріалу: твердість, границя текучості, границя міцності, ударна в’язкість тощо. Однак їх застосування не завжди дозволяє зробити правильний вибір. Тому є нагальна потреба у розробці теоретичних основ обґрунтування методу вибору схеми безвідходного розділення сортового прокату із матеріалів з різними механічними характеристиками. Аналіз сучасних підходів до цього питання із застосуванням критеріїв оцінки використання ресурсу пластичності матеріалів дозволяє зробити висновок про те, що вони застосовуються для операцій

обробки металів тиском, які супроводжуються значними пластичними деформаціями. На відміну від них процес руйнування при реалізації безвідходних способів розділення прокату супроводжується незначними пластичними деформаціями, а у ряді випадків руйнування можна вважати квазікрихким. Зважаючи на те, що інструментом при реалізації безвідходних способів розділення є тріщина, то для таких процесів доцільно застосувати синергетичні критерії руйнування: «критерій граничної питомої енергії деформації», «критерій зародження тріщини», «критерій поширення тріщини», «критерій крихкості» і критерій «масштаб». При цьому поняття «синергія» означає сумуючий ефект, який полягає у тому, що при взаємодії кількох факторів їх дія суттєво переважає ефект кожного окремого компонента.

4. Для практичного використання синергетичних критеріїв руйнування, з метою вибору способу розділення сортового прокату, необхідно мати їх мінімальну кількість. Для того, щоб обрати найбільш інформативні із них застосовували методи кластерного аналізу. У зв'язку з високою розмірністю завдань кластеризації одним з найбільш ефективних інструментів для їхнього розв'язку є застосування нейронних мереж, а саме самоорганізованих карт Кохонена.

5. Обґрунтовано вибір методів і методик для моделювання технологічних режимів процесів розділення сортового і трубного прокату. Метод скінченних елементів дозволяє провести, за допомогою комп'ютерних моделей, імітаційне математичне моделювання для оцінки енергосилових параметрів процесу розділення за перспективними схемами навантаження, прогнозування геометричної точності отриманих заготовок.

6. Розроблено та виготовлено експериментальну оснастку для проведення досліджень технологічних силових і деформаційних режимів на фізичних моделях з варіюванням енергосилових і геометричних параметрів із застосуванням сучасних автоматизованих пристроїв реєстрації результатів вимірювання методом тензометрії.

Основні напрямки досліджень безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату та обладнання для їх реалізації, які розглянуті у даній дисертації, представлені на рис. 2.21.

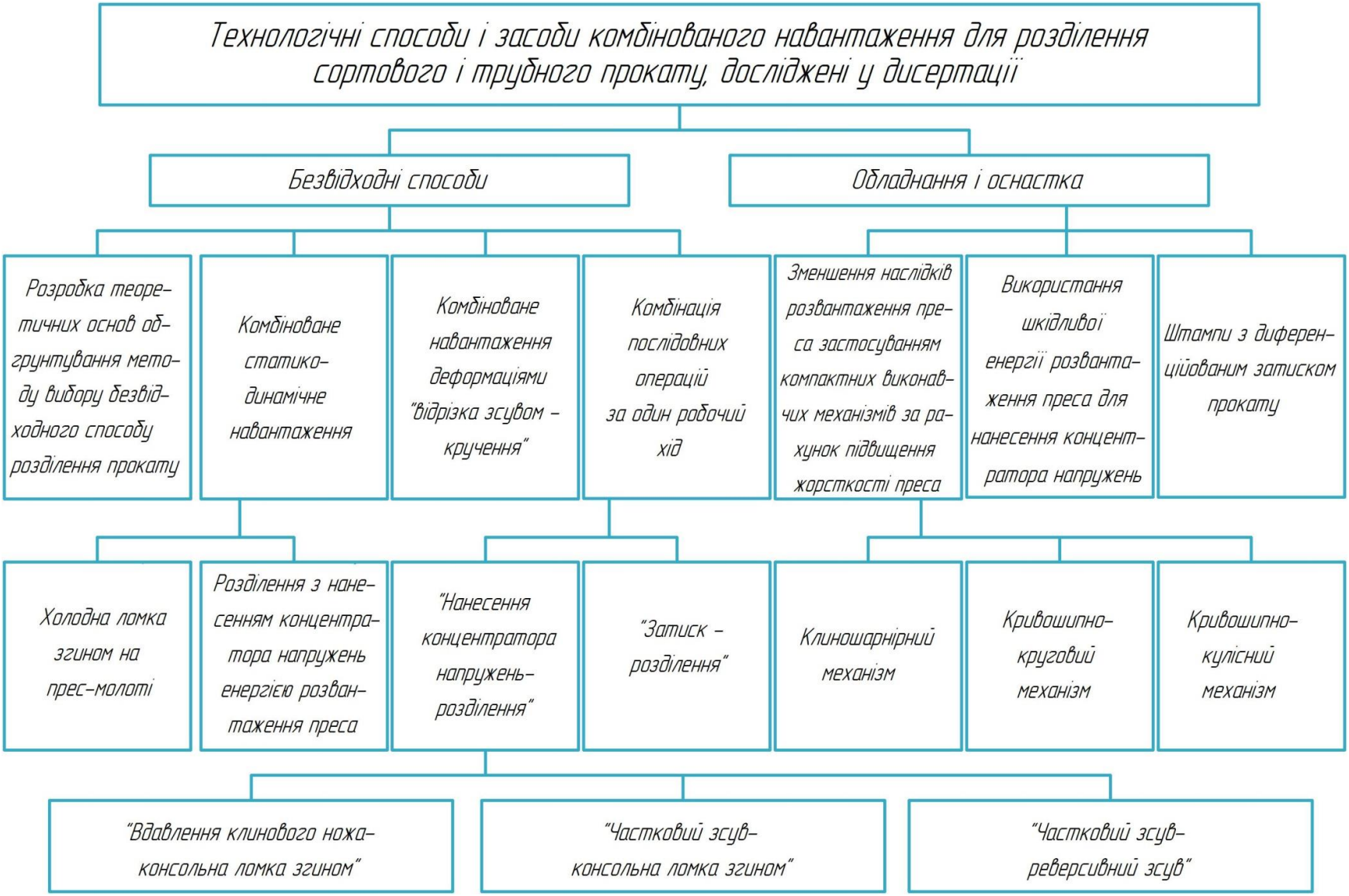



Рис. 2.21 – Основні напрямки досліджень безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату та обладнання для їх реалізації, які розглянуті у дисертації

# РОЗДІЛ 3
# ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ВИБОРУ СПОСОБІВ РОЗДІЛЕННЯ СОРТОВОГО ПРОКАТУ ІЗ МАТЕРІАЛІВ З РІЗНИМИ МЕХАНІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ СИНЕРГЕТИЧНИХ КРИТЕРІЇВ РУЙНУВАННЯ

Складність вибору безвідходного способу розділення сортового прокату для отримання мірних заготовок пов’язана з тим, що прийняття рішень відбувається в умовах багатоваріантного вибору, обмеженого кола рекомендацій, виробничих багатофакторних задач, обмежень матеріальних ресурсів, економічних можливостей, енергетичних ресурсів, наявності кваліфікованих кадрів, транспортних витрат, можливостей кооперації, часу для підготовки виробництва й ін. [270].

На рис. 3.1 представлений алгоритм вибору способу розділення сортового прокату.

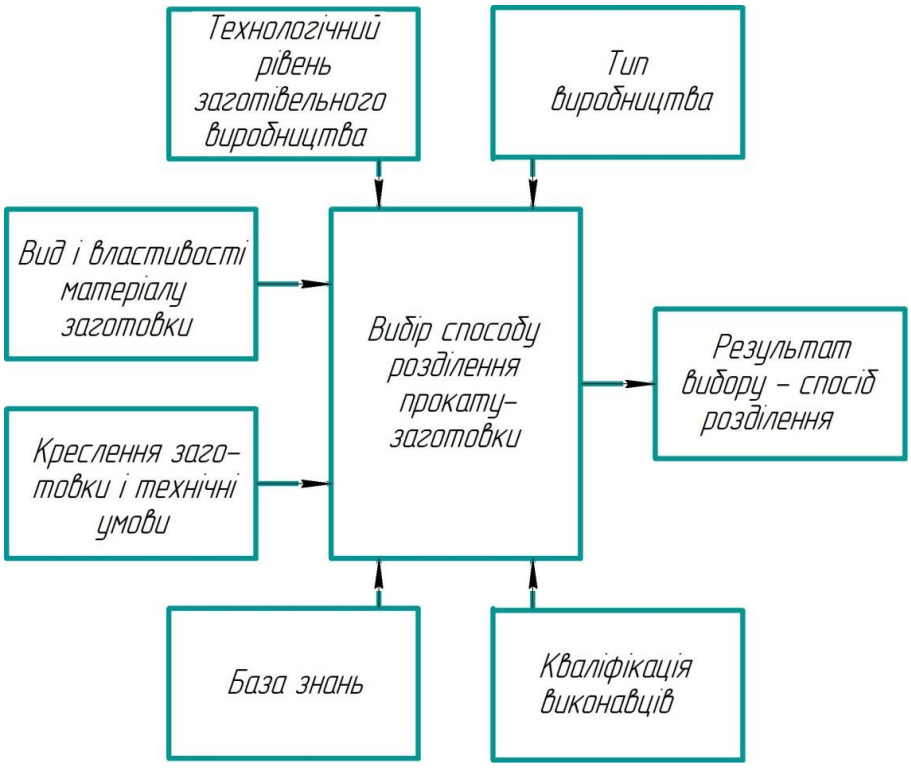



Рис. 3.1 – Алгоритм вибору способу розділення сортового прокату

У розділі 2 обґрунтовано доцільність застосування синергетичних критеріїв руйнування, запропонованих В. А. Скудновим, для раціонального вибору способу розділення сортового прокату у широкому діапазоні розділяємих матеріалів.

Інформативність даних п’яти синергетичних критеріїв руйнування для комплексної оцінки чутливості матеріалу до руйнування, стосовно розділення сортового прокату на мірні заготовки, дотепер не відома [271].

Знаходження найбільш інформативної системи синергетичних критеріїв дозволить вірогідно класифікувати матеріали за їхньою чутливістю до руйнування та свідомо обрати ефективний спосіб розділення сортового прокату із різними фізико-механічними властивостями на заготовки високої геометричної точності при мінімальній собівартості процесу. У табл. 3.1 наведені розрахункові значення синергетичних критеріїв руйнування для сталей з різними механічними властивостями, які можуть бути віднесено до одного із трьох класів: 1 – у «пластичному» стані; 2 – у «пружно-пластичному» стані; 3 – у «крихкому» стані.

Для оцінки здатності синергетичних критеріїв руйнування характеризувати чутливість матеріалу до розділення потрібно визначити інформативність цих критеріїв.

## 3.1 Методика рішення завдання щодо визначення інформативності синергетичних критеріїв руйнування

Завдання раціонального вибору способу розділення сортового прокату може бути вирішено у вигляді таксономічної задачі знаходження в багатомірному просторі ознак (критеріїв) множини мінімальної потужності, що забезпечує класифікацію об'єктів із заданою вірогідністю [255, 262, 272].

Пошук розв'язання такого завдання складається з ітеративної послідовності виконання двох операцій: висування й верифікації гіпотез. Висування гіпотез здійснюється за алгоритмами вибору ознак [256 – 258].

Таблиця 3.1 – Розрахункові значення синергетичних критеріїв руйнування для сталей з різними механічними властивостями

| Кластер | Критерії і їх нумерація / Сталь | $\sigma_T$, МПа | $\sigma_B$, МПа | $\delta$, % | $\psi$, % | $HB$ | $W_c$, МДж/м$^3$ | $K_{зт}$ | $K_{рт} \cdot 10^5$, (МДж/м$^3$)$^2$ | $P_{хр} \cdot 10^8$, (МДж/м$^3$)$^3$ | $M \cdot 10^3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | *8* | *9* | *10* |
| ***1*** | Ст. 3 | 200 | 330 | 33 | 60 | 131 | 293 | 1,5 | 0,43906 | 0,06585954 | 4,851 |
| ***1*** | Сталь 10 | 210 | 340 | 31 | 55 | 143 | 262 | 1,2 | 0,41213 | 0,06491076 | 3,933 |
| ***1*** | Сталь 15 | 230 | 380 | 27 | 55 | 149 | 285 | 1,2 | 0,49078 | 0,08465900 | 3,565 |
| ***1*** | Сталь 20 | 250 | 420 | 25 | 55 | 163 | 309 | 1,2 | 0,58017 | 0,10878108 | 3,282 |
| ***2*** | Сталь 40Х | 324 | 588 | 14 | 50 | 168 | 345 | 1,1 | 0,83739 | 0,20348584 | 2,176 |
| ***2*** | Сталь 40 | 300 | 500 | 21 | 50 | 179 | 314 | 1,0 | 0,70571 | 0,15878486 | 2,310 |
| ***2*** | Сталь 30 | 340 | 580 | 19 | 45 | 187 | 308 | 0,9 | 0,78526 | 0,20024178 | 1,766 |
| ***2*** | Сталь 45 | 360 | 610 | 16 | 40 | 197 | 273 | 0,8 | 0,73623 | 0,19878279 | 1,395 |
| ***3*** | Сталь 60С2А | 1175 | 1270 | 6 | 25 | 269 | 363 | 0,3 | 3,19587 | 2,81636126 | 0,174 |
| ***3*** | Сталь 65Г | 785 | 980 | 8 | 30 | 285 | 329 | 0,4 | 1,93550 | 1,13952545 | 0,354 |
| ***3*** | Сталь ШХ15 | 1030 | 1270 | 8 | 34 | 400 | 499 | 0,5 | 3,85440 | 2,97752095 | 0,312 |
| ***3*** | Сталь У8 | 1230 | 1420 | 10 | 37 | 470 | 645 | 0,5 | 5,95014 | 5,48900309 | 0,283 |

Зокрема, за алгоритмом послідовного додавання ознак, спочатку розглядається одномірний простір $N$ ознак, після цього на підставі ознаки з найкращою оцінкою переходять до розгляду простору $N-1$ ознак і т.д. Верифікація інформативності отриманої множини ознак здійснюється шляхом виконання на їх основі операції класифікації об'єктів і наступного порівняння результату з еталоном.

При цьому найбільшу складність представляє завдання класифікації об'єктів у багатомірному просторі ознак. Дане завдання вирішується методами кластерного аналізу, призначеного для розбивки вихідної множини об'єктів на задане (або невідоме) число класів – кластерів на підставі певних критеріїв.

Кластеризація об'єктів виконується в багатомірному просторі, сформованому з векторів, компоненти яких являють собою параметри об'єктів. Тоді кластером буде група векторів, відстань між якими усередині цієї групи менше, чим відстань до сусідніх груп.

У зв'язку з високою розмірністю завдань кластеризації, одним з найбільш ефективних інструментів, застосовуваних для їхнього розв'язку, є нейронні мережі, що представляють собою універсальний засіб апроксимації [258].

У цей час існує кілька видів спеціальних нейронних мереж, призначених для розв'язку завдань кластеризації. Найбільше поширення отримали самоорганізовані структури, зокрема, самоорганізовані карти Кохонена. Самоорганізовані карти Кохонена можна вважати одним з методів проекції багатомірного простору в простір з більш низькою розмірністю (двовимірний), при цьому вектора, схожі у вихідному просторі, виявляються поруч і на отриманій карті [260]. Узагальнений алгоритм функціонування самоорганізованих карт Кохонена можна представити в наступному вигляді [261].

1. Початкова ініціалізація самоорганізованих карт Кохонена. Задаються: конфігурація сітки (прямокутна або шестикутна), кількість нейронів у мережі, початковий і кінцевий радіуси навчання, початкова й кінцева швидкості навчання, кількість ітерацій навчання. Ініціалізуються вагові коефіцієнти нейронів (малими випадковими величинами, прикладами з навчальної вибірки, лінійно).

2. Пред'явлення самоорганізованим картам Кохонена нового вхідного сигналу. Вхідні сигнали (вектори параметрів) послідовно подаються на вхідний шар мережі, при цьому сигнал може бути в абсолютній або нормованій формі. Бажані вихідні сигнали не визначаються.

3. Обчислення відстані до всіх нейронів мережі. Відстань між векторами, що звичайно обчислюється в евклідовому просторі, є заходом їх схожості. Відстані $d_j$ від вхідного сигналу до кожного $j$ – го нейрона визначаються як:

$$d_j = \sum_{i=0}^{N-1}\left(x_i(t) - w_{ij}(t)\right)^2, \tag{3.1}$$

де $x_i$ – $i$-ий елемент вхідного сигналу на ітерації $t$ (дискретний час),

$w_{ij}(t)$ – вага зв'язку $i$-го елемента вхідного сигналу до $j$ – го нейрона на ітерації $t$.

4. Вибір нейрона з мінімальною відстанню. Визначається нейрон (переможець) $j^*$, для якого відстань $d_j$ найменша, а, отже, він найбільш схожий на вектор входів.

5. Підстроювання ваг нейронів. Проводиться підстроювання ваг для нейрона $j^*$ й усіх нейронів з його зони сусідства. Нові значення ваг визначаються як:

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + h_{ij}(t) \cdot \Big(x_i(t) - w_{ij}(t)\Big), \tag{3.2}$$

де $h_{ij}(t) = h\big(d_j, t\big) \cdot a(t)$ – не зростаюча функція сусідства нейронів, у якій $h\big(d_j, t\big) = e^{d_j^2/(2\cdot r^2(t))}$ – функція відстані, обумовлена у вигляді функції Гауса, у якій $r(t)$ – радіус навчання (як правило функція, що лінійно убуває);

$a(t) = A/(B+t)$ – функція швидкості навчання, у якій $A$ і $B$ – константи, що забезпечують приблизно рівний внесок усіх векторів з навчальної вибірки в результат навчання.

У результаті підстроювання ваг, вектор, що описує нейрон-переможець і вектори, що описують його сусідів у сітці, переміщуються в напрямку вхідного вектора.

6. Перевірка. Здійснюється перевірка закінчення циклу навчання, яка виконується за значенням сумарної корекції ваг нейронів або по числу ітерацій. У випадку закінчення навчання синапатичні ваги вихідного шару самоорганізованих карт Кохонена визначають кластери, крім того, ваги організують так, що топологічно близькі вузли чутливі до схожих вхідних сигналів. А якщо ні, то виконується перехід до наступної ітерації на крок 2.

7. Відображення. Після того, як нейрони розміщені на карті, отримана карта може бути відображена. Самоорганізовані карти Кохонена дозволяють представляти інформацію у двох режимах: безпосереднє відображення кластерів і покомпонентне відображення векторів параметрів.

З наведеного узагальненого алгоритму випливає, що область застосування самоорганізованих карт Кохонена для кластеризації обмежується завданнями, у яких число кластерів заздалегідь відомо. У той же час, фіксоване число кластерів за рахунок досить повільної модифікації ваг робить даний алгоритм у порівнянні з аналогами більш стійким, здатним функціонувати в умовах перешкод і пропуску даних [258].

Ґрунтуючись на даному алгоритмі, було розроблено програмне забезпечення для розв'язку завдань кластерного аналізу. З його допомогою виконано аналіз критеріїв руйнування для заданих видів матеріалів (див. табл. 3.1).

У якості еталона була прийнята кластеризація матеріалів, виконана на підставі методу експертних оцінок з виділенням трьох класів, що відповідає традиційній класифікації матеріалів на ті, які можуть поставлятися в «крихкому», «пружно-пластичному» і «пластичному» станах [273].

У кластер сталей, що перебувають у «пластичному» стані, були об'єднані сталі: Ст. 3, Сталь 10, Сталь 15, Сталь 20.

У кластер сталей, що перебувають у «пружно-пластичному» стані, були об'єднані сталі: Сталь 30, Сталь 40, Сталь 45, Сталь 40Х.

У кластер сталей, що перебувають в «крихкому» стані, були об'єднані сталі: Сталь 65Г, Сталь 60С2А, Сталь У8А, Сталь ШХ15.

Екранна форма розробленої програми представлена на рис. 3.2 [274].

Оцінка інформативності множини кваліфікаційних критеріїв здійснювалася підрахунком кількостей збігів і розбіжностей знайдених об'єктів у заданих кластерах. Кількість ітерацій при побудові самоорганізованих карт Кохонена становило 7000 для кожного обчислювального експерименту, що забезпечувало стійкість класифікації при сумарній корекції, що не перевищує $10^{-5}$. Застосування методу послідовного додавання ознак дало наступні результати.

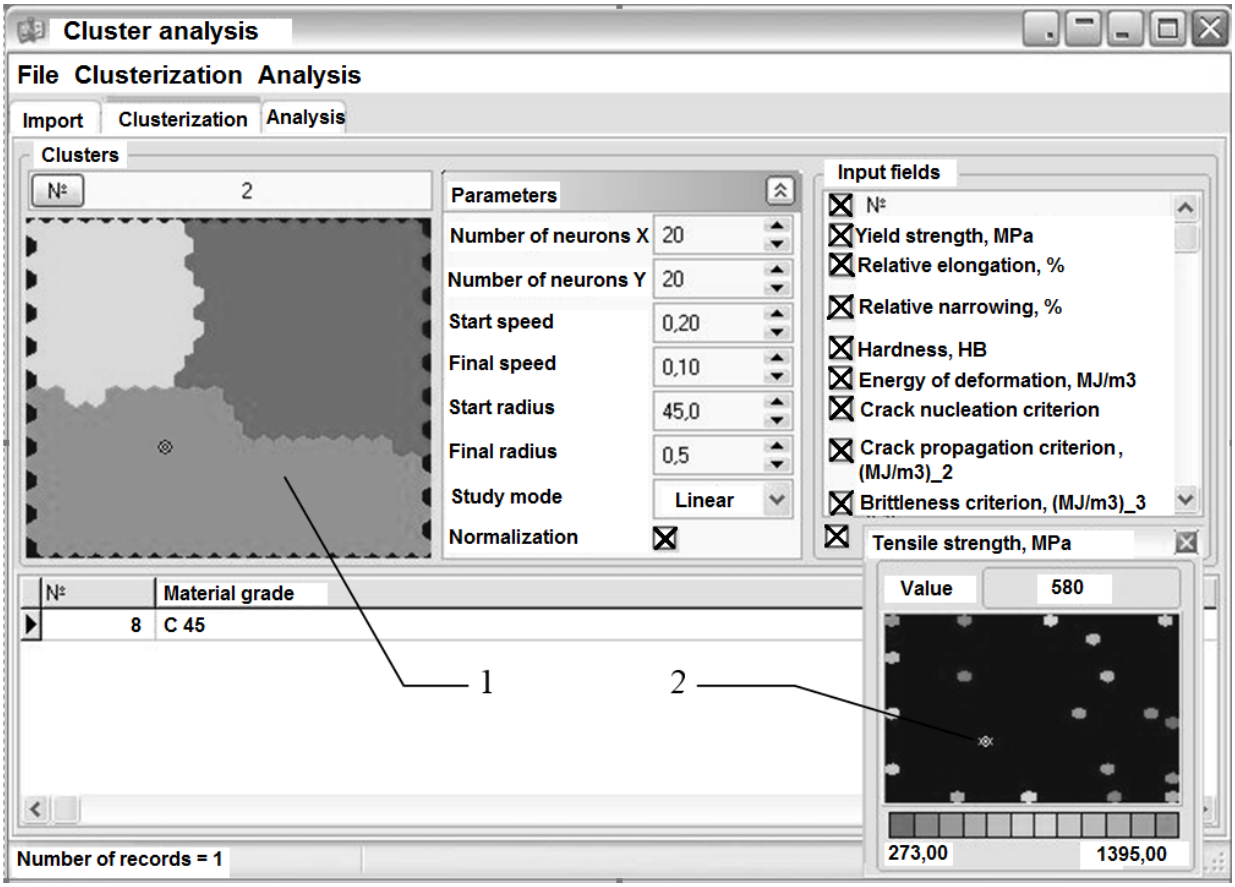



Рис. 3.2 – Екранна форма програми для розв'язку завдання кластерного аналізу з використанням самоорганізованих карт Кохонена: 1 – самоорганізовані карти Кохонена кластерів; 2 – самоорганізовані карти Кохонена параметрів [275]

На першій ітерації було отримано десять множин, які складаються із одного критерія класифікації. Гістограма результатів оцінки їх інформативності наведена на

рис. 3.3. Найбільш інформативним серед усіх є критерій 1 – «границя текучості», серед синергетичних – критерій 10 «масштаб».

На другій ітерації виходять дев'ять множин по два критерії. Гістограма результатів оцінки їх інформативності наведена на рис. 3.4. Найбільш інформативними є множини критеріїв $1-4$ («границя текучості» – «відносне звуження») і $1-9$ («границя текучості» – «критерій крихкості»).

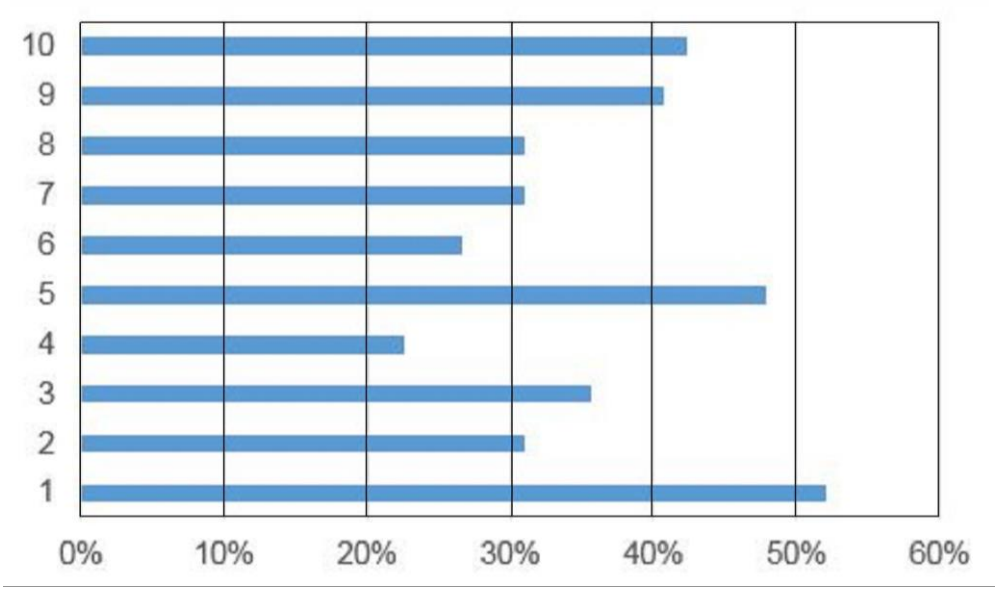



Рис. 3.3 – Гістограма оцінки інформативності кожного критерія [276]

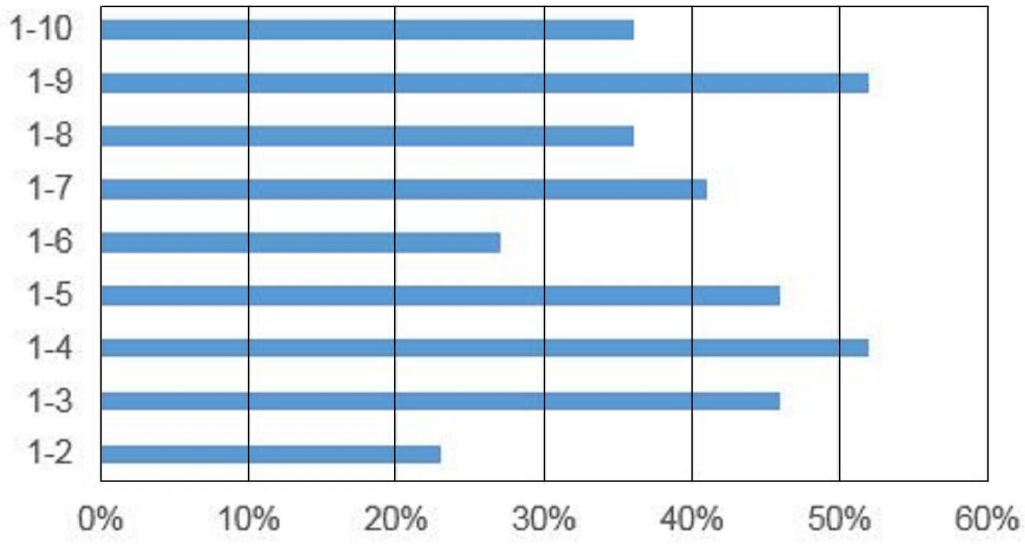



Рис. 3.4 – Гістограма оцінки інформативності пари критеріїв [276]

При рівності оцінок інформативності множин, вибір в якості базової множини критеріїв традиційних механічних властивостей $1-4$ («границя текучості» – «відносне звуження») приводить до одержання на сьомій ітерації множини $1-4-3-5-7-9-8$ («границя текучості» – «відносне звуження» – «відносне подовження» – «твердість» – «критерій зародження тріщини» – «критерій крихкості» – «критерій поширення тріщини»), оцінка інформативності якої рівна 100% (рис. 3.5).

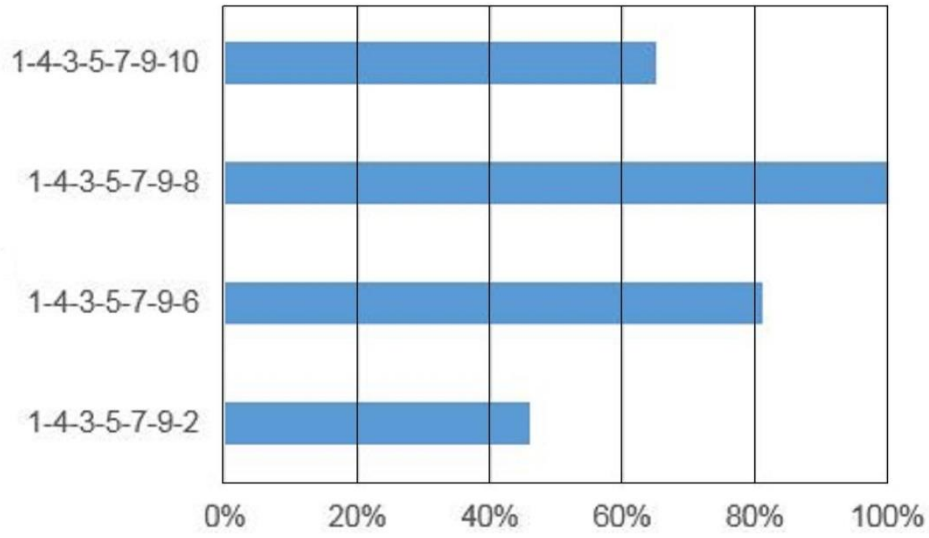



Рис. 3.5 – Гістограма оцінки інформативності множин на базі критеріїв $1-4-3-5-7-9$ [276]

При виборі в якості базової множини критеріїв $1-9$ («границя текучості» – «критерій крихкості») уже на четвертій ітерації одержуємо множину $1-9-6-8$ («границя текучості» – «критерій крихкості» – «показник в'язкості металу» – «критерій поширення тріщини») (рис. 3.6), що забезпечує повну ідентичність отриманих кластерів еталонним.

Застосовуючи алгоритм послідовного видалення ознак, було встановлено, що множину $1-9-6-8$ можна без зниження її інформативності скоротити до виду $9-6-8$. Подальші обчислювальні експерименти показали, що синергетичні критерії $8-9$ («критерій поширення тріщини» – «критерій крихкості») є базовими

інформативними ознаками й при додаванні до них кожного із решти синергетичних критеріїв, вони утворюють шукані інформативні множини мінімальної потужності.

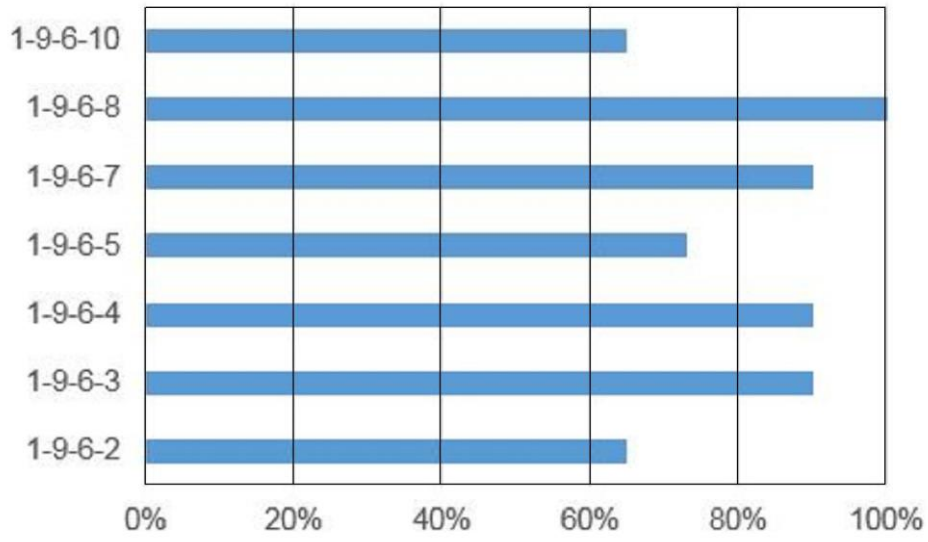



Рис. 3.6 – Гістограма оцінки інформативності множин на базі критеріїв $1-9-6$ [273]

Аналіз отриманих результатів моделювання (див. табл. 3.1) дозволяє розробити рекомендації для віднесення сортового прокату до одного із трьох класів: у «пластичному», у «пружно-пластичному» і у «крихкому» станах відповідно до розрахованих значень критеріїв: $K_{\text{рт}}$ і $P_{\text{хр}}$ (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Результати розрахунків [276]

| Клас сталей | $K_{\text{рт}} \cdot 10^5$, $(\text{МДж}/\text{м}^3)^2$ | $P_{\text{хр}} \cdot 10^8$, $(\text{МДж}/\text{м}^3)^3$ |
|---|---|---|
| У «пластичному» стані | $< 0{,}70$ | $< 0{,}15$ |
| У «пружно-пластичному» стані | $0{,}70 \ldots 2{,}00$ | $0{,}15 \ldots 1{,}00$ |
| У «крихкому» стані | $> 2{,}00$ | $> 1{,}00$ |

Отримані результати (див. табл. 3.1, 3.2) можуть бути представлені у вигляді графіків залежностей синергетичних критеріїв руйнування від твердості матеріалів (рис. 3.7).

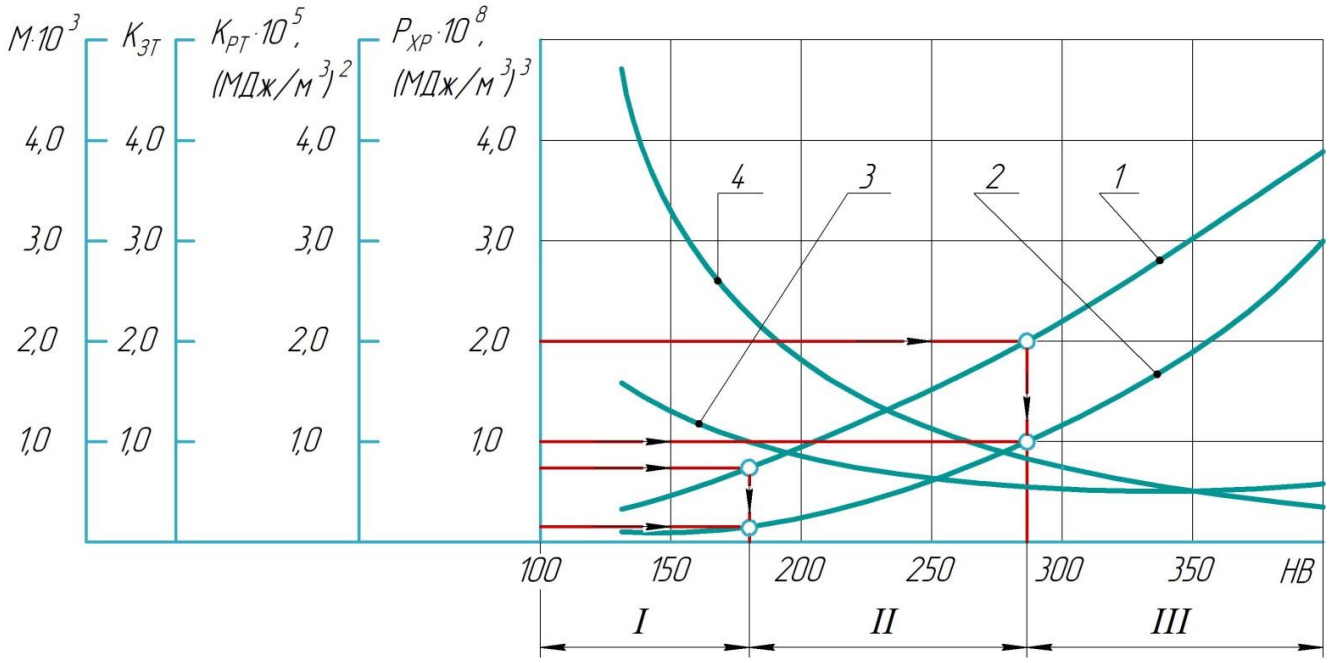



Рис. 3.7 – Графіки залежностей синергетичних критеріїв руйнування від твердості матеріалів: $1 - K_{\text{рт}} = f(HB)$; $2 - P_{\text{хр}} = f(HB)$; $3 - K_{\text{зт}} = f(HB)$; $4 - M = f(HB)$

Вибір параметра «твердість» пов'язаний з тим, що він найбільш часто використовується в якості одного із критеріїв, що визначають здатність прокату до розділення.

Аналіз графіків (див. рис. 3.7) дозволяє зробити наступні висновки.

При значеннях «критерія поширення тріщини» до $0{,}7 \cdot 10^5 (\text{МДж/м}^3)^2$, «критерія крихкості» до $0{,}15 \cdot 10^8 (\text{МДж/м}^3)^3$ сталь можна віднести до матеріалів у «пластичному» стані – $\text{зона}\, I$. Границя зони $I$ відповідає твердості – $(170 \ldots 180)\, HB$. При значеннях «критерія поширення тріщини» – $(0{,}7 \cdot 10^5 \ldots 2{,}0 \cdot 10^5)(\text{МДж/м}^3)^2$, «критерія крихкості» – $(0{,}15 \cdot 10^8 \ldots 1{,}0 \cdot 10^8)(\text{МДж/м}^3)^3$ сталь можно віднести до матеріалів у «пружно-пластичному» стані – $\text{зона}\, II$. Границя зони $II$ відповідає твердості – $(270 \ldots 280)\, HB$. При значеннях «критерія поширення тріщини» більше $2{,}0 \cdot 10^5 (МДж/\text{м}^3)^2$, «критерія крихкості» більше $1{,}0 \cdot 10^8 (\text{МДж/м}^3)^3$ сталь можно віднести до матеріалів у «крихкому» стані – зона $III$ (твердість вище 280 $HB$).

Отримані результати задовільно узгоджуються з рекомендаціями щодо класифікації сталей за твердістю по трьох групах: м'які $HB < 160$, середньої твердості – $(160 \dots 260)$ $HB$ і підвищеної твердості – більше $260$ $HB$ [3].

Треба відмітити, що матеріал Сталь 20 знаходиться на границі зон $I$ і $II$. Тому має ознаки як «пластичних», так і «пружно-пластичних» матеріалів, що і було підтверджено подальшими розрахунками, наведеними у дисертації.

В окремих випадках, залежно від термообробки прокату в стані поставки, умов навантаження (швидкість навантаження, температура) і виду напруженого стану, «крихкі» матеріали здатні поводитися як «пружно-пластичні», або навіть «пластичні», а «пластичні» – як «крихкі». Щоб звести до мінімуму можливі помилки при виборі безвідходного способу розділення, для таких матеріалів потрібна додаткова перевірка [43].

Для перевірки отриманих теоретичних результатів і запропонованих рекомендацій [277 – 279] додатково запропонований експериментальний метод визначення чутливості зразків до руйнування при реалізації процесів розділення сортового прокату.

## 3.2 Метод визначення величин граничних деформацій для вибору способу розділення сортового прокату

При оцінці «схильності до штампування» зразків із сталі основна роль приділяється випробуванням на згинання [277]. Незважаючи на широке застосування, випробування на згинання має істотні недоліки, що знижує ефективність оцінки якості.

Величина кута згину $\alpha^{lim}$, прийнятого в якості характеристики граничної пластичності, не достатньо описує цю характеристику металу, тому що залежить від умов конкретного випробування (радіус оправки, товщина зразка).

Руйнування відбувається при досягненні певної величини деформації розтягування зовнішніх шарів зразка – $\varepsilon^{lim}$. Тому ця величина і вибирається в якості показника граничної пластичності та носить назву граничної деформації.

У роботах [278, 279] запропонована нова методика визначення граничної деформації прокату при згинанні, у якій використовуються зразки особливої конфігурації з «канавкою» на внутрішній (при згинанні) стороні. Однак виготовлення зразків такої форми пов’язане із значними працезатратами. При цьому необхідно враховувати, що із усієї номенклатури сортового прокату, розділення прокату круглого перерізу є найбільш затребуваним. Тому для розв'язку завдання щодо визначення $\varepsilon^{lim}$, з метою ранжирування металу щодо його здатності до розділення на мірні заготовки, використовували зразки круглого перерізу.

Діаметр зразка $D$ повинен відповідати діаметру сортового прокату, довжина – $l \geq 5 \cdot D$. До початку випробування у серединній площині зразку висвердлювали отвір діаметром $d = 2$ мм. Тим самим робоча поверхня по лінії згинання розмічалася вимірювальним колом. У процесі згинання за схемою триточкової холодної ломки згином коло перетворюється в еліпс. Більша вісь еліпса $l_1$, яка перпендикулярна лінії згину, характеризує поздовжню деформацію $\varepsilon_1$ поверхневих шарів зразка. А менша вісь $l_2$, що розташовується по лінії згину – поперечну деформацію $\varepsilon_2$. Зафіксувавши $l_1$, $l_2$ (мм) у момент утворення тріщини, можна розрахувати величини граничних деформацій, які характеризують «чутливість до руйнування» металу зразка:

$$\varepsilon_1^{lim} = ln(l_1/d);$$
$$\varepsilon_2^{lim} = ln(l_2/d). \qquad (3.3)$$

Тим самим, при випробуванні на згинання з достатньою простотою вирішується завдання прогнозування результатів розділення сортового прокату, для якого відомий реальний ступінь деформації.

Даний метод доповнює методику вибору способу розділення сортового прокату на заготовки з використанням синергетичних критеріїв руйнування, і дозволяє звести до мінімуму можливі помилки при виборі способу розділення сортового прокату із матеріалів з різними механічними властивостями. У цілому запропоновані методики дають інженеру ефективний інструмент для вибору раціонального способу розділення сортового прокату на мірні заготовки.

## 3.3 Експериментальні дослідження визначення величин граничних деформацій для вибору способу розділення сортового прокату

Експеримент проводили на стандартній експериментальній установці (див. рис. 2.14), з використанням оснастки оригінальної конструкції (див. рис. 2.15).

У якості зразків використовували прокат круглого перерізу із марок сталей, які знаходяться: у «пластичному» стані: Ст. 3, Сталь 20; у «пружно-пластичному» стані: Сталь 40Х, Сталь 45; у «крихкому» стані: Сталь 60С2А, Сталь ШХ15. Механічні характеристики матеріалів зразків представлені у табл. 3.1.

Розміри зразків: $D = 16$ мм, $l = 80$ мм. Посередині зразка, перпендикулярно осі, просвердлювали отвір діаметром $d = 2$ мм (рис. 3.8).

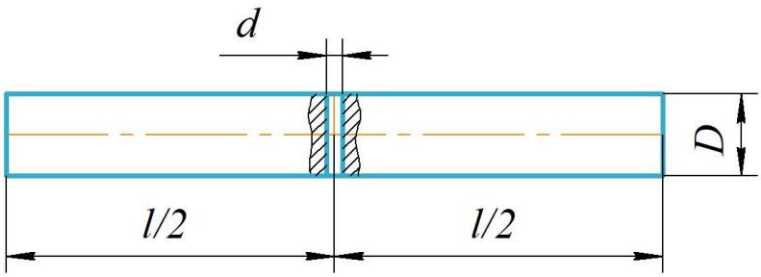



Рис. 3.8 – Розміри зразка

Зразок згинали з малою швидкістю деформування за схемою триточкової холодної ломки згином до появи руйнуючої тріщини, яку фіксували візуально за допомогою дзеркала.

Замір розмірів осей еліпсів $l_1$, $l_2$ (мм) проводили з використанням цифрового апарата. Потім цифрові фотографії (рис. 3.9), збільшенні в комп'ютерному зображенні до значних розмірів, обробляли в графічному редакторі Компас. Для масштабування отриманого зображення перед фотографуванням поруч із робочим деформованим отвором просвердлювали додатковий отвір $d = 2$ мм [280, 281].

Результати розрахунків величин граничних деформацій $\varepsilon_1^{lim}$, $\varepsilon_2^{lim}$ за вимірюваними значенням $l_1$, $l_2$ представлені в табл. 3.3.

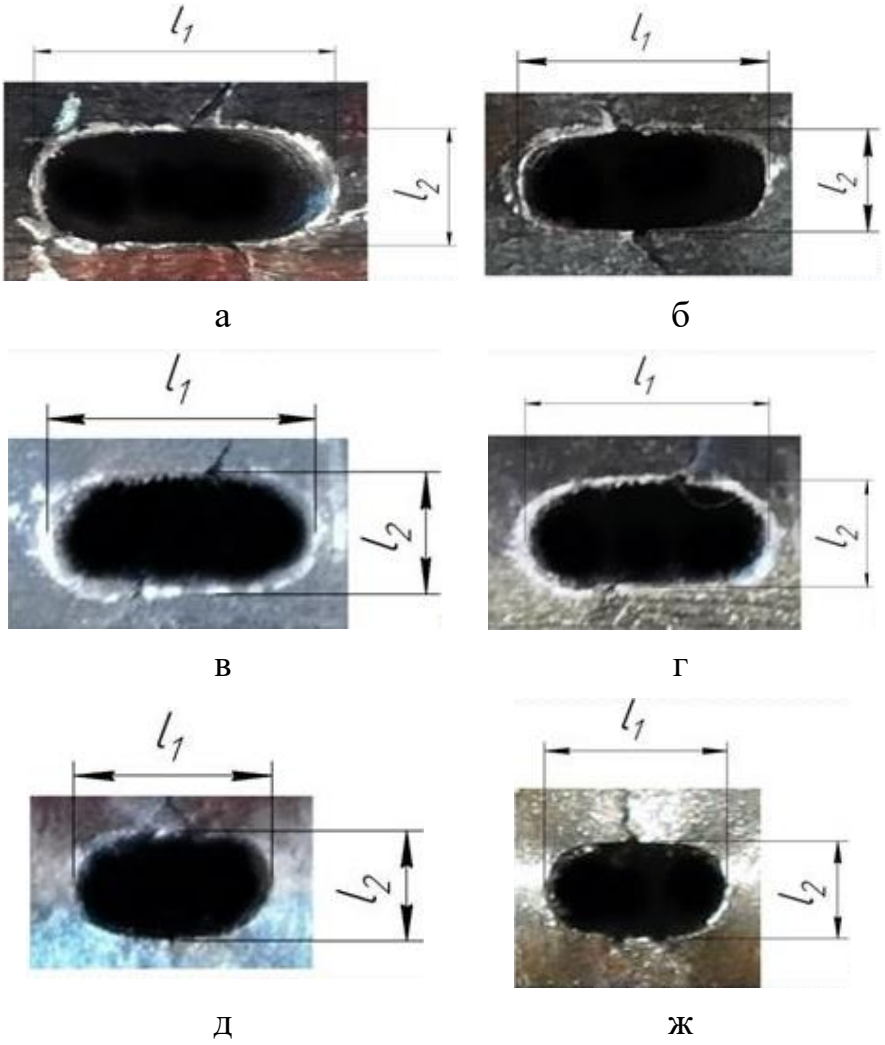



Рис. 3.9 – Фотографії зразків з робочим деформованим отвором після згинання: а – Ст. 3; б – Сталь 20; в – Сталь 40Х; г – Сталь 45; д – Сталь 60С2А; ж – Сталь ШХ15 [280]

Таблиця 3.3 – Результати розрахунків $\varepsilon_1^{lim}$, $\varepsilon_2^{lim}$ [280]

| Марка сталі | $\varepsilon_1^{lim}$ | $\varepsilon_2^{lim}$ |
|---|---|---|
| Ст. 3 | 0,56 | 0,39 |
| Сталь 20 | 0,48 | 0,32 |
| Сталь 40Х | 0,46 | 0,29 |
| Сталь 45 | 0,44 | 0,26 |
| Сталь 60С2А | 0,29 | 0,21 |
| Сталь ШХ15 | 0,25 | 0,20 |

Результати експериментів представлені у вигляді графіків залежностей поздовжньої й поперечної граничних деформацій від твердості матеріалів (рис. 3.10) та від синергетичних критеріїв (рис. 3.11, 3.12). Залежності синергетичних критеріїв від поздовжньої й поперечної граничних деформацій представлені на рис. 3.13, 3.14.

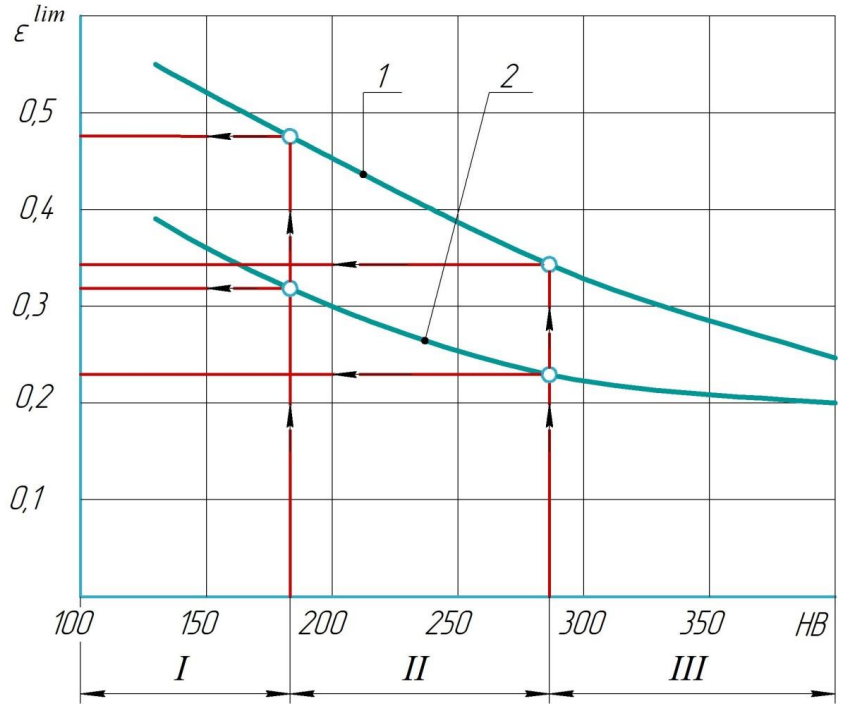



Рис. 3.10 – Залежності поздовжньої й поперечної граничних деформацій від твердості матеріалів: 1 – $\varepsilon_1^{lim} = f(HB)$; 2 – $\varepsilon_2^{lim} = f(HB)$

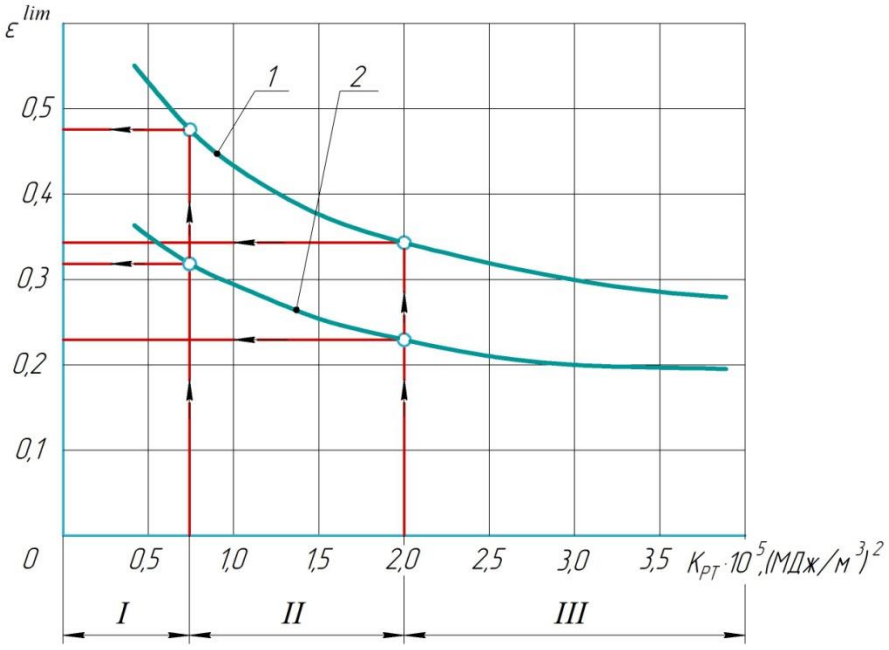



Рис. 3.11 – Залежності поздовжньої й поперечної граничних деформацій від величини «критерія поширення тріщини»: 1 – $\varepsilon_1^{lim} = f(K_{\text{рт}})$; 2 – $\varepsilon_2^{lim} = f(K_{\text{рт}})$

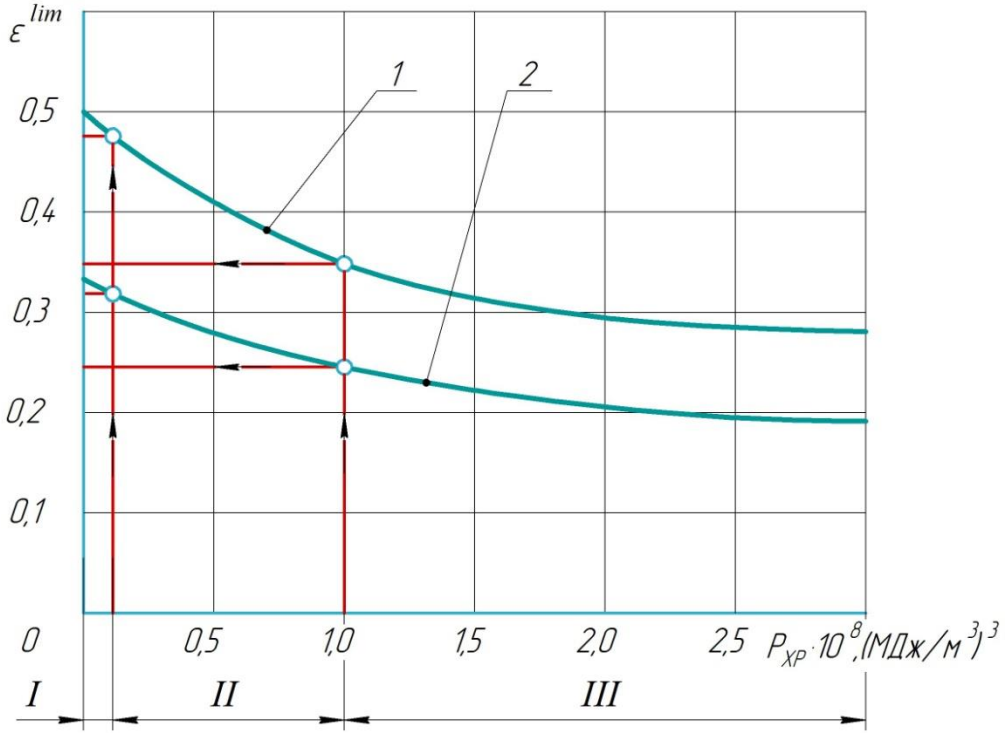



Рис. 3.12 – Залежності поздовжньої й поперечної граничних деформацій від величини «критерія крихкості»: 1 – $\varepsilon_1^{lim} = f(P_{\text{хр}})$; 2 – $\varepsilon_2^{lim} = f(P_{\text{хр}})$

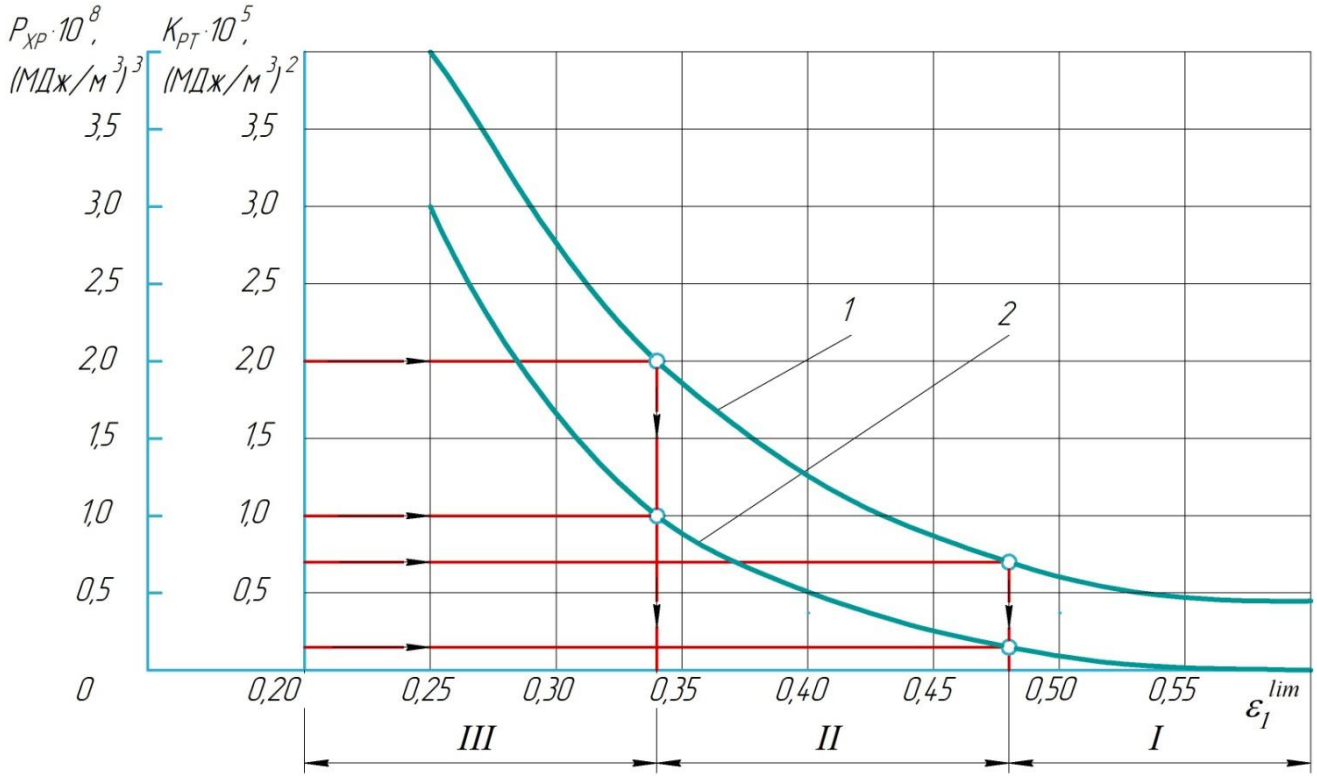



Рис. 3.13 – Залежності синергетичних критеріїв руйнування від поздовжньої граничної деформації: 1 – $K_{\text{рт}} = f(\varepsilon_1^{lim})$; 2 – $P_{\text{хр}} = f(\varepsilon_1^{lim})$

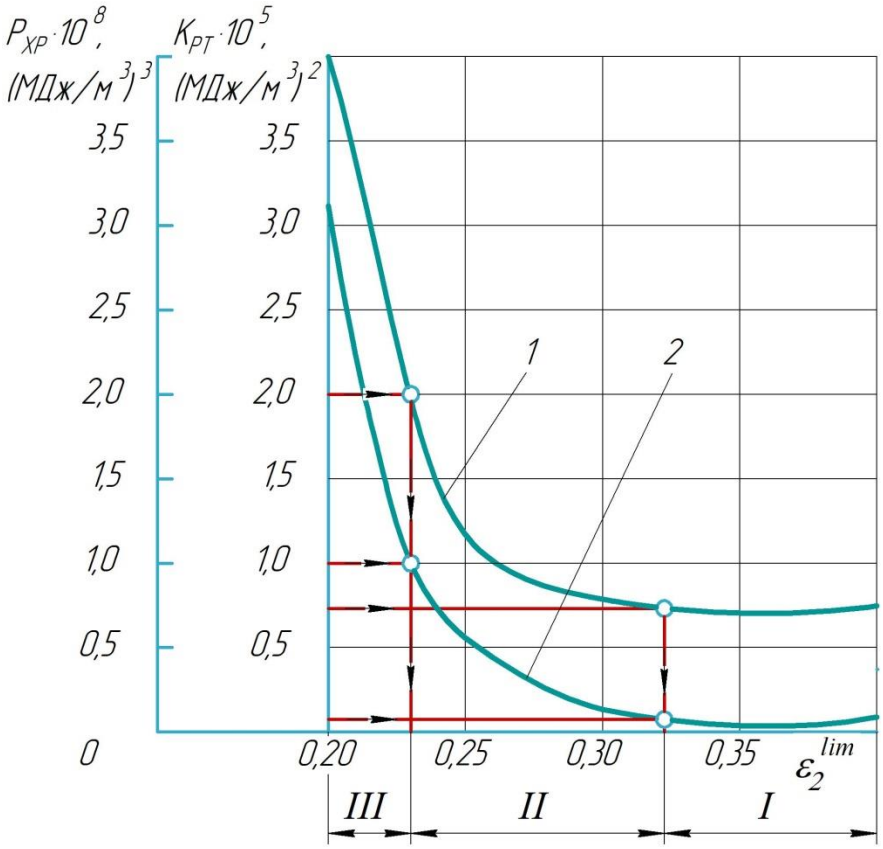



Рис. 3.14 – Залежності синергетичних критеріїв руйнування від поперечної граничної деформації: 1 – $K_{\text{рт}} = f\left(\varepsilon_2^{lim}\right)$; 2 – $P_{\text{хр}} = f\left(\varepsilon_2^{lim}\right)$

Аналіз експериментальних даних (див. рис. 3.10 – 3.14) дозволяє встановити оціночні границі величин поздовжньої $\varepsilon_1^{lim}$ і поперечної $\varepsilon_2^{lim}$ граничних деформацій для віднесення матеріалів до одного із класів матеріалів, що перебувають у «пластичному», «пружно-пластичному» або «крихкому» станах. На підставі аналізу теоретичних і експериментальних досліджень з використанням синергетичних критеріїв і величин граничних деформацій, запропонована класифікація матеріалів щодо їхньої чутливості до руйнування (табл. 3.4).

Установлено, що зона $I$ матеріалів, які знаходяться у «пластичному» стані окреслюється величинами граничних деформацій $\varepsilon_1^{lim} > 0{,}48$, $\varepsilon_2^{lim} > 0{,}32$. Що відповідає значенням синергетичних критеріїв $K_{\text{рт}} < 0{,}7 \cdot 10^5 (\text{МДж/м}^3)^2$, $P_{\text{хр}} < 0{,}15 \cdot 10^8 (\text{МДж/м}^3)^3$. Границя зони $I$ відповідає твердості $(170 \ldots 180)\ HB$.

Зона $II$ матеріалів, що знаходяться у «пружно-пластичному» стані відповідає величинам граничних деформацій $\varepsilon_1^{lim} = 0{,}34 \ldots 0{,}48$, $\varepsilon_2^{lim} = 0{,}23 \ldots 0{,}32$. Зоні $II$

відповідають значення синергетичних критеріїв $K_{\text{рт}} = (0{,}7 \cdot 10^5 \dots 2{,}0 \cdot 10^5)$ $(\text{МДж/м}^3)^2$, $P_{\text{хр}} = (0{,}15 \cdot 10^8 \dots 1{,}0 \cdot 10^8)(\text{МДж/м}^3)^3$ і твердості $(180 \dots 280)\ HB$.

Матеріали, для яких величини граничних деформацій $\varepsilon_1^{lim} < 0{,}34$, $\varepsilon_2^{lim} < 0{,}23$, знаходяться у «крихкому» стані (зона $III$). Це відповідає значенням синергетичних критеріїв $K_{\text{рт}} = 2{,}0 \cdot 10^5 (\text{МДж/м}^3)^2$, $P_{\text{хр}} = 1{,}0 \cdot 10^8 (\text{МДж/м}^3)^3$ і твердості – більше $280\ HB$.

Таблиця 3.4 – Класифікація матеріалів щодо їх чутливості до руйнування [280]

| Клас сталей | $K_{\text{рт}} \cdot 10^5$, $(\text{МДж/м}^3)^2$ | $P_{\text{хр}} \cdot 10^8$, $(\text{МДж/м}^3)^3$ | $\varepsilon_1^{lim}$ | $\varepsilon_2^{lim}$ |
|---|---|---|---|---|
| У «пластичному» стані | $< 0{,}70$ | $< 0{,}15$ | $> 0{,}48$ | $> 0{,}32$ |
| У «пружно-пластичному» стані | $0{,}70 \dots 2{,}00$ | $0{,}15 \dots 1{,}00$ | 0,34...0,48 | 0,23...0,32 |
| У «крихкому» стані | $> 2{,}00$ | $> 1{,}00$ | $< 0{,}34$ | $< 0{,}23$ |

**Висновки до розділу 3.**

1. Запропоновано та науково обґрунтовано метод вибору способу безвідходного розділення сортового прокату із матеріалів з різними механічними характеристиками. З використанням синергетичних критеріїв руйнування та величин граничних деформацій створено класифікацію матеріалів за ознакою їх чутливості до руйнування, яка дозволяє зробити обґрунтований вибір способу розділення.

2. На основі проведеного кластерного аналізу синергетичних критеріїв руйнування матеріалів установлено, що синергетичні критерії: «критерій поширення тріщини» і «критерій крихкості» є базовими інформативними ознаками, і при додаванні до них будь-якого з решти критеріїв, вони утворюють шукані

інформативні множини мінімальної потужності, що забезпечують, із заданою вірогідністю, класифікацію матеріалів по їхній чутливості до розділення.

3. Запропоновано експериментальний метод визначення деформованості зразків при реалізації процесів безвідходного розділення сортового прокату за величинами повздовжньої і поперечної граничних деформацій, який доповнює метод з використанням синергетичних критеріїв руйнування. При цьому процедура визначення граничних деформацій дозволяє повною мірою зберегти стандартність випробування. Враховуючи масовість процесу розділення сортового прокату на мірні заготовки, можна розраховувати на прискорене накопичення інформації за величинами граничних деформацій для металів з різними хімічним складом і структурним станом для формування відповідного банку даних.

4. На підставі виконаних розрахунків з використанням синергетичних критеріїв та визначених експериментально величин повздовжньої і поперечної граничних деформацій запропонована класифікація матеріалів щодо їх чутливості до руйнування, які можна віднести до трьох класів матеріалів, що знаходяться: у «пластичному», у «пружно-пластичному» та у «крихкому» станах. Аналіз результатів цієї роботи дозволив запропонувати методику вибору конкретного способу розділення сортового прокату (рис. 3.15).

При значеннях «критерія поширення тріщини» менше $0{,}7 \cdot 10^5 (\text{МДж}/\text{м}^3)^2$, «критерія крихкості» менше $0{,}15 \cdot 10^8 (\text{МДж}/\text{м}^3)^3$ сталь можна віднести до матеріалів у «пластичному» стані – зона $I$. Границя зони $I$ відповідає твердості $(170 \dots 180)\, HB$ і величинам граничних деформацій $\varepsilon_1^{lim} > 0{,}48$, $\varepsilon_2^{lim} > 0{,}32$. Для розділення матеріалів у «пластичному» стані слід застосувати відрізку зсувом, а конкретно – закриту, неповністю закриту схему відрізки з активним поперечним затиском. При високих вимогах до геометричної точності заготовок слід застосовувати схему відрізки з диференційованим затиском прокату або заготівельно-розділювальні процеси.

При значеннях «критерію поширення тріщини» $(0{,}7 \cdot 10^5 \dots 2{,}0 \cdot 10^5)$ $(\text{МДж}/\text{м}^3)^2$, «критерія крихкості» $(0{,}15 \cdot 10^8 \dots 1{,}0 \cdot 10^8)(\text{МДж}/\text{м}^3)^3$ сталь можна віднести до матеріалів у «пружно-пластичному» стані – зона $II$. Зона $II$ відповідає

твердості $(180 \dots 280)\,HB$. Зоні $II$ відповідають величини граничних деформацій $\varepsilon_1^{lim} = 0{,}34 \dots 0{,}48$, $\varepsilon_2^{lim} = 0{,}23 \dots 0{,}32$. Для розділення матеріалів у «пружно-пластичному» стані також доцільно застосувати відрізку зсувом, а конкретно – неповністю закриту схему відрізки з активним і пасивним поперечним затиском. Ближче до верхньої границі класу можливе застосування триточкової холодної ломки згином при статико-динамічному навантаженні [275, 280].

При значеннях «критерія поширення тріщини» більше $2{,}0 \cdot 10^5 (\text{МДж/м}^3)^2$, «критерія крихкості» більше $1{,}0 \cdot 10^8 (\text{МДж/м}^3)^3$ сталь можна віднести до матеріалів у «крихкому» стані – зона $III$. Це сталі, для яких $\varepsilon_1^{lim} < 0{,}34$, $\varepsilon_2^{lim} < 0{,}23$, а границя зони $III$ відповідає твердості більше $280\,HB$. Для розділення матеріалів у «крихкому» стані слід використовувати триточкову холодну ломку згином (нижня границя) та консольну ломку згином (верхня границя) [275, 280].

*Результати досліджень відображені в опублікованих роботах [253, 254, 271, 273 – 276, 280, 281].*

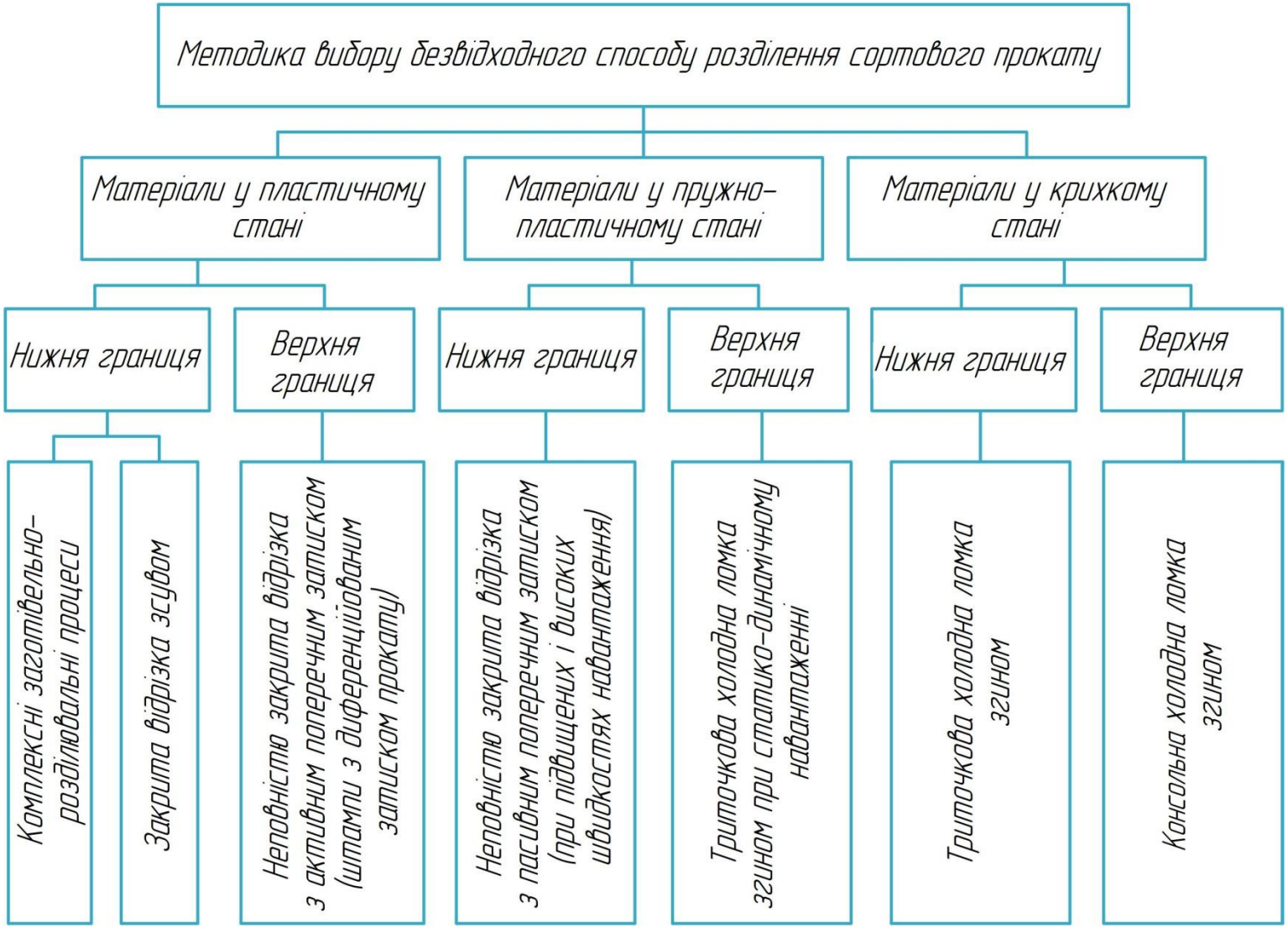



Рис. 3.15 – Методика вибору безвідходного способу розділення сортового прокату за величинами синергетичних критеріїв руйнування та повздовжньої і поперечної граничних деформацій

# РОЗДІЛ 4
# РОЗРОБКА, МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ПРОЦЕСУ РОЗДІЛЕННЯ СОРТОВОГО ПРОКАТУ ТРИТОЧКОВОЮ ХОЛОДНОЮ ЛОМКОЮ ЗГИНОМ ПРИ КОМБІНОВАНОМУ СТАТИКО-ДИНАМІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ НА ПРЕС-МОЛОТІ

Розробка й застосування ефективних методів керування руйнуванням дозволяють значно поліпшити спосіб ломки прокату на заготовки, а також створити принципово нові методи, придатні для отримання заготовок під подальшу механічну обробку. У їхній основі лежить розуміння причин, що приводять до небажаних відхилень тріщини від заданої траєкторії. Це дозволяє запропонувати діючі способи поліпшення геометричної точності заготовок [41, 43, 44, 189].

Перспективними напрямками вдосконалення безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату є підвищення швидкості навантаження й створення складного напруженого стану, що утрудняє пластичну течію у зоні зламу [3, 32, 84 – 87, 282].

У роботах [83, 84 – 87] показано, що при підвищенні швидкості навантаження змінюється поведінка металу, а також характер пластичної деформації й руйнування, напружено-деформований стан металу, співвідношення пластичного етапу й етапу руйнування, форма й розміри середовища деформації. При цьому забезпечується мінімально можливий рівень пластичної деформації, що передує зародженню магістральної тріщини, низька енергоємність процесу.

Однак у процесі динамічного (ударного) навантаження з підвищеними і високими швидкостями, прогин зразка супроводжується пружними деформаціями й коливаннями на контакті з опорами й інструментом. При цьому процес руйнування стає некерованим через нестабільність траєкторії тріщини [41, 189]. Недостатня інформація про причини цього явища й можливі методи боротьби з ним сприяє переконанню, що закритичне руйнування – процес некерований і він не може бути застосований для якісного розділення прокату на заготовки. Це пояснюється, у тому

числі, і складністю опису динаміки руйнування, а також наявністю диспропорції між розвитком теоретичних і експериментальних методів дослідження поширення тріщин динамічної механіки руйнування.

Необхідно враховувати також інерційні навантаження, що виникають при зміщенні й повороті половинок зразка в процесі розділення способом холодної ломки згином.

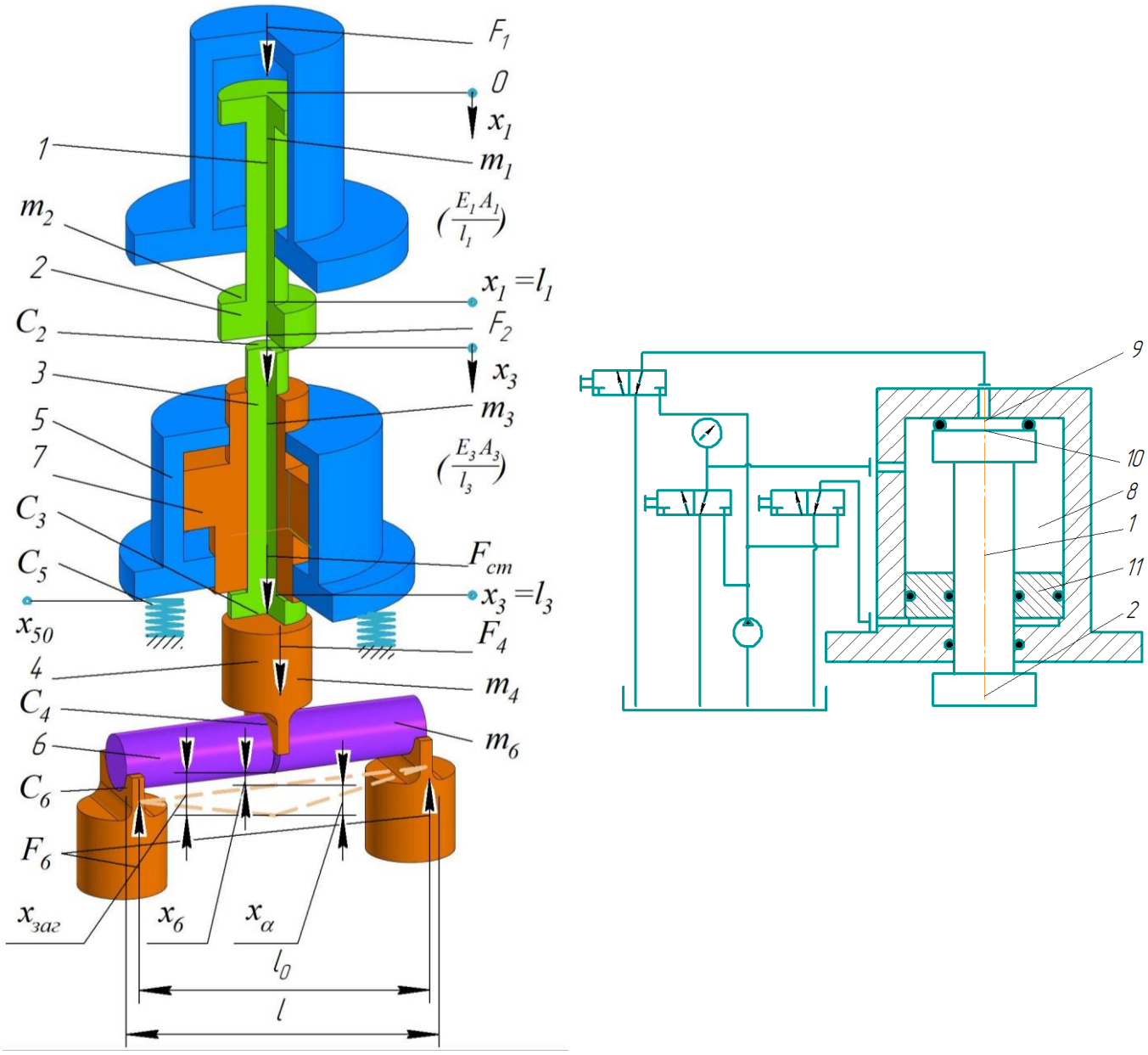
Для розв'язку даної проблеми пропонується застосувати комбіноване статико-динамічне навантаження. Попередньо зразок навантажують статичною силою. Це дозволяє забезпечити вихідне зміщення зразка на контакті з опорами й зменшити коливання зразка й інструмента. Можливість попереднього статичного навантаження в комбінації з високою швидкістю деформування дозволяє створити у зразку схему складного напруженого стану, що забезпечує необхідну геометричну точність заготовок [41].

## 4.1 Математичне моделювання процесів статичного, динамічного й статико-динамічного навантажень прокату за схемою триточкової ломки згином

Статичне, динамічне й статико-динамічне навантаження сортового прокату можна здійснити на прес-молоті. На рис. 4.1, а представлена схема динамічного і статико-динамічного навантажень зразків за схемою триточкової ломки на прес-молоті оригінальної конструкції ДДМА. Прес-молот має наступні переваги: можливість створення квазістатичних, ударних і комбінованих навантажень у широкому діапазоні швидкостей, енергій і сил; точне дозування енергії й сили при деформуванні заготовки та ін. [283 – 287].

Динамічне навантаження зразка 6 здійснюється за допомогою гідропружного циліндра, який в якості акумулятора енергії використовує заздалегідь стислу рідину. Насосом (рис. 4.1, б) створюється тиск у робочій камері 8 гідропружного циліндра. При досягненні заданої величини тиску керуюча порожнина 9 відсікається від зливу й з'єднується з нагнітанням. Відбувається розгерметизація керуючої порожнини 9.

Робоча рідина під високим тиском діє на всю площу верхнього торця 10 штока 1. Шток 1 разом з бабою 2 прискорено рухається вниз. При цьому він навантажує проміжний пуансон 3, який, у свою чергу – ломник 4, що установлені по осі гідравлічного циліндра 5. Під дією ударного навантаження відбувається ломка зразка 6 за схемою триточкової холодної ломки згином.




а б

Рис. 4.1 – Розрахункова схема динамічного й статико-динамічного навантажень зразків способом холодної ломки згином на прес-молоті конструкції ДДМА (а) і принципова схема гідропружного приводу прес-молота (б) [288]

Для реалізації режиму статико-динамічного навантаження в конструкції прес-молота передбачений плунжер 7 (див. рис. 4.1, а). Плунжер 7 переміщується під дією високого тиску рідини в гідроциліндрі 5 і навантажує торець проміжного пуансону 3. При цьому відбувається попереднє статичне деформування зразка 6 в одному напрямку з напрямком його остаточного розділення. Після цього відбувається динамічне (ударне) навантаження зразка 6 до руйнування. Цикл роботи прес-молота відновляється.

У роботі [289] запропоновані математичні моделі розділення зразків у площині концентратора напружень. Існуючі розрахункові моделі розроблено стосовно до ударних випробувань на копрах і молотах, коли маса рухомого інструмента значно більше маси зразка.

У роботі [290] використана відома модель ударних випробувань зразків на зосереджене згинання із пружно-пластичним шарніром. При вивченні пластичної течії в площині розділення при триточковому згині зроблені такі висновки. Незважаючи на зміну середовища пластичної деформації, при збільшенні кута повороту, в центральній області утворюється жорстка зона, яка обмежена лініями розриву швидкості деформації зсуву. Відносно цієї зони, яка являє собою пружно-пластичний шарнір, відбувається поворот половинок зразка. Відома модель [291] відповідає схемі навантаження згинанням, коли кут повороту половинок зразка до руйнування малий і крихке руйнування відбувається шляхом поширення тріщини без істотної пластичної деформації.

Аналіз відомих моделей руйнування й запропонованої комплексної моделі руйнування зразків [41] показує, що поведінка тріщини залежить від цілого ряду погано керованих факторів. Завдання ускладнюється у разі динамічного й статико-динамічного навантажень, коли додатково необхідно враховувати вплив конструктивних параметрів прес-молота.

У роботі [189] розглядається чисельне моделювання експериментів по визначенню динамічної тріщиностійкості матеріалів. Показано, що для ударних випробувань зразків за схемою триточкового згину можливо істотне спрощення процедури визначення базових рішень. Це стало можливим при використанні

теорій Ейлера-Бернуллі або Тимощенка. У цьому випадку наявність тріщини моделюється введенням додаткового кута повороту у відповідному перерізі. Отримані при такому підході дані задовільно узгоджуються з експериментальними даними, що також свідчить на користь обраної моделі ударних випробувань із пружним шарніром.

У роботі [292] представлені комплексні математичні моделі процесів динамічного і статико-динамічного навантаженень зразків за схемою триточкової холодної ломки згином на прес-молоті з однаковим напрямком деформуючих сил. Вони відрізняються від відомих моделей урахуванням попереднього статичного навантаження й конструктивних особливостей прес-молота. У цьому випадку в момент удару швидкість інструмента дорівнює швидкості рухомих частин. На прес-молотах маса проміжного пуансона може бути порівняна з масою зразка, а його швидкість у момент удару дорівнює нулю. Проміжний пуансон розганяється при ударі одночасно з деформуванням зразка, тому необхідно враховувати зміну швидкості пуансона в процесі навантаження.

Математичні моделі динамічного і статико-динамічного навантажень прокату на прес-молоті, які розглянуті у роботі [293], були розвинені у даній дисертаційній роботі. По-перше, у моделях врахована додаткова маса ломника 4 – $m_4$, що відповідає схемі навантаження, яка застосована при подальших експериментальних дослідженнях. По-друге, для запропонованих моделей проводили уточнення значень жорсткості контакту ломника 4, зразка 6 і опор. Для уточнення жорсткості $C$ контакту : $C_4$ – «зразок – ломник», $C_6$ – «зразок – опори» проводили додаткові експериментальні дослідження на ударне навантаження зразків без концентратора напружень. Величину жорсткості контакту $C$ розраховували за формулою:

$$C_4 = C_6 = C = \pi^2 \cdot m_6/T, \tag{4.1}$$

де $m_6$ – маса зразка;

$T$ – півперіод коливання системи «ломник 4 – зразок 6 – опори».

Для узагальненої постановки задачі шток 1 представляли у вигляді стрижня змінного поперечного перерізу із площею поперечного перерізу $A_1(x_1)$, модулем пружності $E_1$, довжиною $l_1$ і масою $m_1$. Бабу 2 розглядали у вигляді зосередженої маси $m_2$ у перерізі $x_1 = l_1$ (див. рис. 4.1, а).

Переміщення рухомих частин (див. рис. 4.1, а) відбувалося під дією сили приводу $F_1 = f[U_1(x_1 = 0)]$, де $U_1$ – переміщення штока в перерізі $x_1$. Проміжний пуансон 3 масою $m_3$ представляли у вигляді стрижня змінного поперечного переріза з параметрами $A_3(x_3)$, модулем пружності $E_3$, довжиною $l_3$, а ломник 4 – у вигляді зосередженої маси $m_4$. Час удару 1 ... 2 мс відносно малий у порівнянні з періодом власних поздовжніх коливань перерізу проміжного пуансона. Тому для коректності математичної моделі необхідно враховувати хвильові процеси, що відбуваються й у проміжному пуансоні. Оскільки довжина пуансона $l_3$ порівняна з довжиною штока $l_1$, то вважали, що залежність зміни сили на контакті баби 2 і проміжного пуансона 3 від деформації $F_2 = f_2(\Delta_2)$ – нелінійна. Лінеаризована жорсткість контакту баби 2 і проміжного пуансона 3 – $C_2 = const$. Переміщення ломника 4 здійснюється під дією сили з боку проміжного пуансона 3. Лінеаризована жорсткість контакту проміжного пуансона 3 і ломника 4 – $C_3 = const$.Технологічна сила $F_4 = f_4(\Delta_4)$, через ломник 4 масою $m_4$, прикладена посередині зразка 6 масою $m_6$, який розташований на двох опорах. Елемент із жорсткістю $C_4 = const$ моделює пружні властивості на контакті зразка з ломником. Два симетричні елементи з жорсткістю $C_6 = const$ моделюють пружні властивості контакту опор зі зразком і діють на зразок силою $F_6$. Подібне моделювання впливу опор на зразок двома рівними силами $F_6$ добре узгоджується з експериментом [291]. У режимі статико-динамічного навантаження на першому етапі зразок 6, який характеризується жорсткістю $C_{\text{заг}} = const$, навантажується статичною силою $F_{\text{ст}}$ гідравлічного циліндра 5. Вона спричиняє деформацію елементів станини машини, яка має жорсткість $C_5 = const$.

У запропонованих комплексних моделях процесів динамічного і статико-динамічного навантажень зразків за схемою триточкової ломки згином на пресмолоті частково використана відома модель ударних випробувань на зосереджений згин із пружним шарніром, яка відрізняється наявністю вихідних деформацій

перерізів – $x_6$ під дією попередньої статичної сили $F_{\text{ст}}$. Зразок маси $m_6$ представляли у вигляді двох жорстких половинок, з'єднаних між собою пружним шарніром, кут повороту якого пропорційний моменту згинання $M_{curv}$ в центральному перерізі [290, 291]:

$$M_{curv} = \alpha \cdot l_0^2 \cdot /(8 \cdot C_{заг}), \tag{4.2}$$

де $\alpha$ – кут повороту половинок зразка;

$l_0$ – відстань між опорами;

$C_{\text{заг}}$ – статична жорсткість зразка [291]:

$$C_{\text{заг}} = d \cdot E/\big(\lambda \cdot (a/d)\big), \tag{4.3}$$

де $d$ – діаметр зразка;

$E$ – модуль пружності матеріалу зразка;

$\lambda$ – безрозмірний тарувальний коефіцієнт для зразка [290, 291];

$a$ – довжина тріщини.

Рівняння руху довільного перерізу мас $m_1, m_3$ має вигляд:

$$\partial^2 U_i/\partial t^2 = c_{\text{i}}^2 \cdot \big[(1/A_i) \cdot (\partial A_i/\partial x_i) \cdot (\partial U_i/\partial x_i) + \big(\partial^2 U_i/\partial x_i^2\big)\big], i = 1{,}3 \tag{4.4}$$

де $U_i$ – переміщення $i$ – того перерізу стрижня;

$c_i$ – швидкість звука в металі.

Запишемо диференціальні рівняння руху зосереджених мас $m_2$, $m_4$:

$$m_i \cdot (d^2 x_i/dt^2) + F_{ai}(\Delta_{ai}) - F_{bi}(\Delta_{bi}) = 0, i = 2{,}4, \tag{4.5}$$

де $x_i$ – переміщення маси $m_i$;

$F_{ai}(\Delta_{ai})$, $F_{bi}(\Delta_{bi})$ – сили, що діють на масу $m_i$ з боку контактуючих з нею елементів, розташованих із протилежних боків;

$\Delta_{ai}$, $\Delta_{bi}$ – абсолютні деформації відповідних пружних елементів.

Для баби масою $m_2$:

$$F_{a2} = E_1 \cdot A_1 \cdot (\partial U_1/\partial x_1)|_{x_1=l_1}; \quad (4.6)$$

$$F_{b2} = f\left[U_1|_{x_1=l_1} - U_3|_{x_3=0}\right] \text{ при } U_1|_{x_1=l_1} > U_3|_{x_3=0}. \quad (4.7)$$

Якщо ні, то $F_{b2} = 0$ оскільки відбувається порушення контакту між елементами системи. У випадку лінійної залежності:

$$F_{b2} = C_2 \cdot \left[U_1|_{x_1=l_1} - U_3|_{x_3=0}\right]. \quad (4.8)$$

Для ломника масою $m_4$:

$$F_{a4} = E_3 \cdot A_3 \cdot (\partial U_3/\partial x_3)|_{x_3=l_3}; \quad (4.9)$$

$$F_{b4} = f\left[U_3|_{x_3=l_3} - x_{\text{заг}}\right] \text{ при } U_3|_{x_3=l_3} > x_{заг}, \quad (4.10)$$

де $x_{заг} = x_6 + x_\alpha$ – сумарне переміщення центрального перерізу заготовки.

$x_\alpha$ – переміщення центрального перерізу зразка під дією технологічного навантаження.

Якщо ні, то $F_{b4} = 0$. У випадку лінійної залежності

$$F_{b4} = C_4 \cdot \left[U_3|_{x_3=l_3} - x_{заг}\right]. \quad (4.11)$$

Додатково до рівнянь руху рухомих частин і проміжного пуансона записували рівняння сил і моментів у центральному перерізі з урахуванням інерційних складових, що виникають при ударному навантаженні. У рамках запропонованої

математичної моделі деформування зразка за схемою триточкової холодної ломки згином одержимо систему рівнянь:

$$\begin{cases} M_{curv} = (m_6 \cdot l \cdot \ddot{x}_{\text{заг}}/8) - (m_6 \cdot l^2 \cdot \ddot{\alpha}/24) + (F_6 \cdot l_0/2); \\ F_4 - 2 \cdot F_6 = m_6 \cdot \ddot{x}_{заг} - (\ddot{\alpha}/4 \cdot l \cdot m_6); \\ F_4 = C_4 \cdot (x_4 - x_{заг}), при\ x_4 > x_{заг}; \\ F_6 = C_6 \cdot (x_{заг} - \alpha/2 \cdot l_0), при\ x_{заг} > \alpha/2 \cdot l_0, \end{cases} \tag{4.12}$$

де $l$ – довжина зразка;

$\ddot{x}_{\text{заг}}$ – прискорення половинок зразка;

$\ddot{\alpha}$ – кутове прискорення половинок зразка.

Після перетворень і підстановок отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \ddot{x}_{\text{заг}} = -(6 \cdot l_0 \cdot C_{заг} \cdot x_{заг}/(m_6 \cdot l)) + (C_{заг} \cdot l_0/(4 \cdot C_6) - l/3 + l_0/2)\ \text{x} \\ \text{x}\ 6 \cdot F_6/(m_6 \cdot l) + F_4/m_6\ ; \\ \ddot{\alpha} = -(12 \cdot l_0^2 \cdot C_{заг} \cdot \alpha/(m_6 \cdot l^2)) + 24/(m_6 \cdot l)\ \text{x} \\ \text{x}\ (2 \cdot l_0/l - 1) \cdot F_6 + 12/(m_6 \cdot l)\ \cdot F_4. \end{cases} \tag{4.13}$$

Відповідно до методу початкових параметрів у формі Коші [294] розглядали переміщення елементів системи «прес-молот – оснастка – зразок» у локальних координатах. Для переходу до загальної системи координат поєднували її початок з положенням точки контакту зразка з опорою перед статичним навантаженням. Тоді вихідні переміщення центрального перерізу зразка $x_{\text{заг}0}$ і маси $m_4$, а також деформація станини $x_{50}$ відбувалися під впливом статичної сили $F_{\text{ст}}$. Враховуючи зміщення перерізів штока за рахунок дії сили $F_{\text{ст}}$, переносили початок локальної системи координат штока на величину $(U_{1max} + x_{50})$, щоб переміщення на контакті баби та проміжного пуансону в момент удару дорівнювало статичному. Тоді загальне переміщення центрального перерізу зразка визначалося як: $x_{\text{заг}} = x_6 + x_\alpha$.

Параметри прес-молота: енергія удару $W = 0 \ldots 1300$ Дж; сила статичного приводу $F_{\text{ст}} = 0 \ldots 10$ кН; $F_1 = 0 \ldots 12$ кН; $F_4 = 0 \ldots 80$ кН; $m_2 = 2{,}00$ кг; $m_4 = 0{,}3$ кг; $l_1 = 155$ мм; $l_3 = 206$ мм; $C_2 = C_3 = 100 \ldots 500$ МН/м; швидкість

рухомих частин прес-молота $V = 0 \ldots 12$ м/с. Параметри зразка: діаметр зразка $d = 16$ мм; $l = 70$ мм; $l_0 = 60$ мм; $E = 2{,}05 \cdot 10^5$МПа; $m_6 = 0{,}25$ кг. Розрахунки проводили для зразків із сталі Сталь 60С2А із жорсткістю у площині розділення – $C_{\text{заг}} = 4$ МН/м, яка визначалася експериментальним шляхом та розраховувалася за формулою (4.3). Вибір матеріалу зразка пов'язаний з тим, щоб рівень пластичної деформації в зоні розділення був мінімальним.

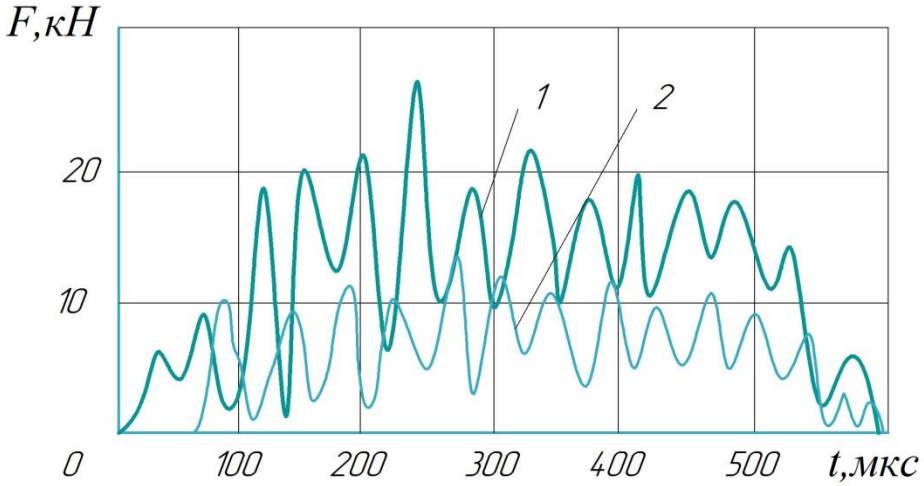
Спосіб моделювання умов контакту між інструментом, зразком та опорами істотно впливає на отримані результати. В результаті проведених експериментальних досліджень, з урахуванням того, що форма контактної поверхні ломника відповідає формі опор, установлені значення величин жорсткостей контакту «ломник – зразок» $C_4$ і «зразок – опори» $C_6$, які дорівнюють: $C_4 = C_6 = 140$ МН/м. Величину статичної сили при статико-динамічному навантаженні приймали рівною 10 кН.

Розрахунки проводили для сталей, які є представниками класів матеріалів, що знаходяться у «пластичному» – Сталь 20, «пружно-пластичному» – Сталь 45, Сталь 40Х та «крихкому» станах – Сталь 60С2А, згідно класифікації розробленої вище.

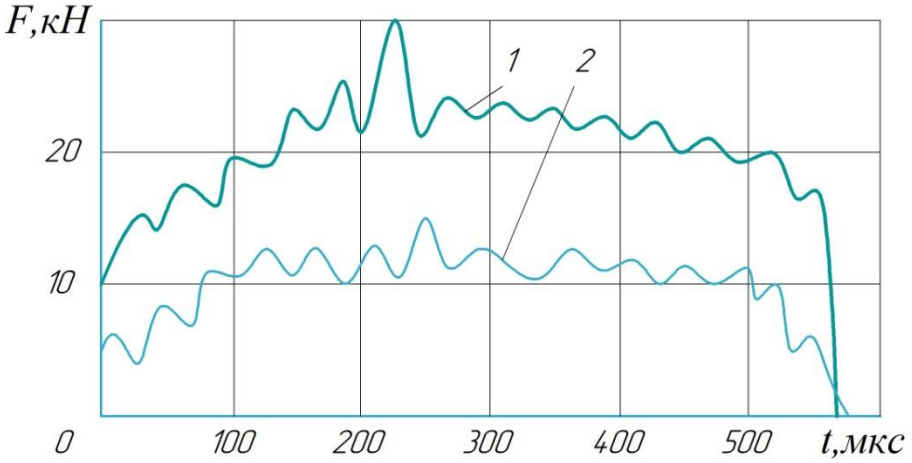
Величини площ поперечного перерізу штока 1 і проміжного пуансона 3 (див. рис. 4.1) по довжині задавали у вузлах ($i = 0 \ldots n$) розрахункової сітки ($n_1 = 31, n_2 = 34$), де $n$ – кількість вузлів.

Вивчали вплив величини статичної сили $F_{\text{ст}}$, а також жорсткості контакту баби 2 і проміжного пуансона 3 – $C_2$ на характер і амплітудні значення сил $F_4$, $F_6$ (рис. 4.2).

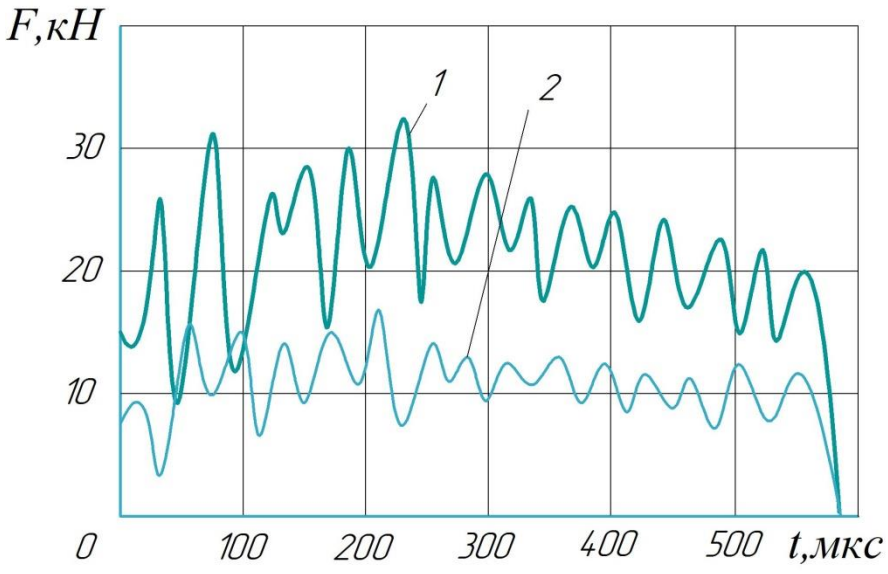
Аналіз графіків $F_4 = f(t)$ и $F_6 = f(t)$ показує, що при відсутності статичного навантаження в початковий момент часу зразок відривається від опор (див. рис. 4.2, а). Таким чином, схема навантаження у цей момент часу фактично є безопорною – $F_6 = 0$. Отримані результати відповідають експериментальним даним [290, 291], відповідно до яких переміщення зразка назустріч руху ломника становить порядку 0,06 мм, а час відсутності контакту – до 100 мкс, який можна порівняти з часом руйнування.




а




б




в

Рис. 4.2 – Розрахункові залежності зміни сил на контакті ломника зі зразком (Сталь 60С2А) $F_4 = f(t)$ – (1) і зразка з опорами $F_6 = f(t)$ – (2): а – ударне навантаження $C_2 = 100$ МН/м; б – статико-динамічне навантаження $F_{ст} = 10$ кН, $C_2 = 100$ МН/м; в – статико-динамічне навантаження при $F_{ст} = 15$ *кН*, $C_2 = 500$ МН/м

Процес деформування при триточковій ломці згином відбувається зі згинними коливаннями зразка, на які накладаються коливання з більш високою частотою, пов'язані з піддатливістю зони контакту зразка із ломником і опорами, а також власною частотою коливань елементів системи [295].

Наявність статичного навантаження $F_{ст}$ у момент удару (див. рис. 4.2, б) приводить до більш плавного навантаження зразка, різкі піки сил на розрахункових кривих зникають.

Збільшення статичної складової $F_{ст}$ приводить до росту амплітуди сил $F_4$, $F_6$ (див. рис. 4.2, в). Усереднені значення сил $F_4, F_6$ зростають несуттєво із зростанням статичної складової $F_{ст}$.

Величина статичного навантаження $F_{ст}$, необхідна для запобігання відриву зразка 6 від опор, підвищується зі зростанням жорсткості контакту баби 2 і проміжного пуансона 3 – $C_2$ (див. рис. 4.2, в).

Аналіз графіків $F_4 = f(t)$ и $F_6 = f(t)$ для різних величин $C_2$ (див. рис. 4.2) показує, що зменшення жорсткості $C_2$ згладжує криві. При високих значеннях $C_2$ деформування зразка відбувається за кілька зіткнень рухомих частин з проміжним пуансоном. Конструкція проміжного пуансона визначає його масу і жорсткість контакту $C_2$. Необхідну піддатливість пуансона можна забезпечити збільшенням його довжини, зменшенням площі поперечного перерізу за рахунок осьового свердлення, формою контактної поверхні, використанням пружних вставок.

## 4.2 Моделювання процесу триточкової холодної ломки зразків при статичному, динамічному і статико-динамічному навантаженнях з використанням програмного комплексу Deform

Для моделювання процесів статичного, динамічного і статико-динамічного навантажень зразків за схемою триточкової холодної ломки згином використовували програмний комплекс Deform.

Параметри процесу моделювання та матеріали зразків представлені у табл. 4.1, табл. 4.2.

Таблиця 4.1 – Параметри процесу моделювання

| Назва параметру | Значення параметру | | |
|---|---|---|---|
| | статичне навантаження | динамічне навантаження | статико-динамічне навантаження |
| 1 Властивості матеріалу зразка | «пружно-пластичний» | | |
| 2 Температура | 20°C | | |
| 3 Кількість елементів розбиття | 32000 | | |
| 4 Коефіцієнт тертя по закону Зібеля | 0,12 | | |
| 5 Параметри розрахунку: | аналіз Лагранжа | | |
| ○ кількість кроків розрахунку | 100 | 100 | 100+100 |
| ○ приріст кроків, мм/крок | 0,30 | 0,30 | 0,05+0,25 |
| ○ хід ломника, мм | 30 | 30 | 5+25 |
| 6 Рух ломника | переміщення прямолінійне | | |
| ○ швидкість, мм/с | 1 | 12000 | 1+12000 |

Таблиця 4.2 – Матеріали зразків для моделювання

| Марка сталі | Сталь 20 | Сталь 45 | Сталь 40Х | Сталь 60С2А |
|---|---|---|---|---|
| Матеріал із бази Deform | $AISI - 1020$ | $AISI - 1045$ | $AISI - 5135H$ | $AISI - 1060$ |

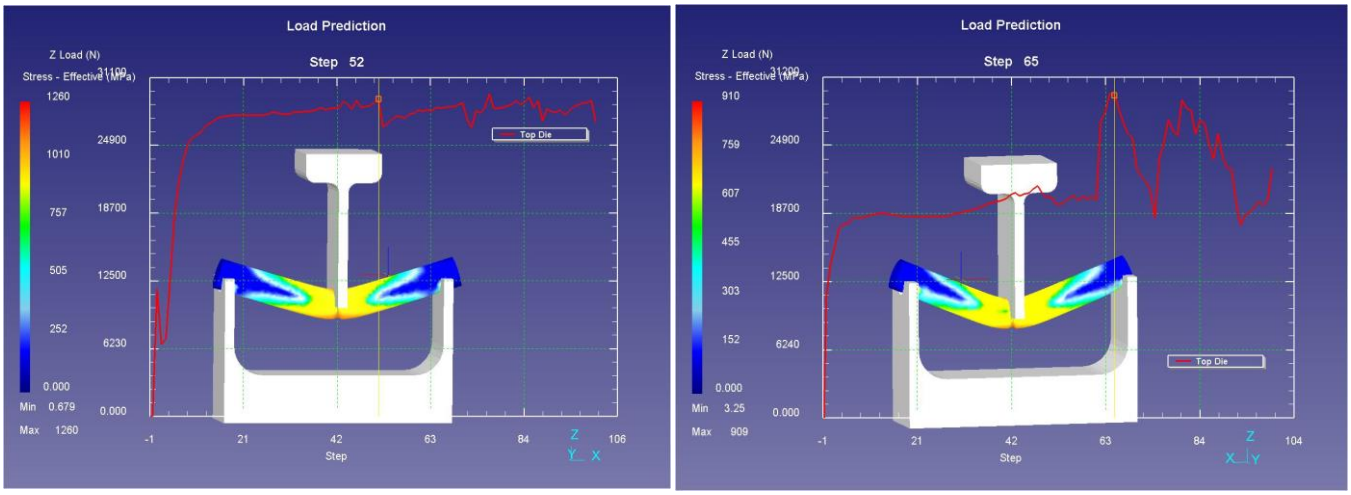
При моделюванні використовували зразки з розмірами: діаметром 16 мм; довжиною 70 мм. Параметри концентратора напружень у формі кільцевої канавки трикутного профілю: глибина $\Delta H = 1{,}5$ мм; радіус при вершині $\Delta r = 0{,}15$ мм. Схема навантаження – триточкова холодна ломка згином. Навантаження прикладали посередині між опорами. Відстань між опорами – 60 мм. Зразки виготовлені з сортового прокату із різних марок сталей, що знаходяться у «пластичному» – Сталь 20, «пружно-пластичному» – Сталь 45, Сталь 40Х та «крихкому» станах – Сталь 60С2А (див. табл. 4.2.).

При статико-динамічному навантаженні моделювання проводили за два етапи. На першому етапі зразок навантажували статичною силою 10 кН, а на другому –

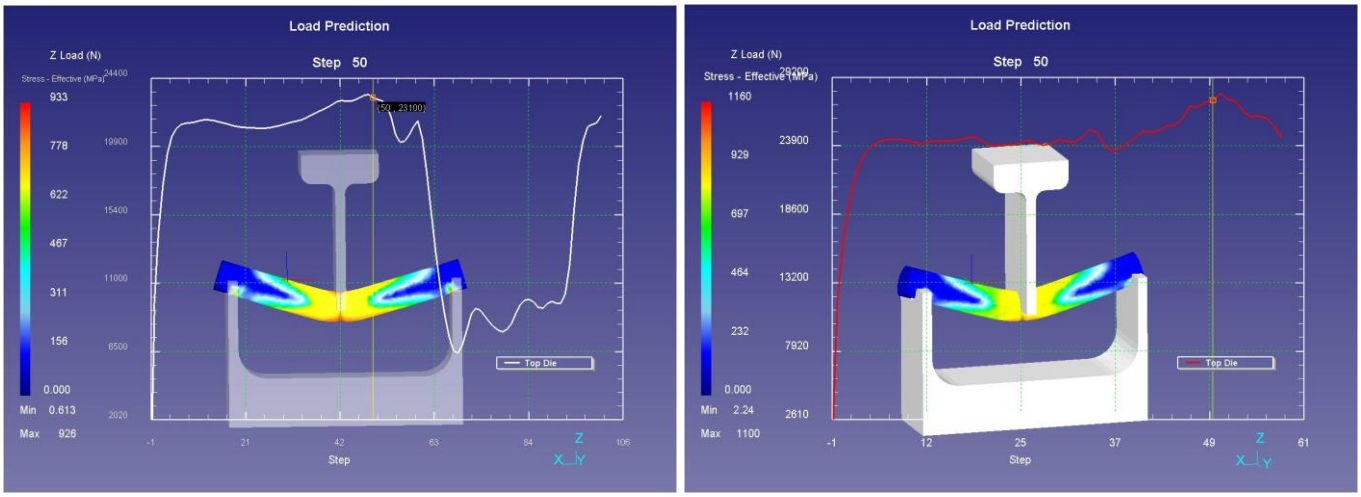
остаточно розділювали за схемою триточкової ломки згином при ударному навантаженні.

Для даної задачі у програмі Deform обрано вирішувач «Розріджених матриць» та ітераційний метод – Ньютона-Рафсона, тип розрахунку – $Normalized\ C\&L$.

Результати моделювання представлені на рис. 4.3–4.5.

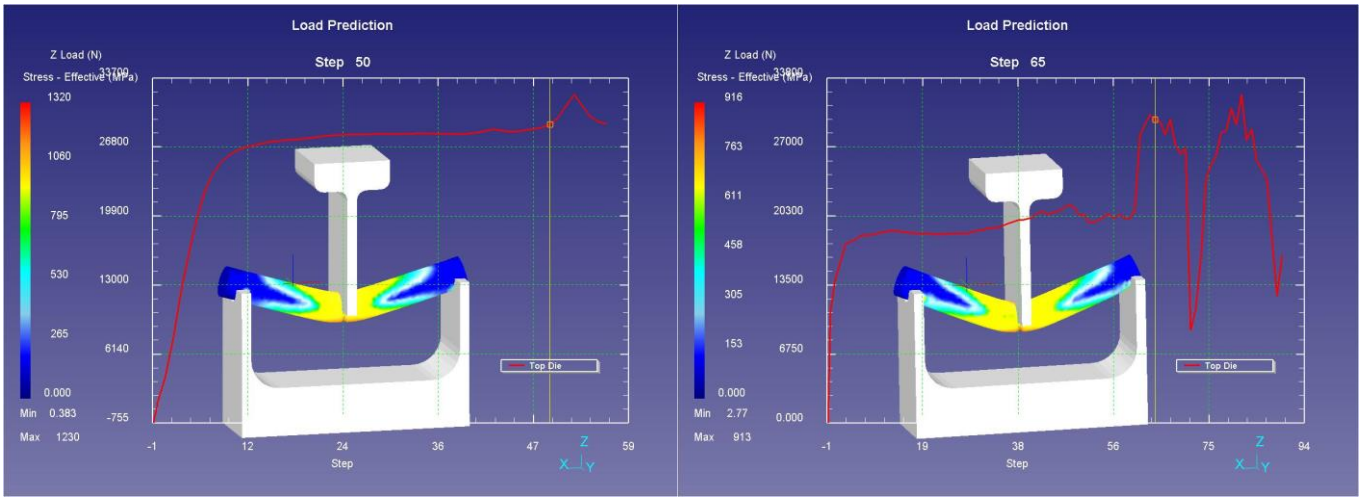



а б

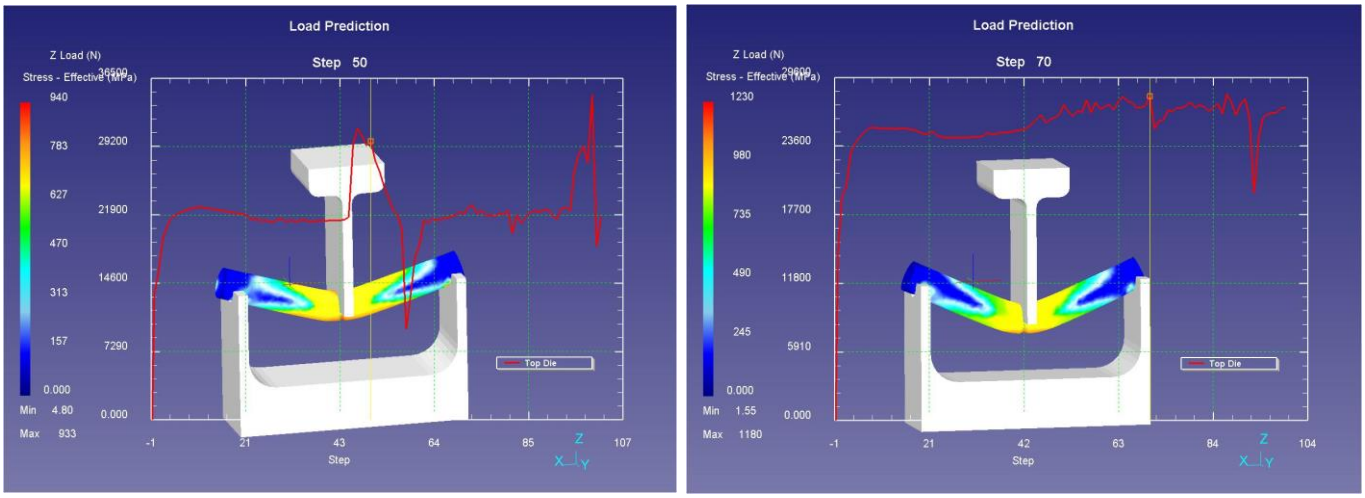



в г

Рис. 4.3 – Залежності сили на ломнику від кроку розрахунку при статичному навантаженні по схемі триточкової холодної ломки згином зразків із сталі: а – $AISI - 1020$; б – $AISI - 1045$; в – $AISI - 5135H$; г – $AISI - 1060$

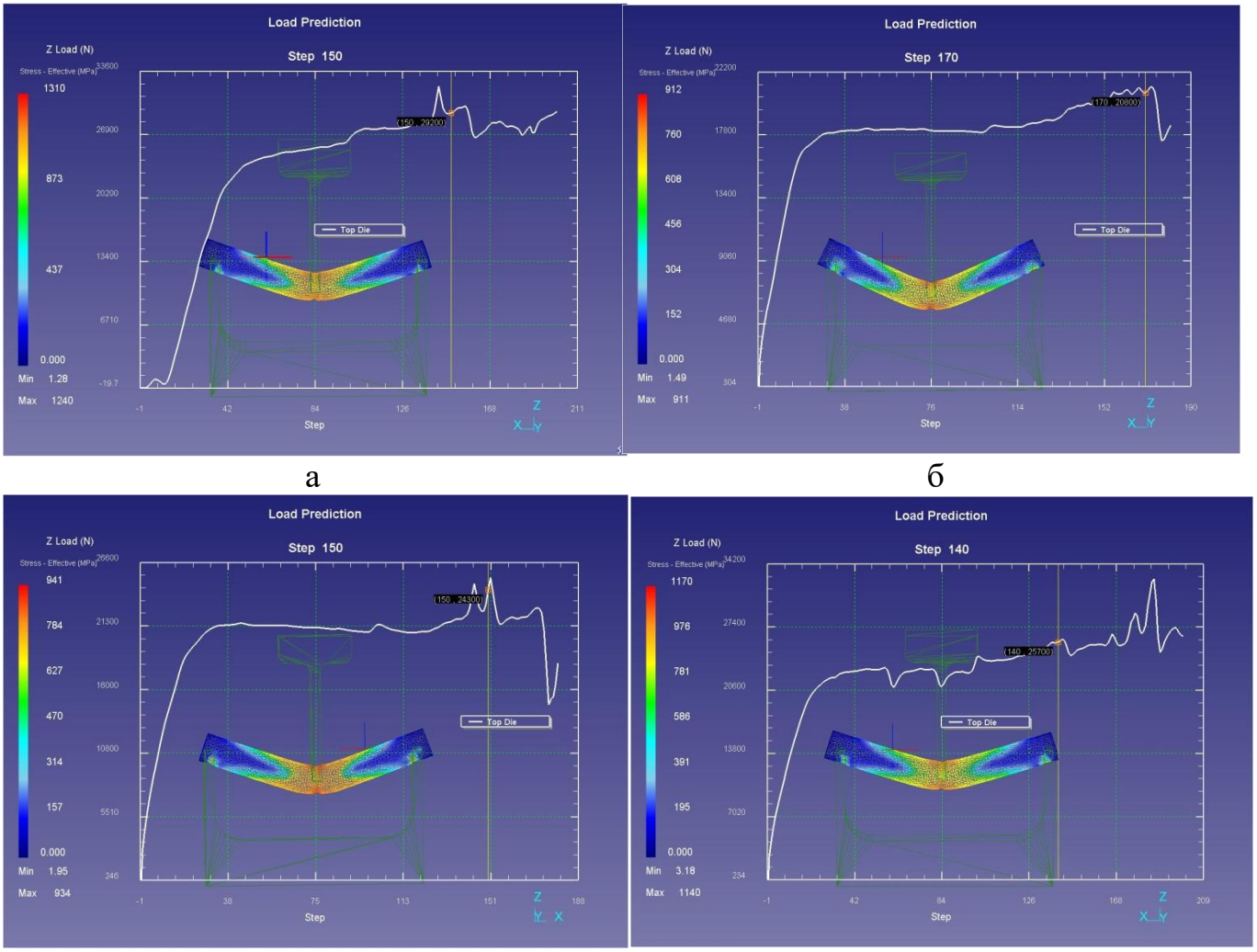



а б




в г

Рис. 4.4 – Залежності сили на ломнику від кроку розрахунку при динамічному навантаженні по схемі триточкової холодної ломки згином зразків із сталі: а – $AISI - 1020$; б – $AISI - 1045$; в – $AISI - 5135H$; г – $AISI - 1060$




а б

в г

Рис. 4.5 – Залежності сили на ломнику від кроку розрахунку при статико-динамічному навантаженні по схемі триточкової холодної ломки згином зразків із сталі: а – $AISI - 1020$; б – $AISI - 1045$; в – $AISI - 5135H$; г – $AISI - 1060$

## 4.3 Експериментальні дослідження процесу розділення сортового прокату за схемою триточкової холодної ломки згином при статичному, динамічному та статико-динамічному навантаженнях

Для перевірки теоретичних розрахунків проведено експериментальні дослідження процесу розділення сортового прокату за схемою триточкової холодної ломки згином при статичному, динамічному та статико-динамічному навантаженнях [296].

Для експериментів використовувався прес-молот оригінальної конструкції ДДМА (див. рис. 2.13) з параметрами: енергія удару $W = 0 \ldots 1300$ Дж; сила, яка

розвивається гідравлічним циліндром 5 (див. рис. 4.1, а) $F_{ст} = 0 \ldots 10$ кН; швидкість удару $V = 0 \ldots 12$ м/с; об'єм робочої рідини, що стискається $Q = 12 \cdot 10^{-3}$м$^3$; тиск робочої рідини $p = 0 \ldots 18$ МПа; маса баби $m_2 = 2{,}00$ кг. Жорсткість контакту баби та проміжного пуансону $C_2 = 100$ МН/м. В експерименті застосовувалася оригінальна експериментальна оснастка (див. рис. 2.15). На рис. 2.20 приведена схема реєстрації даних під час проведення експериментів [297 – 299].

Жорсткість контакту ломника 8 і зразка 12 (див. рис. 2.15, а) дорівнює $C_4 = 140$ МН/м, жорсткість контакту зразка 12 з опорами 10 також дорівнює $C_6 = 140$ МН/м.

Інформація з тензодатчиків через універсальний реєструючий пристрій багатоканального збору інформації $E - 440$ подавалася до ПЕОМ, де після обробки, з використанням оригінальної програми, зберігалася в табличному і графічному видах, зручних для подальшого аналізу.

Основні характеристики реєструючого пристрою $E - 440$: цифровий сигнальний процесор $ADSP - 2185$ з тактовою частотою роботи 48 МГц; 16 диференціальних каналів або 32 канали із загальною землею для аналогового введення з можливістю автоматичного коригування нуля; максимальна частота роботи 14-бітного $ADC - 400$ кН, що дозволяє використовувати цей пристрій для дослідження ударних процесів.

Завдяки кільком каналам реєстрації записувалися сигнали одночасно двома каналами: на ломнику і опорах (див. рис. 2.20).

В експерименті використовувалися циліндричні зразки з розмірами (див. рис. 4.1): $d = 16$ мм; $l = 70$ мм; $l_0 = 60$ мм; $m_6 = 0{,}25$ кг, виготовлені з сортового прокату із різних марок сталей, що знаходяться у «пластичному» – Сталь 20, «пружно-пластичному» – Сталь 45, Сталь 40Х та «крихкому» станах – Сталь 60С2А. Механічні властивості матеріалів зразків представлені у табл. 4.3.

На зразки попередньо за допомогою токарного різця наносили концентратори напружень у формі кільцевої канавки трикутного профілю з параметрами: глибина $\Delta H = 1{,}5$ мм; радіус при вершині $\Delta r = 0{,}15$ мм. Плече прикладення навантаження

– 30 мм. Розміри зон деформування та руйнування зразків визначали шляхом аналізу поверхні зламу з використанням мікроскопа.

Таблиця 4.3 – Механічні властивості матеріалів зразків

| Марка сталі | $\sigma_{02}$, МПа | $\sigma_B$, МПа | $\delta$, % | $\psi$, % | $HB$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Сталь 20 | 250 | 420 | 25 | 55 | 163 |
| Сталь 45 | 360 | 610 | 16 | 40 | 197 |
| Сталь 40Х | 324 | 588 | 14 | 50 | 168 |
| Сталь 60С2А | 1175 | 1270 | 6 | 25 | 269 |

Зразки при динамічному навантаженні розділяли способом ломки за схемою триточкового згину при швидкості удару $V = 12$ м/с. Типові осцилограми ломки зразків за схемою триточкової холодної ломки згином при динамічному навантаженні показані на рис. 4.6.

Згладжені графіки зміни силових параметрів процесу триточкової холодної ломки згином залежно від часу для зразків з різних матеріалів при статичному, динамічному і статико-динамічному навантаженнях представлені на рис. 4.7 – 4.9 [292, 300, 301].

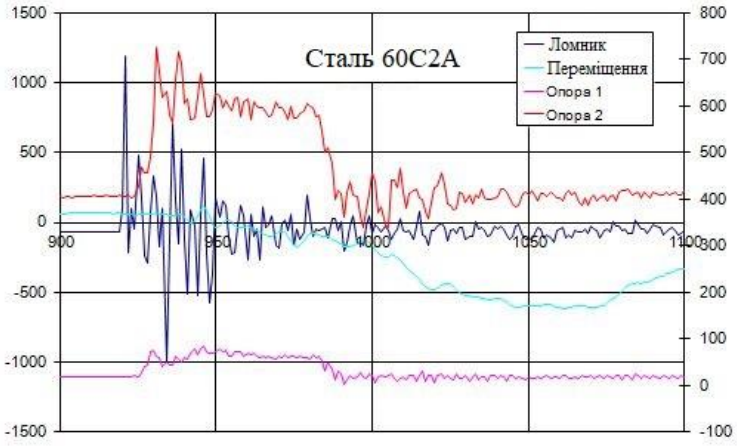



Рис. 4.6 – Типові осцилограми холодної ломки зразків за схемою триточкової холодної ломки згином при динамічному навантаженні – залежності сил на ломнику та опорах, переміщення ломника (покази чотирьох каналів, що знімаються одночасно) для сталі 60С2А [302 – 304].

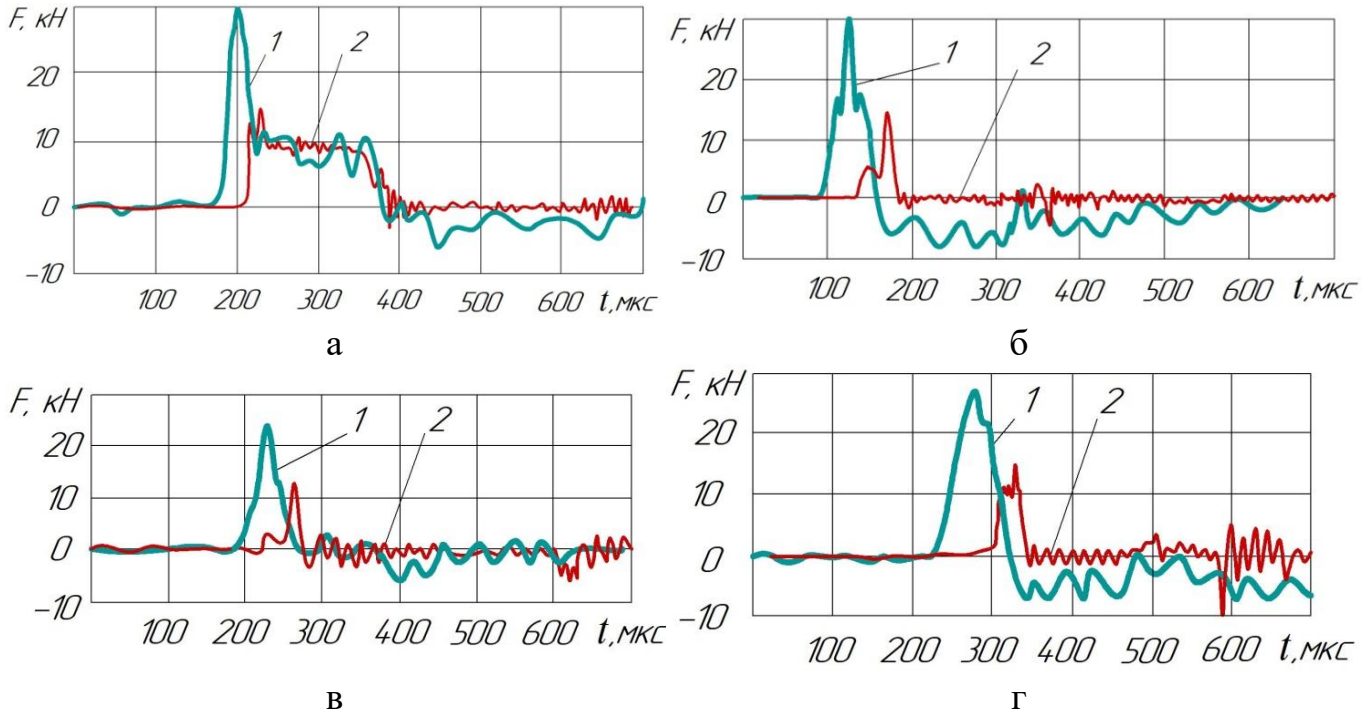



Рис. 4.7 – Експериментальні залежності зміни сил на контакті ломника зі зразком $F_4 = f(t)$ (1) і зразка з опорами $F_6 = f(t)$ (2) (показання двох каналів, які знімаються одночасно) для зразків із сталей: а – Сталь 20; б – Сталь 45; в – Сталь 40Х; г – Сталь 60С2А при статичному навантаженні [292]

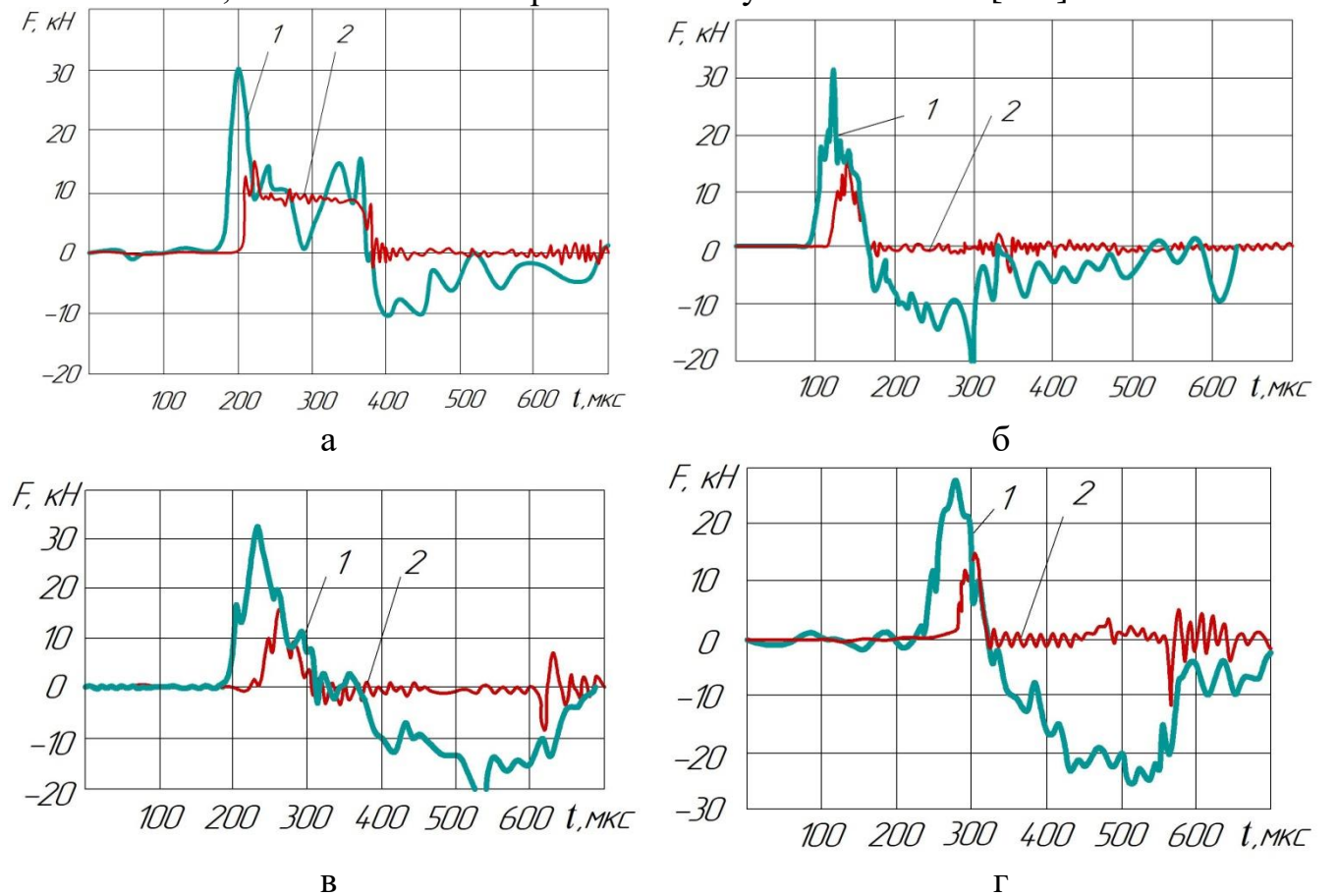



Рис. 4.8 – Експериментальні залежності зміни сил на контакті ломника зі зразком $F_4 = f(t)$ (1) і зразка з опорами $F_6 = f(t)$ (2) (показання двох каналів, які

знімаються одночасно) для зразків із сталей: а – Сталь 20; б – Сталь 45; в – Сталь 40Х; г – Сталь 60С2А при динамічному навантаженні [292]

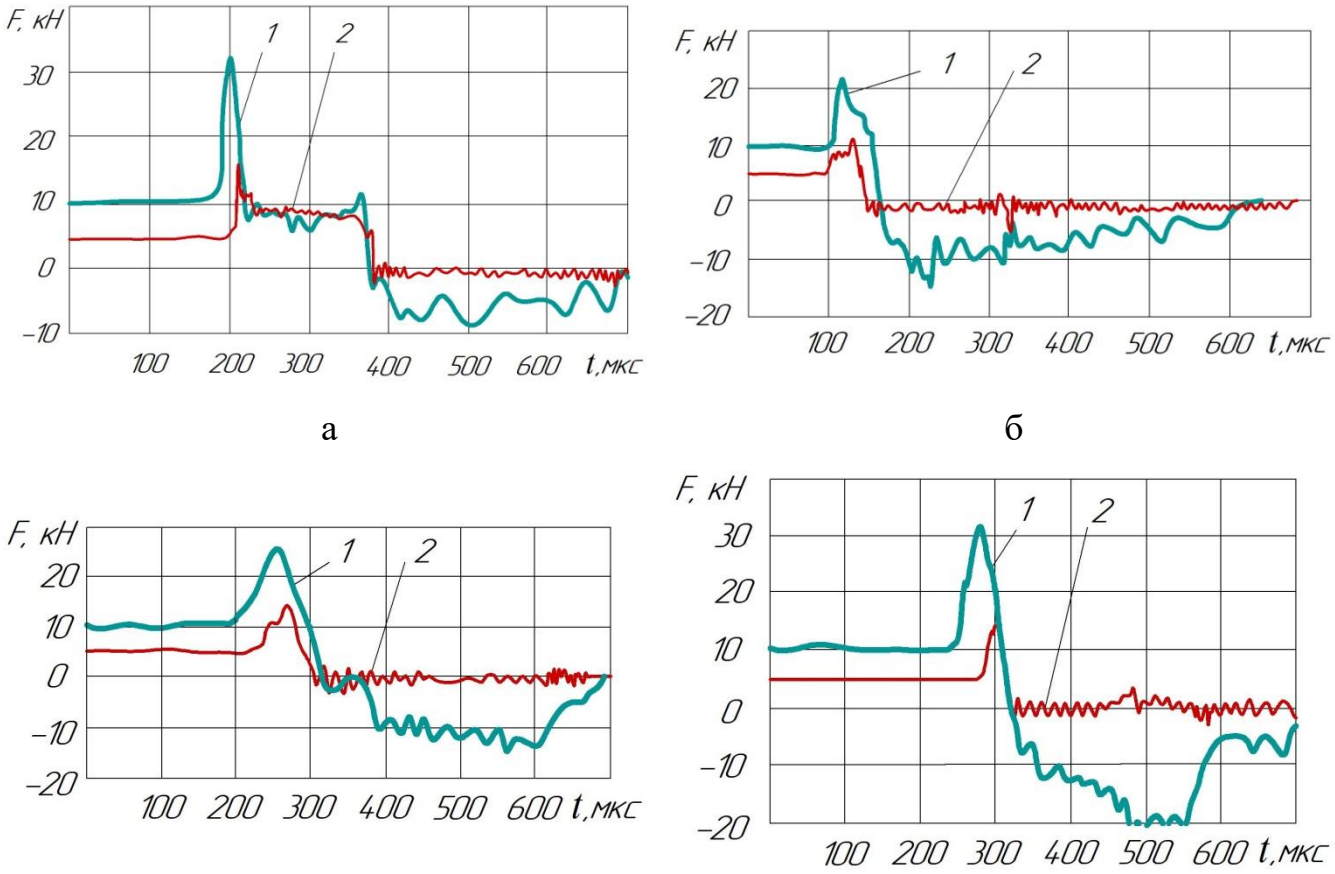



Рис. 4.9 – Експериментальні залежності зміни сил на контакті ломника зі зразком $F_4 = f(t)$ (1) і зразка з опорами $F_6 = f(t)$ (2) (показання двох каналів, які знімаються одночасно) для зразків із сталей: а – Сталь 20; б – Сталь 45; в – Сталь 40Х; г – Сталь 60С2А при статико-динамічному навантаженні [292]

### 4.4 Аналіз результатів теоретичних і експериментальних досліджень

Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень процесу триточкової холодної ломки згином зразків при статичному, динамічному і статико-динамічному навантаженнях представлені у табл. 4.4, 4.5.

Аналіз результатів експериментальних досліджень (див. рис. 4.8) показує відсутність контакту між зразком та опорами у початковій фазі навантаження при динамічному навантаженні [290, 291, 305].

Таблиця 4.4 – Значення максимальної сили на ломнику при статичному, динамічному і статико-динамічному навантаженнях, отриманих в результаті теоретичних і експериментальних досліджень [292]

| Матеріал зразка | Сила на ломнику, кН | | | | | | Коефіцієнт динамічності $k_д$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Статика | | Динаміка | | Статико-динаміка | | |
| | теорія | експе-римент | теорія | експе-римент | теорія | експе-римент | |
| Сталь 20 $(AISI-1020)$ | 28,7 | 29,5 | 29,9 | 30,2 | 31,8 | 32,0 | 1,02 |
| Сталь 45 $(AISI-1045)$ | 29,3 | 29,7 | 30,0 | 31,7 | 21,2 | 22,1 | 1,07 |
| Сталь 40Х $(AISI-5135H)$ | 23,1 | 23,9 | 30,6 | 31,7 | 25,5 | 26,3 | 1,33 |
| Сталь 60С2А $(AISI-1060)$ | 27,3 | 28,1 | 27,4 | 28,3 | 30,2 | 30,9 | 1,01 |

Таблиця 4.5 – Значення роботи деформування на ломнику при статичному, динамічному і статико-динамічному навантаженнях, отриманих в результаті теоретичних і експериментальних досліджень [292]

| Матеріал зразка | Робота, Дж | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Статика | Динаміка | Статико-динаміка | |
| | | | статика | динаміка |
| Сталь 20 $(AISI-1020)$ | 397 | 406 | 90 | 350 |
| Сталь 45 $(AISI-1045)$ | 381 | 384 | 84 | 336 |
| Сталь 40Х $(AISI-5135H)$ | 320 | 333 | 98 | 272 |
| Сталь 60С2А $(AISI-1060)$ | 362 | 448 | 104 | 376 |

Причиною відриву зразка від опор є інерція його половинок та висока жорсткість опор при відносно малій жорсткості зразка. Це підтверджує висновки про те, що у початковий час зразок відривається від опор.

Максимальні значення сил, отриманих в результаті теоретичних і експериментальних досліджень та моделювання з програмою Deform добре узгоджуються між собою (розбіжність не перевищує 5%). Наприклад, отримане експериментальне значення максимальної сили при динамічному навантаженні для зразків із сталі 20 $F_4 \cong 30{,}2$ кН добре корелюється з розрахунковим значенням, отриманим відповідно до розробленої математичної моделі [292] – $F_4 \cong 29$ кН.

Порівняння теоретичних результатів, отриманих за допомогою математичної моделі, з експериментальними даними показує, що за амплітудою і періодом коливань теоретична крива поступається експериментальній (див. рис. 4.2, 4.7 – 4.9).

Час, за який відбувається процес руйнування для зразків з різних марок сталей, становив: Сталь 20 – $t \cong 0{,}2$ мс; Сталь 45 – $t \cong 0{,}08$ мс; Сталь 40Х – $t \cong 0{,}12$ мс; Сталь 60С2А – $t \cong 0{,}09$ мс, що відповідає розрахунковій моделі.

В експерименті зразки при статико-динамічному навантаженні розділяли способом ломки за схемою триточкової холодної ломки згином при попередньому статичному зусиллі $F_{\text{ст}} = 10$ кН.

Аналіз результатів експериментів (див. рис. 4.9) показує, що наявність попереднього статичного навантаження виключає відрив зразка від опор, що підтверджує адекватність математичної моделі. Попереднє статичне навантаження зразка на прес-молоті підвищує його жорсткість і забезпечує його вихідне зміщення на контакті з опорами.

Час, за який відбувається процес руйнування для зразків з різних марок сталей при статико-динамічному навантаженні відповідає часу при динамічному навантаженні.

### *4.4.1 Дослідження впливу швидкості навантаження на величину коефіцієнта динамічності*

Ударом називається явище, коли при зіткненні тіла, що вдаряє, і зразка їх відносна швидкість змінюється на скінченну величину за проміжок часу, нескінченно малий у порівнянні з періодом вільного коливання зразка. Звичайно цей час становлять частки секунди.

Визначення величин виникаючих при ударі зусилля, напружень і деформацій, через досить малу тривалість зіткнення, представляє відому проблему і є однією із найбільш складних задач опору матеріалів. Короткочасність дії навантаження й поява хвильових ефектів з ростом швидкості деформування значно утрудняють аналіз поведінки матеріалів і вплив швидкості деформування на їх механічні властивості.

Відношення величин напружень і деформацій при статичному і динамічному навантаженнях пов’язане з коефіцієнтом динамічності, який також може бути визначений через відношення сил ломки при статичному $F_{\text{ст}}$ і динамічному $F_{\text{д}}$ деформуванні:

$$k_{\text{д}} = \sigma_{д}/\sigma_{ст} = F_{д}/F_{ст}\,. \qquad (4.14)$$

Численні експериментальні дані свідчать про чутливість матеріалів до швидкості навантаження. Швидкість навантаження змінює характеристики міцності залежно від структури, складу й технології їх одержання. Однак опубліковані експериментальні дані самі по собі суперечливі і їх обсяг недостатній, особливо стосовно до процесів розділення сортового прокату на мірні заготовки.

Порівняння максимальної сили ломки при статичному й ударному навантаженнях оцінювалося коефіцієнтом динамічності $k_{\text{д}}$, який для різних марок сталей склав відповідно: Сталь 20 – 1,02; Сталь 45 – 1,07; Сталь 40Х – 1,33; Сталь 60С2А – 1,01 (див. табл. 4.4). Ці результати добре узгоджуються з даними, наведеними в літературі [305].

### *4.4.2 Дослідження впливу швидкості навантаження на енергосилові параметри розділення при триточковій холодній ломці згином*

Аналіз відомих експериментальних даних [306] показав, що навіть при загальному крихкому характері руйнування матеріалу, у вершині концентратору напружень присутні пластичні деформації, спостерігається локалізація деформації й смуги зсуву, витяжка берегів тріщини й в'язке їх підростання. Дотепер відсутня єдина точка зору на критерії переходу від в'язкого руйнування до крихкого, особливо при динамічному навантаженні.

Величина сили ломки при статико-динамічному навантаженні збільшується, у порівнянні зі статичним і динамічним навантаженнями, для сталей: Сталь 20 та Сталь 60С2А і зменшується для сталей: Сталь 45 та Сталь 40Х (див. табл. 4.4).

У самому загальному випадку робота, яка затрачена на руйнування, послідовно складається з декількох складових: на пружне деформування до руйнування, загальне й локальне (у місцях контакту із ломником і опорами) пластичне деформування, надання кінетичної енергії зразку, зародження й поширення тріщини.

Для визначення величини енергії руйнування зразків і тривалості проскакування тріщини по зонах руйнування побудовано графіки зміни сили на ломнику і опорах для різних марок сталей при ударному навантаженні ($V = 12$ м/с) за способом триточкової холодної ломки згином (глибина концентратора напружень $\Delta H = 1{,}5$мм) (рис. 4.10).

На підставі проведених розрахунків та виконаних експериментальних досліджень процесу холодної ломки згином при статичному, динамічному і статико-динамічному навантаженнях можна побудувати якісну картину і встановити співвідношення між силою і роботою деформування (рис. 4.11) [307, 308].

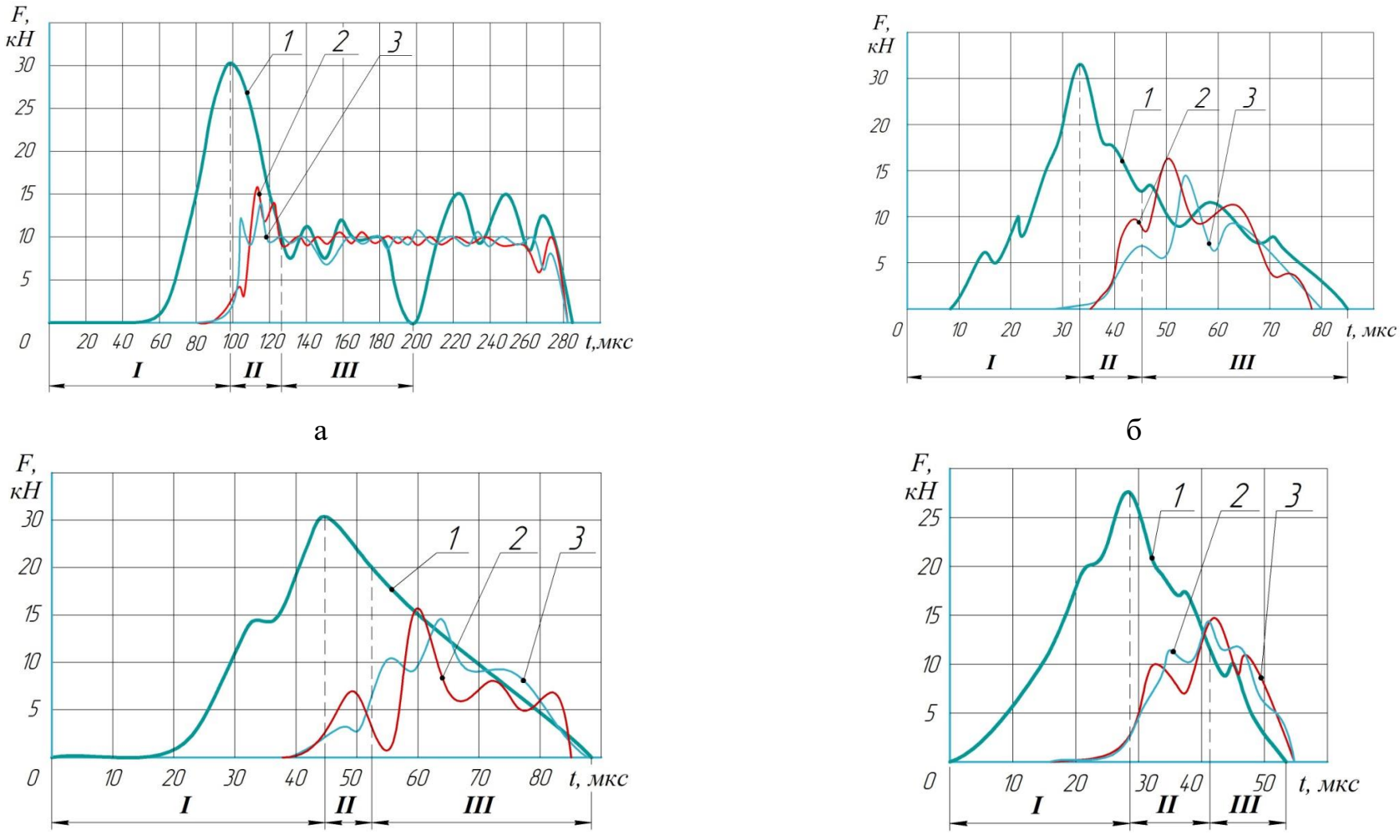



Рис. 4.10 – Графіки зміни $F(t)$ на ломнику (1) і опорах (2,3) (показання з трьох каналів, що реєструються одночасно) для різних марок сталей при ударному навантаженні ($V = 12$ м/с) за способом триточкової холодної ломки згином ($\Delta H = 1{,}5$ мм): а – Сталь 20; б – Сталь 45; в – Сталь 40Х; г – Сталь 60С2А; *I* – зона зародження тріщини; *II* – зона крихкого руйнування; *III* – зона в'язкого руйнування

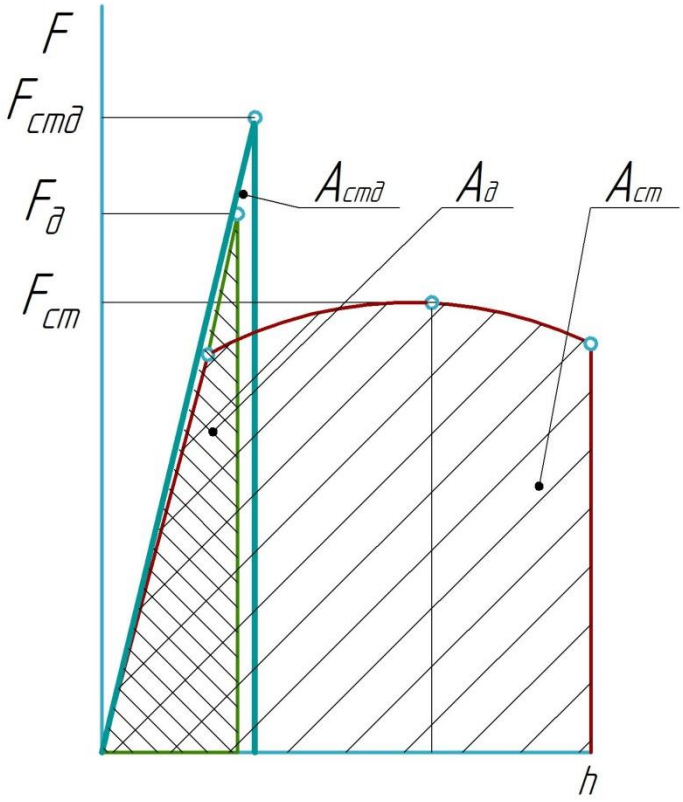



Рис. 4.11 – Співвідношення між силою і роботою деформування при статичній, динамічній і статико-динамічній ломках згином

За отриманими діаграмами $F(t)$ (див. рис. 4.10) для зразків з різних марок сталей, що мають досить високу роздільну здатність по обох координатах, можна визначити енергію, потрібну для руйнування зразка, а також її складові: енергію до моменту утворення тріщини (зона $I$ – енергія зародження тріщини), енергію крихкого руйнування (зона $II$), енергію в'язкого руйнування (зона $III$).

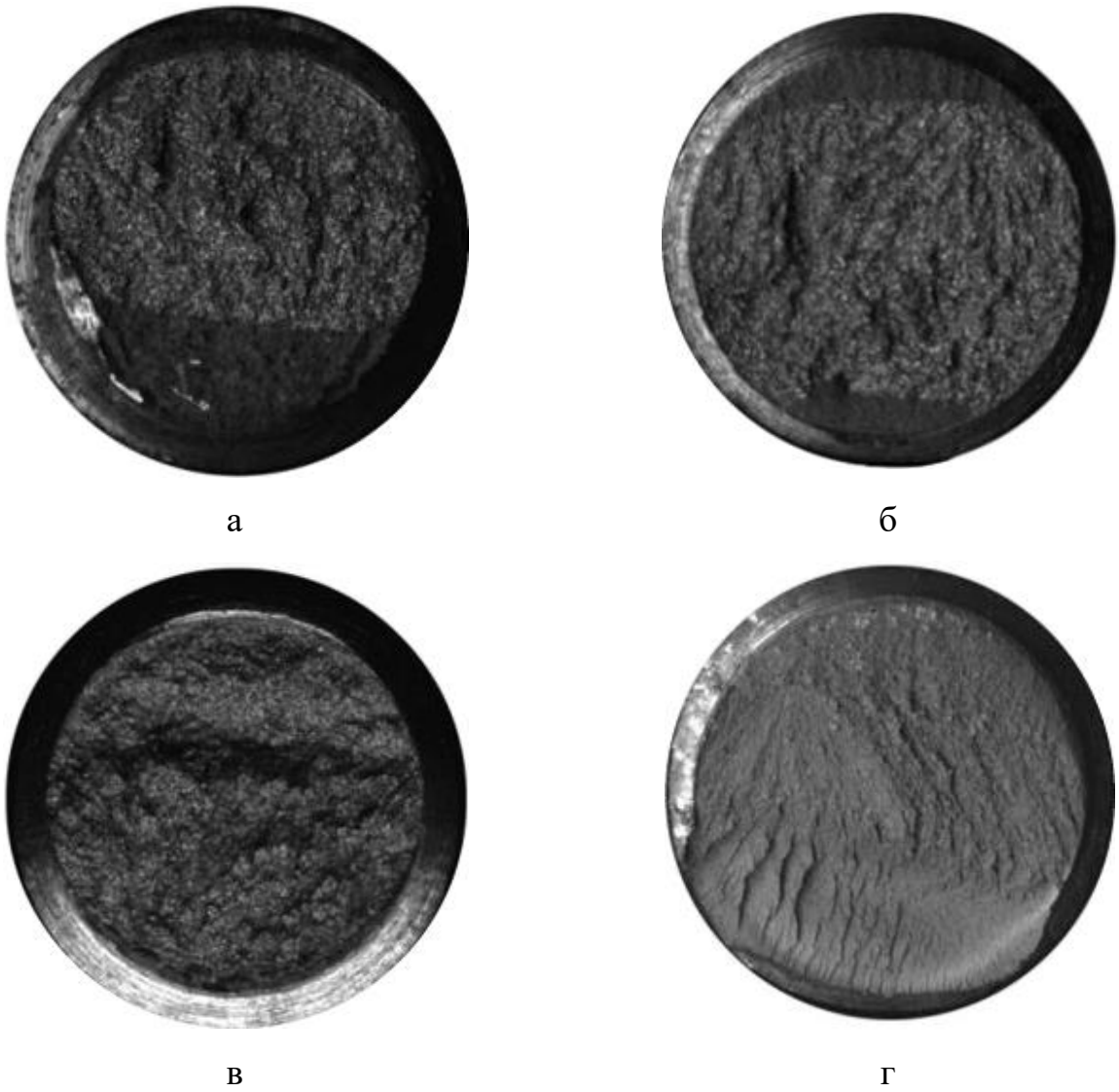
Крім того, враховуючи високі характеристики швидкодії системи й можливість нагромадження великого обсягу даних, можна вибірково розглядати отриманий сигнал тривалістю у долі мілісекунд, що дозволяє оцінювати швидкість поширення тріщин.

Розміри зон деформування й руйнування зразків визначали шляхом аналізу поверхні зламу з використанням мікроскопа [309].

Фотографії зразків із різних марок сталей, розділених за схемою триточкової холодної ломки згином при динамічному і статико-динамічному навантаженнях, представлені на рис. 4.12, 4.13. Вимірювання геометричних параметрів, що

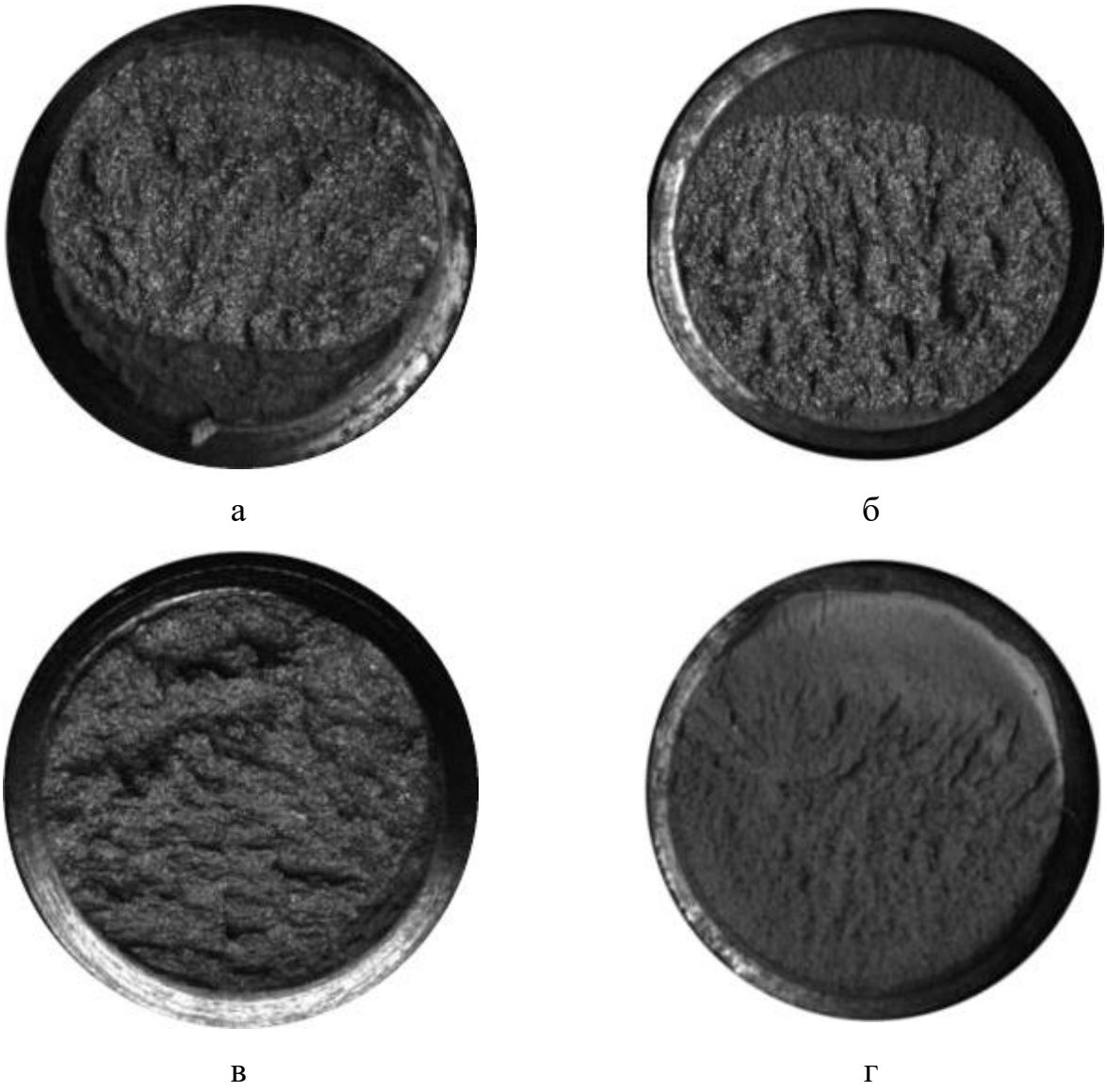
характеризують геометричну точність розділених зразків, проводили методом макроструктурного аналізу шляхом вимірів абсолютних та відносних величин спотворень геометричної форми з використанням універсального вимірювального інструменту та мікроскопа (див. рис. 1.1, в).

Аналіз результатів обробки експериментів показує, що більша частина енергії витрачається на зародження й в'язке підростання тріщини, тоді як енергія, яка витрачається на крихке руйнування, є меншою за величиною, що узгоджується з даними експерименту [306].



а б в г

Рис. 4.12 – Фотографії заготовок, отриманих при динамічному навантаженні способом холодної ломки згином: а – Сталь 20; б – Сталь 45; в – Сталь 40Х; г – Сталь 60С2А [292]



а б

в г

Рис. 4.13 – Фотографії заготовок, отриманих при статико-динамічному навантаженні способом холодної ломки згином: а – Сталь 20; б – Сталь 45; в – Сталь 40Х; г – Сталь 60С2А [292]

Величину складових енергії визначали шляхом перетворення залежності «сила $F$ – час $t$» у залежність «сила $F$ – переміщення $H$». Результати обробки експериментів представлені у табл. 4.6 [304, 309].

Тривалість проскакування тріщини по зоні крихкого руйнування (зона $II$) (див. рис. 4.10) представлена у табл. 4.7. Це дає можливість із достатньою точністю оцінити середню швидкість поширення крихкої тріщини (довжину тріщини визначали по зламу зруйнованого зразка (див. рис. 4.12, 4.13)). Результати

розрахунків середньої швидкості поширення крихкої тріщини представлені у табл. 4.7.

Швидкість розвитку в'язкого руйнування у зразках із різних марок сталей склала у середньому $15…30$ м/с.

Отримані результати добре узгоджуються із оцінкою, отриманою за результатами випробувань [306].

Таблиця 4.6 – Значення загальної енергії деформування і руйнування, а також її складових при швидкості $V = 12$ м/с

| Марка сталі | Загальна енергія деформування і руйнування, Дж | Енергія зародження тріщини, Дж | Енергія крихкого руйнування, Дж | Енергія в'язкого руйнування, Дж |
|---|---|---|---|---|
| Сталь 20 | 406 | 206 | 60 | 140 |
| Сталь 45 | 384 | 200 | 54 | 130 |
| Сталь 40Х | 333 | 160 | 40 | 133 |
| Сталь 60С2А | 448 | 225 | 45 | 178 |

Таблиця 4.7 – Результати розрахунків середньої швидкості поширення крихкої тріщини

| Марка сталі | Тривалість проскакування тріщини по зоні крихкого руйнування, мкс | Середня швидкість поширення тріщини, м/с |
|---|---|---|
| Сталь 20 | 33 | 120 |
| Сталь 45 | 10 | 300 |
| Сталь 40Х | 8 | 250 |
| Сталь 60С2А | 20 | 270 |

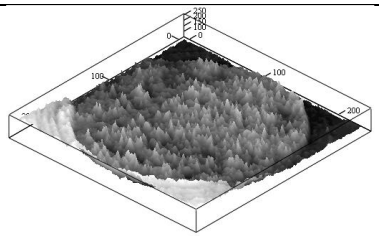
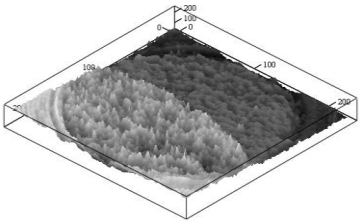
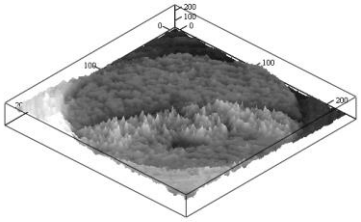
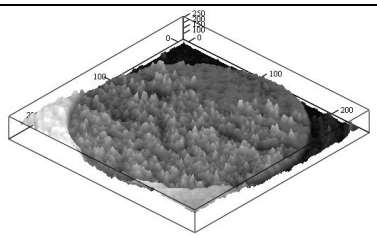
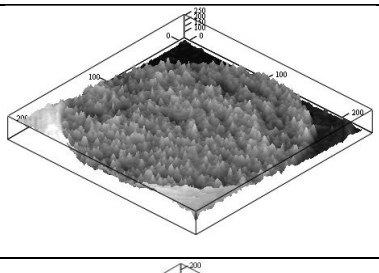
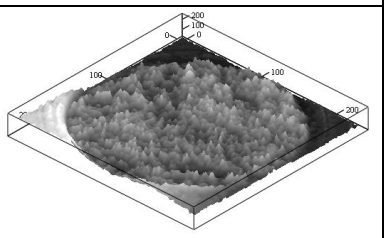
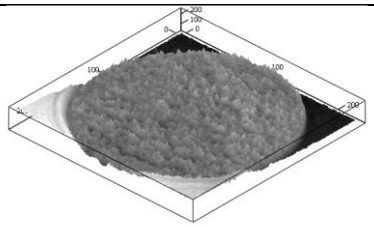
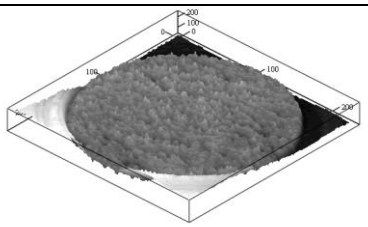
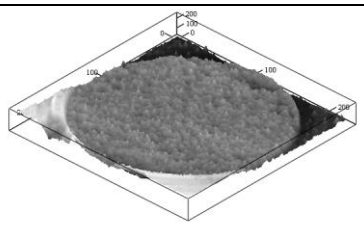
### *4.4.3 Дослідження впливу статичного, динамічного і комбінованого статико-динамічного навантажень на геометричну точність заготовок*

Розміри зон деформування й руйнування зразків (див. рис. 4.12, 4.13) визначали шляхом аналізу поверхні зламу з використанням мікроскопа за схемою (див. рис. 1.1, в).

Результати фрактального аналізу торців заготовок із сталей з різними механічними характеристиками за схемою триточкової ломки згином при статичному, динамічному й статико-динамічному навантаженнях представлені в табл. 4.8.

Вибір сталей зроблений таким чином, щоб мати по одному представнику із трьох класів: Сталь 20 – клас «пластичних» матеріалів, Сталь 45 – клас «пружно-пластичних» матеріалів, Сталь 60С2А – клас «крихких» матеріалів.

Таблиця 4.8 – Фотографії торців заготовок

| Марка сталі | Статичне навантаження | Динамічне навантаження | Статико-динамічне навантаження |
|---|---|---|---|
| Сталь 20 |  |  |  |
| Сталь 45 |  |  |  |
| Сталь 60С2А |  |  |  |

Аналіз геометричної точності заготовок дозволив зробити висновок про те, що з підвищенням швидкості деформування вона поліпшується. Найбільш висока геометрична точність заготовок спостерігається при статико-динамічному навантаженні.

Даний висновок зроблено на підставі порівняння величин шорсткості торців заготовок, отриманих при статичному, динамічному й статико-динамічному навантаженнях (рис. 4.14). Для сталі 20 шорсткість при статичному навантаженні склала $Rz218$, при динамічному (ударному) навантаженні – $Rz183$, а при статико-динамічному навантаженні на 21% менше – $Rz172$. Для сталі 45 шорсткість при статико-динамічному навантаженні зменшується на 25%: статика – $Rz185$, динаміка – $Rz160$, статико-динаміка – $Rz140$. Для сталі 60С2А показники шорсткості найнижчі й перебувають у діапазоні $Rz127 \dots Rz140$. Зменшення шорсткості склало до 10%: статика – $Rz140$, динаміка – $Rz135$, статико-динаміка – $Rz127$.

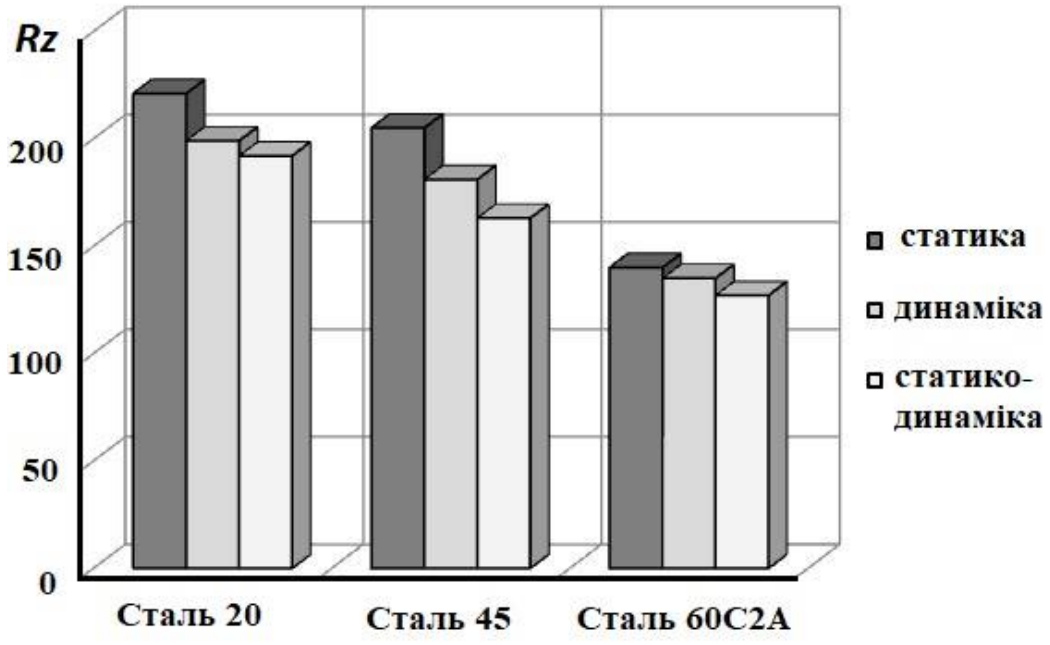



Рис. 4.14 – Величина шорсткості торців заготовок, отриманих при статичному, динамічному й статико-динамічному навантаженнях з різних марок сталей

Аналіз фотографій торців заготовок (див. рис. 4.12, 4.13) показує, що найбільш висока геометрична точність заготовок спостерігалася при розділенні

зразків із сталі 60С2А. Відхилення траєкторії тріщини дорівнює нулю, області пластичної деформації відсутні, поверхня руйнування матова, дрібнозерниста. Висота рельєфу торця відповідає розміру зерна сталі зразка. Принципової різниці в якості заготовок при динамічному й статико-динамічному навантаженнях не виявилося.

При розділенні зразків зі сталей, що знаходяться у «пружно-пластичному» стані (Сталь 45, Сталь 40Х) спостерігалася задовільна геометрична точність заготовок. Для сталі 45 спостерігалася більш якісна поверхня розділення. На заготовках присутні сліди пластичної деформації та розгалуження тріщини. Відхилення траєкторії тріщини дорівнює практично нулю. Матові і дрібнозернисті ділянки відповідають зоні крихкого руйнування, а крупнозернисті – зоні в'язкого руйнування, де зерна розподіляються віялоподібно від концентратора напружень у напрямку розвитку швидкої тріщини. Шорсткість поверхні розділення від статичного до динамічного і статико-динамічного навантажень – зменшується.

При розділенні зразків із сталі 40Х злам рубцьований, спостерігається більша шорсткість поверхні та неглибокі фляки.

При статичному навантаженні зразків зі сталі у «пластичному» стані (Сталь 20) руйнування відбувалося при кутах згину $(20\ldots25)^0$. Поверхня зламу має матову й крупнозернисту ділянки, спостерігаються одиничні відколи. Шорсткість поверхні розділення зменшується при динамічному і статико-динамічному навантаженнях. Кут згину зразка до руйнування зменшується до $15^0$.

### *4.4.4 Дослідження впливу величини попереднього статичного навантаження на технологічний режим навантаження при комбінованій ломці згином*

Розрахунки, проведені з використанням програмного комплексу Deform та експериментальні дослідження статико-динамічної холодної ломки згином дозволили визначити величину статичної сили для отримання заготовок високої геометричної точності.

Крок збільшення ходу ломника у діапазоні $H = 1…3$ мм приймали рівним 0,2 мм. Інші параметри моделювання відповідали табл. 4.1.

Для даної задачі у програмі Deform обрано вирішувач «Розріджених матриць» та ітераційний метод – Ньютона-Рафсона, тип розрахунку – $Normalized\ C\&L$.

Результати моделювання для зразків із сталі 20 представлені на рис. 4.15.

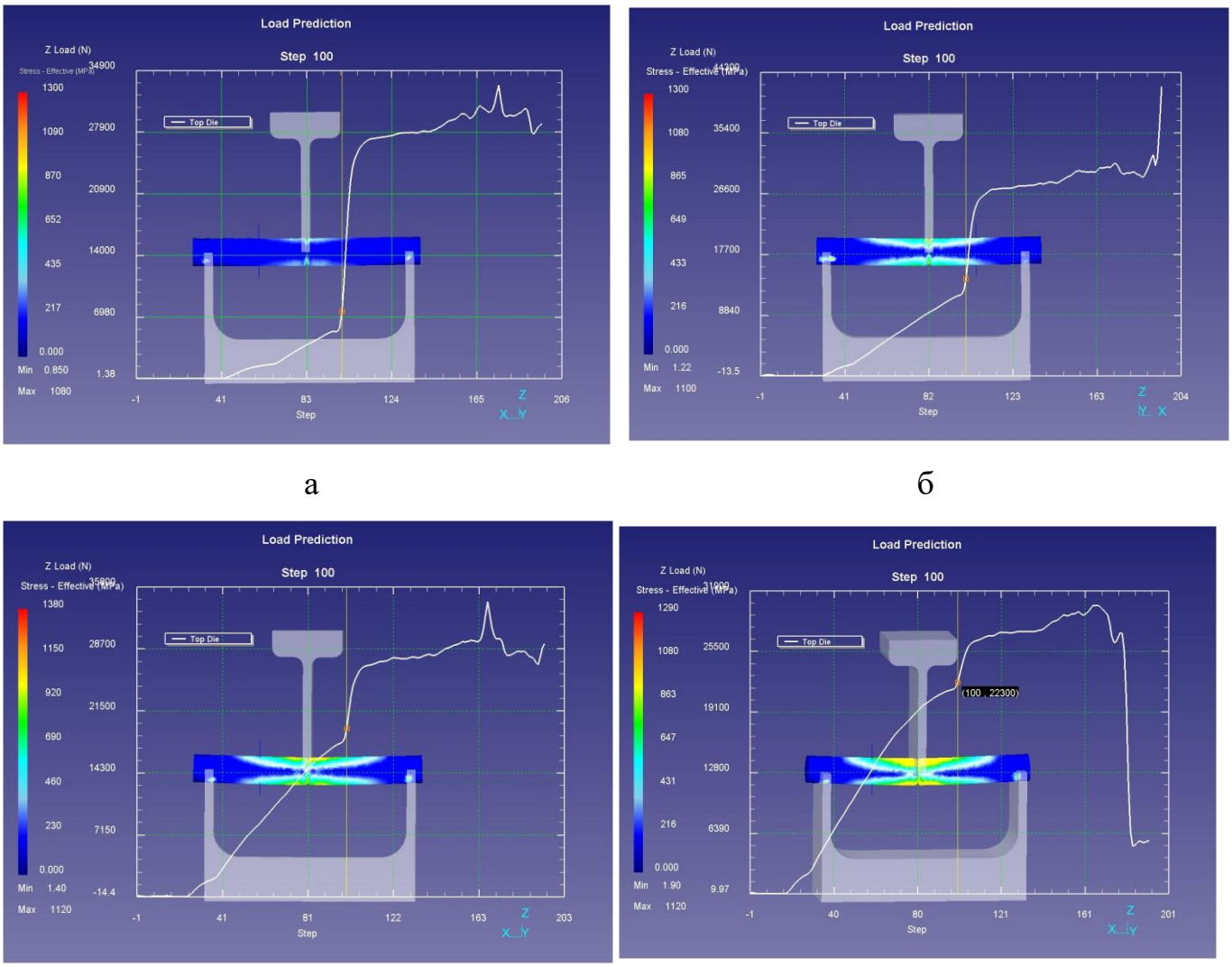



Рис. 4.15 – Моделювання впливу величини ходу ломника $H$ у фазі статичного навантаження на процес статико-динамічної триточкової холодної ломки згином зразків із сталі 20 – $F = f(step)$: а – $H = 1{,}0$ мм; б – $H = 1{,}5$ мм; в – $H = 2{,}0$ мм; г – $H = 2{,}5$ мм

Отримані результати можна представити у вигляді залежності величини сили $F_{\text{ст}}$ на ломнику від ходу $H$ на стадії статичного навантаження при реалізації статико-динамічної ломки прокату із сталі 20 (рис. 4.16).

Аналіз графіку $F_{\text{ст}} = f(H)$ та результати проведених експериментів дозволили виявити раціональний діапазон ходу ломника для ефективної статико-динамічної ломки прокату – $H = 1{,}0 \ldots 1{,}5$ мм. Таким чином, величину статичної сили при статико-динамічній холодній ломці згином слід вибирати не менше 25% від сили ломки прокату згином.

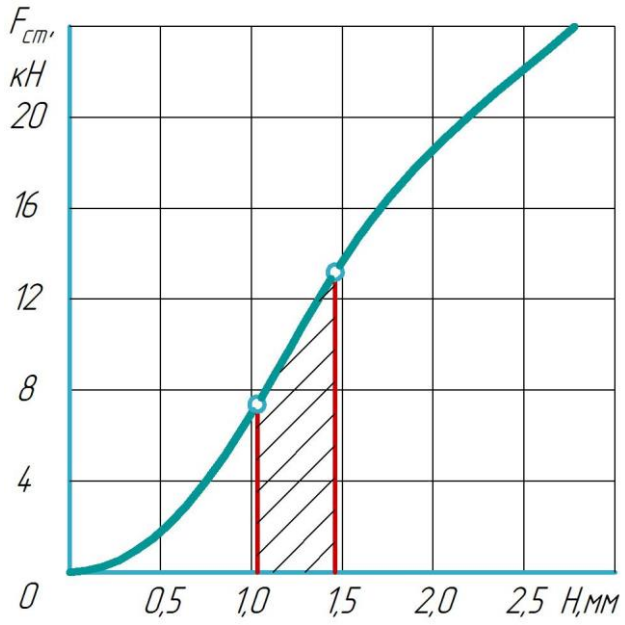



Рис. 4.16 – Залежність величини статичної сили від ходу ломника $F_{\text{ст}} = f(H)$ для зразків із матеріалу Сталь 20

## 4.5 Перспективні конструкції обладнання для комбінованого статико-динамічного навантаження при розділенні сортового прокату

Як правило, для створення комбінованого навантаження при безвідходному розділенні сортового прокату застосовують прес-молоти. На кафедрі основ проектування машин ДДМА розроблений штамп для консольної холодної ломки згином (рис. 4.17), який призначений для установлення на стіл прес-молота конструкції ДДМА з енергією удару 40 кДж. Після подачі прокату 1 до упора, він

затискається за допомогою механізму затиску (не показаний). На прокат 1 наноситься концентратор напружень прорізанням пазу абразивним колом за допомогою механізму нанесення концентратора напружень 2. Зусиллям пресової частини створюється попереднє статичне навантаження. Після чого по ломнику 3 наноситься удар. Після розділення заготовки цикл роботи поновлюється.

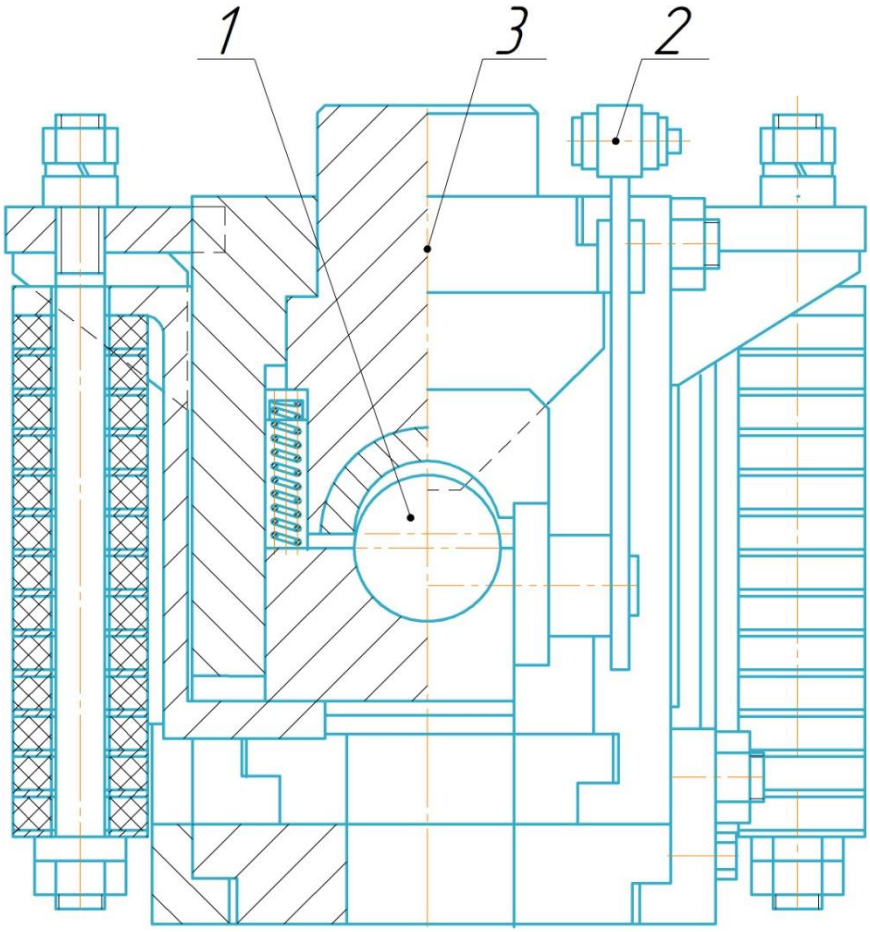



Рис. 4.17 – Штамп для ломки прокату

Статико-динамічне навантаження можна створити за рахунок спільного застосування клиношарнірного механізму і гідропружного циліндру прес-молота (рис. 4.18). Таке рішення дозволяє усунути заклинювання і знизити необхідну потужність приводу. Стає можливим використовувати прес-молот при малих кутах клина, що підвищує силу технологічного навантаження, оскільки ударне деформування заготовки за допомогою гідропружного циліндру знімає навантаження з клиношарнірного механізму. Поєднання клиношарнірного

механізму і гідропружного циліндру забезпечує зниження енергії удару прес-молоту, підвищує стійкість інструменту.

Прес-молот з клиношарнірним механізмом з увігнутим клином містить станину 1, клиношарнірний механізм та гідропружний циліндр, що складається із циліндру 2 і штоку 3, який встановлено з можливістю створення герметичного кільцевого ущільнення з дном внутрішньої порожнини циліндра 2 для утворення порожнин високого 4 та низького 5 тиску.

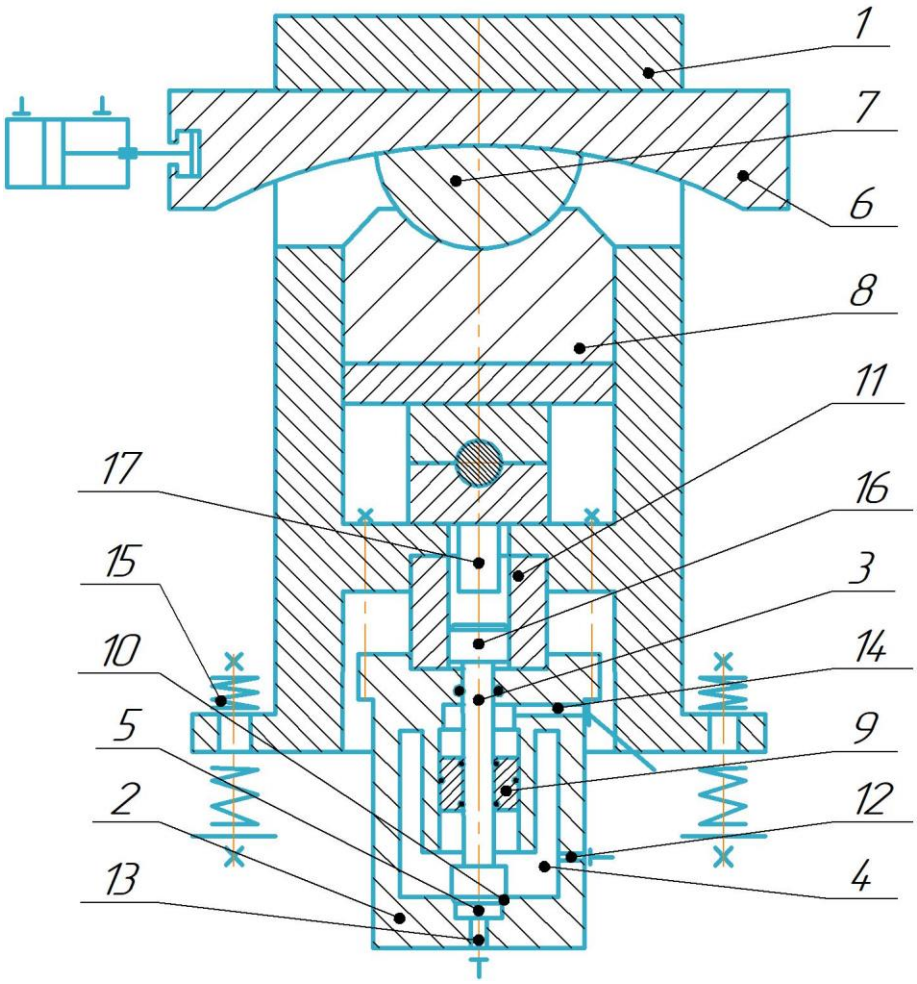



Рис. 4.18 – Прес-молот з клиношарнірним механізмом з увігнутим клином і гідропружним циліндром [310]

Клиношарнірний механізм складається із увігнутого клина 6, розміщеного з можливістю взаємодії своєю циліндричною поверхнею з відповідною опуклою циліндричною поверхнею шарніра 7, який у свою чергу контактує опуклою

циліндричною поверхнею з увігнутою поверхнею рухомої траверси 8, при цьому шарнір 7 установлений з можливістю обертального руху відносно своєї осі в рухомій траверсі 8, а концентрично штоку 3 встановлено поршень 9 у напрямних гідропружного циліндру. При цьому торець штоку 3 ущільнений щодо дна циліндра 2 кільцевим ущільненням 10 з діаметром більшим діаметра штока 3. Циліндр 2 центрується щодо станини 1 напрямною 11 і кріпиться гвинтами до її столу. Управління циліндром 2 здійснюється по каналах 12, 13, 14. На рухомій траверсі 8 і плиті станини 1 встановлено технологічне оснащення. Для зниження динамічних навантажень на фундамент, прес-молот встановлено на пружні елементи 15 [310].

Прес-молот працює в такий спосіб. У вихідному положенні рухома траверса 8 разом зі штамповою оснасткою піднята. Шток 3 з бойком 16 гідропружного циліндра знаходиться в нижньому положенні на кільцевому ущільненні 10. При робочому ході клина 6 шарнір 7, повертаючись щодо своєї осі на робочий кут, переміщує вниз по напрямним рухому траверсу 8. При цьому відбувається статичне навантаження прокату. Після набору тиску в порожнині 4 циліндра 2 рідиною, що подається по каналу 12 поршень 9 переміщується вгору до упору і займає вихідне положення. Далі рідину подають у порожнину низького тиску 5 під кільцеве ущільнення 10 по каналу 13. При цьому шток 3 з бойком 16 відривається від кільцевого ущільнення 10 і розганяється енергією гідравлічної пружини та наносить удар по проміжній проставці 17. У процесі удару здійснюється статико-динамічне навантаження на прокат та розділення заготовки. Після удару і відскоку бойка 16 за рахунок додаткової деформації заготовки технологічна сила на рухому траверсу 8 знижується або знімається повністю. Під дією сили привода клин 6, шарнір 7 і траверса 8 займають вихідне положення. Рідина під тиском по каналу 14 подається у порожнину над поршнем 9. Поршень 9 переміщується вниз та повертає шток 3 у вихідне положення на кільцеве ущільнення 10. Цикл роботи прес-молота повторюється.

**Висновки до розділу 4.**

1. Установлені закономірності та залежності технологічних параметрів процесу розділення сортового прокату комбінованим статико-динамічним навантаженням способом триточкової холодної ломки згином із застосуванням методів скінченних різниць та скінченних елементів, що забезпечує плавний та симетричний режим прикладення навантаження відносно концентратора напружень і відповідно отримання заготовок підвищеної геометричної точності.

2. Розроблені комплексні математичні моделі динамічного і статико-динамічного навантажень прокату на прес-молоті, які враховують вплив попереднього статичного навантаження і жорсткості системи «прес-молот – оснастка – зразок» на хвильовий силовий режим розділення. Встановлено, що комбіноване статико-динамічне навантаження дозволяє зменшити високочастотні коливання зразка та не допустити порушення контакту зразка з опорами. Адекватність теоретичних розрахунків, виконаних на підставі математичних моделей, підтверджується результатами моделювання процесу ломки з використанням програмного комплексу Deform і результатами експериментальних досліджень. Розбіжність результатів теоретичних і експериментальних досліджень знаходиться у межах 5%.

3. Встановлено, що більша частина енергії витрачається на зародження й в'язке підростання тріщини, тоді як енергія крихкого руйнування складає не більше (10…25)% від сумарної енергії розділення. Порівняння максимальної сили ломки при статичному і динамічному навантаженні, яке оцінювалося коефіцієнтом динамічності, показує, що він змінюються не суттєво, за виключенням зразків із сталі 40Х, де приріст склав більше 30%. Час, за який відбувається процес руйнування для зразків з різних марок сталей, становив: Сталь 20 – $t \cong 0{,}2$ мс; Сталь 45 – $t \cong 0{,}08$ мс; Сталь 40Х – $t \cong 0{,}12$ мс; Сталь 60С2А – $t \cong 0{,}09$ мс, що відповідає розрахунковій моделі. Середня швидкість поширення тріщини у зразках, які використовувалися у експерименті, не перевищувала 300 м/с. Час проскакування тріщини в зоні крихкого руйнування – до 33 мкс.

4. Наявність статичної сили в момент удару забезпечує певний вихідний рівень напружень розтягання у зоні концентратора напружень, що підвищує керованість тріщиною. Аналіз геометричної точності заготовок дозволив зробити висновок про те, що з підвищенням швидкості деформування геометрична точність заготовок поліпшується. Найбільш висока геометрична точність заготовок спостерігається при статико-динамічному навантаженні. Рекомендована величина статичної сили при комбінованому навантаженні – не менше 25% від сили ломки і збільшується зі зростанням жорсткості контакту рухомих деталей прес-молота, оснастки і зразка.

5. Розроблено і запатентовано перспективні способи і конструкції обладнання для безвідходного розділення сортового прокату при динамічному і статико-динамічному навантаженнях.

*Результати досліджень опубліковані в роботах [282 – 288, 292, 293, 295 – 298, 300 – 304, 307 – 310]*

# РОЗДІЛ 5
# РОЗРОБКА, МОДЕЛЮВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ПРОЦЕСУ РОЗДІЛЕННЯ СОРТОВОГО І ТРУБНОГО ПРОКАТУ ЗА СХЕМОЮ КОМБІНОВАНОГО НАВАНТАЖЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМПАКТНИХ ВИКОНАВЧИХ МЕХАНІЗМІВ

## 5.1 Дослідження клиношарнірних механізмів для реалізації безвідходних способів розділення сортового прокату

### *5.1.1 Класифікація і обґрунтування застосування клиношарнірних механізмів для процесів безвідходного розділення сортового і трубного прокату*

Як показано у розділі 1, застосування клиношарнірного механізму в якості головного компактного виконавчого механізму забезпечує: збільшення поверхні контакту, яка сприймає технологічну силу; невелику висоту ланок за напрямком дії робочої сили; високу жорсткість; змінність співвідношення між приводною і технологічною силою; технологічність виготовлення.

Для аналізу інформації щодо клиношарнірних механізмів розроблена класифікація цих механізмів (рис. 5.1) [311].

За типом привода вхідної ланки (1.1) може бути використаний механічний привод: кривошипно-шатунний (2.1), гвинтовий (2.2); гідравлічний привод: гідроциліндр (2.3); гідропружний циліндр (2.4) або комбінований.

В. В. Харлашкін запропонував використовувати в якості приводу клиношарнірного механізму кривошипно-шатунний механізм [242 – 244].

У роботі [244] досліджене застосування гвинтового привода, який забезпечує підвищені швидкості деформування. Застосування гідропружного циліндра дозволяє забезпечити високі швидкості переміщення повзуна, що покращує якість заготовок.

За видом вхідної ланки (1.3) найбільш перспективними є клиношарнірні механізми з вхідною ланкою – клином (2.8), який за характером руху (1.2) рухається поступально (2.5).

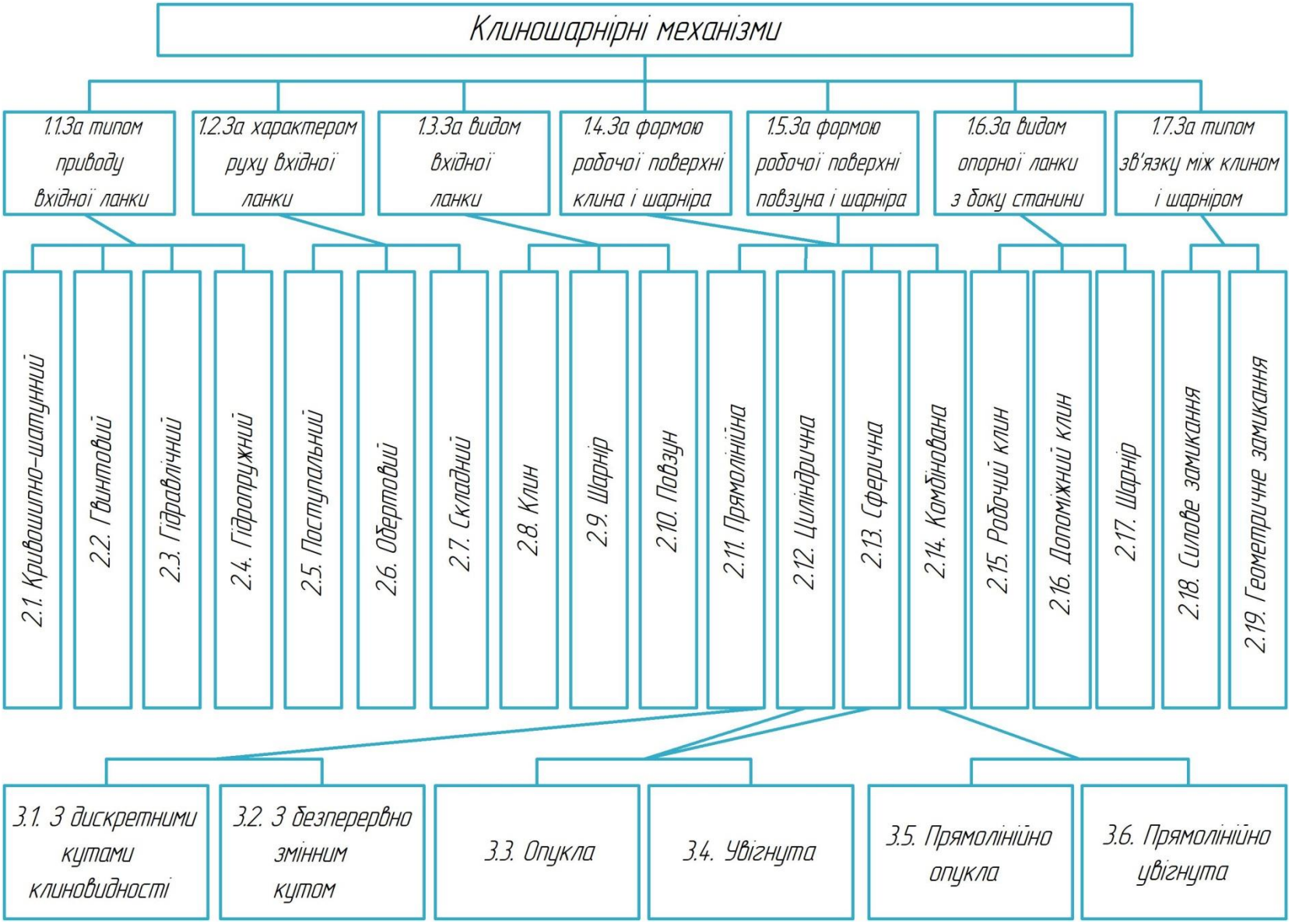



Рис. 5.1 – Класифікація клиношарнірних механізмів

Конструктивно можливо реалізувати схеми з вхідною ланкою: повзуном (2.10) або шарніром (2.9), які здійснюють відповідно поступальний (2.5) або складний плоский (2.7) рух.

За формою робочої поверхні клина і шарніра (1.4), а також повзуна і шарніра (1.5) поверхні можуть бути прямолінійними (2.11), циліндричними (2.12), сферичними (2.13) або комбінованими (2.14). Найбільш технологічним є застосування прямолінійних (2.11) і циліндричних (2.12) робочих поверхонь.

Конструкція клиношарнірного механізму може бути обладнана допоміжним клином (2.16). Спільне використання клиношарнірного механізму з увігнутим клином і допоміжного клина постійного кута нахилу дозволяє забезпечити хід наближення, вибирання зазорів і пружної деформації машини й інструмента, що призводить до зниження витрат енергії й динамічних навантажень.

Оскільки в клиношарнірних механізмах опорні поверхні ланок не мають жорсткого зв'язку між собою, тому для них важливе значення має спосіб замикання рухомих частин (1.7). Він може бути механічним, гідравлічним, гідро-пневматичним, вбудованим усередину повзуна, або взагалі бути відсутнім. Механічний спосіб може бути реалізований за рахунок пружин, захватів, важелів.

Клин може мати опуклу (3.3) або увігнуту (3.4) поверхні. При цьому клиношарнірні механізми з опуклим клином (див. рис. 1.10, а) не можуть забезпечити силовий режим навантаження, характерний для процесів розділення прокату, який вимагає забезпечення максимальної технологічної сили на початку робочого ходу.

Тому новий якісний рівень розвитку заготівельного виробництва можливий за умови створення нового ковальсько-пресового обладнання з підвищеними енергетичними можливостями, жорсткістю й використанням нестандартних виконавчих механізмів.

Для цього запропоновано [113] клиношарнірний механізм із увігнутим клином (див. рис. 1.10, б). У клиношарнірному механізмі із увігнутим клином рух починається з положення увігнутого клина 1 при куті повороту шарніра 2 $\varphi = 0^{\circ}$, коли сила на повзуні максимальна.

Порівняльний аналіз типових графіків зусиль при відрізці зсувом сортового прокату однакового перерізу з використанням ковальсько-пресових машин: з кривошипно-повзунним механізмом і з клиношарнірним механізмом з опуклим клином (1) та з клиношарнірним механізмом з увігнутим клином (2) представлений на рис. 5.2.

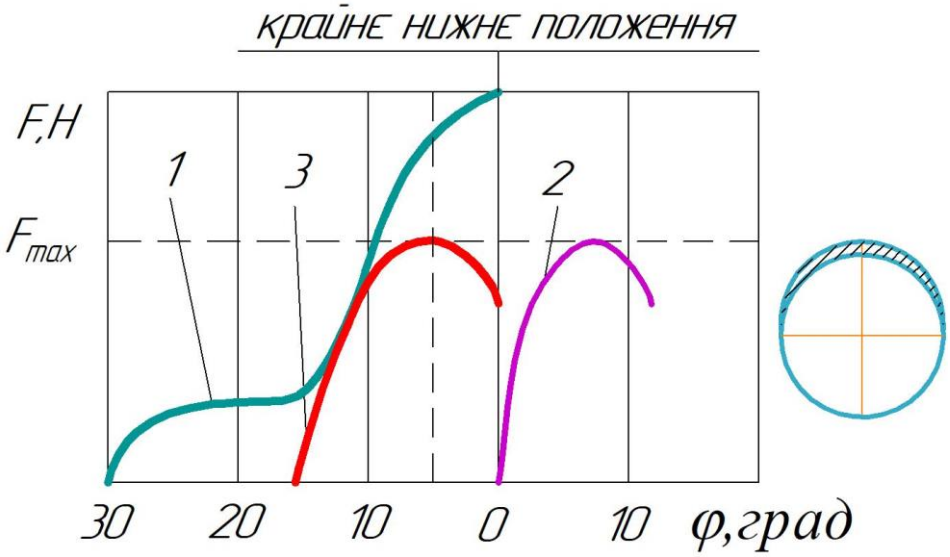



Рис. 5.2 – Типові графіки зусиль ковальсько-пресових машин: 1 – з кривошипно-повзунним механізмом і з клиношарнірним механізмом з опуклим клином; 2 – з клиношарнірним механізмом з увігнутим клином; 3 – типовий графік сил при відрізці зсувом

### *5.1.2 Структурний, кінематичний і силовий аналіз клиношарнірного механізму з увігнутим клином*

Клиношарнірний механізм преса (рис. 5.3) складається з увігнутого клина 1, шарніра 2 і повзуна 3. Клин 1 має дві робочі поверхні, одна з яких виконана плоскою й опирається на упорну деталь – верхню поперечку преса. Друга робоча поверхня клина виконана увігнутою циліндричної радіусом $R$ і сполучається з опуклою циліндричною поверхнею шарніра 2. Шарнір 2 має другу робочу поверхню, яка виконана опуклою циліндричною радіусом $r$ і сполучається з увігнутою циліндричною поверхнею повзуна 3.

Клиношарнірний механізм працює в такий спосіб. Під дією сили привода $F_г$, увігнутий клин 1 переміщується горизонтально на величину ходу $h_г$, діє на шарнір 2, який, повертаючись навколо своєї осі, переміщує повзун 3. Повзун 3 робить вертикальний робочий хід $h_в$ і діє на заготовку силою $F_в$, яка дорівнює за величиною силі корисного опору заготовки, і, доходячи до крайньої нижньої точки, повертається у вихідне положення.

Теоретичні дослідження клиношарнірного механізму з увігнутим клином доцільно проводити аналітичними, графоаналітичними методами, які використовуються в теорії механізмів і машин (ТММ), а також при розрахунках параметрів ковальсько-пресового обладнання, методами математичного моделювання із застосуванням ПЕОМ [113].

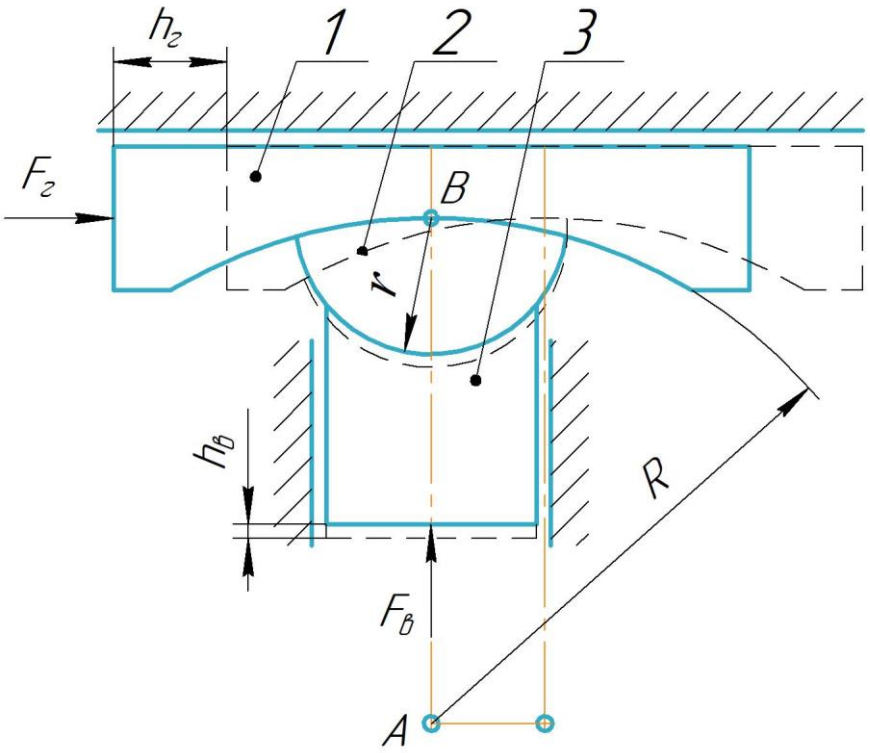
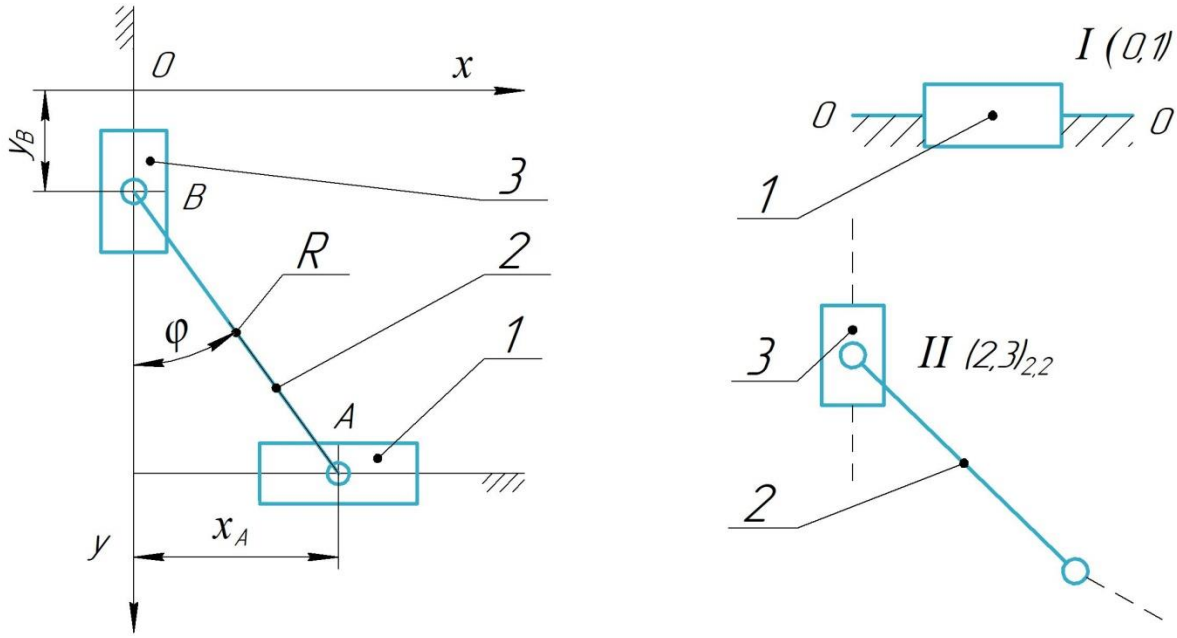



Рис. 5.3 – Схема клиношарнірного механізму з увігнутим клином [113]

Характер руху ланок клиношарнірного механізму аналогічний характеру руху ланок двохповзунного важільного механізму, а, отже, структурні схеми цих механізмів ідентичні (рис. 5.4) [113].




а б

Рис. 5.4 – Структурна схема (а) і структурні групи (б) клиношарнірного механізму преса з увігнутим клином [113]

Однак є й принципові відмінності цих механізмів. Клиношарнірний механізм має короткі ланки, а тому – більшу жорсткість, його шарніри відрізняються більшими опорними поверхнями, здатними передавати більші сили. Ці відмінності забезпечують перевагу клиношарнірного механізму перед важільними механізмами при застосуванні їх у ковальсько-пресовому устаткуванні.

Клиношарнірний механізм включає три рухомі ланки й чотири кінематичні пари п'ятого класу (дві обертальні й дві поступальні). Оскільки механізм плоский, то його рухомість визначається за формулою Чебишева:

$$W = 2 \cdot n - 2 \cdot p_5 - p_4 = 3 \cdot 3 - 2 \cdot 4 - 0 = 1, \qquad (5.1)$$

де $n$ – кількість рухомих ланок механізму,

$p_5$ – число кінематичних пар 5 класу,

$p_4$ – число кінематичних пар 4 класу.

Отже, для одержання визначеності руху всіх ланків механізму необхідно задати один незалежний рух вхідній ланці (клину 1). Розчленуємо механізм на

первинний механізм і структурну групу Ассура (див. рис. 5.4). Формула його будови має вигляд: $I(0,1) \rightarrow II(2,3)_{2,2}$. Звідки очевидно, що клиношарнірний механізм – це механізм $II$ класу.

Визначимо основні співвідношення між геометричними параметрами клиношарнірного механізму. Для цього розглянемо механізм у довільному положенні (див. рис. 5.4). Початок координат помістимо у вихідне положення точки $B$ (коли точки $A$ і $B$ розташовані на одній вертикалі). Нехай клин 1 переміститься на величину ходу $x_A$ $(x_A = h_г)$.

При цьому ланка $AB$ відхиляється від вертикалі на кут $\varphi$, який представляє собою змінний кут шарніра 2. Тоді переміщення повзуна 3:

$$y_B = R - R \cdot cos\varphi = R(1 - cos\varphi);\ y_B = h_в. \tag{5.2}$$

Можна також одержати співвідношення, що встановлює зв'язок між $h_г$ і $h_в$:

$$h_в = R - \sqrt{R^2 - h_г^2}. \tag{5.3}$$

Залежність між ходом клина $h_г$ і кутом $\varphi$ має вигляд:

$$\varphi = arcsin(h_г/R). \tag{5.4}$$

Досліджували кінематичні характеристики механізму, для чого визначали залежність між швидкостями й прискореннями вхідної (клина 1) і вихідної (повзуна 3) ланок. Швидкість повзуна 3 дорівнює:

$$V_B = dy_B/dt = R \cdot sin\varphi \cdot (d\varphi/dt) = R \cdot sin\varphi \cdot \omega_2. \tag{5.5}$$

Кутова швидкість шарніра 2:

$$\omega_2 = d\varphi/dt = V_A/(R \cdot cos\varphi). \tag{5.6}$$

Підставляючи це значення у формулу швидкості повзуна, одержуємо:

$$V_B = R \cdot sin\varphi \cdot V_A/(R \cdot cos\varphi) = V_A \cdot tg\varphi. \quad (5.7)$$

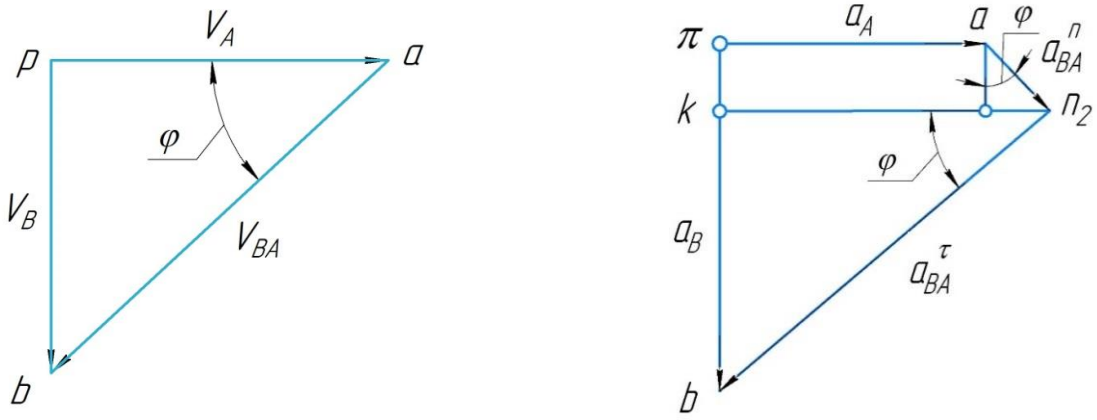
Звідки прискорення повзуна дорівнює:

$$a_B = dV_B/dt = a_A \cdot tg\varphi + V_A/cos^2\varphi \cdot d\varphi/dt = a_A \cdot tg\varphi + {V_A}^2/(cos^3\varphi \cdot R). \quad (5.8)$$

Аналогічні кінематичні залежності були одержані з використанням графоаналітичного методу. Для чого було побудовано плани швидкостей і прискорень механізму у розглянутому положенні (рис. 5.5).

Силовий аналіз клиношарнірного механізму проводили за допомогою побудови кіл тертя аналогічно методиці при визначенні кінетостатичних характеристик для кривошипних пресів, прийнявши при цьому наступні допущення:

- сила урівноважувача забезпечує відсутність розкриття стиків у шарнірах і контакті клина з верхньою плитою;
- вагою й силами інерції ланок механізму зневажаємо, тому що вони порівняно малі і їх урахування незначно впливає на кінцевий результат;
- коефіцієнти тертя в шарнірах рівні між собою, як і коефіцієнти тертя в напрямних клина і повзуна.




а б

Рис. 5.5 – Кінематичний аналіз клиношарнірного механізму з увігнутим клином графоаналітичним методом: а – план швидкостей; б – план прискорень [113]

Схема сил, що діють у реальному клиношарнірному механізмі, представлена на рис. 5.6, а. Тертя в поступальних кінематичних парах ураховується таким чином, що сила нормального тиску відхиляється від нормалі до поверхні на кут тертя $\rho$. Розглянемо результуючу силу по шарніру $F_{AB} = F_{23}$.

Сила $F_{AB}$ спрямована по дотичній до кіл тертя, розташованих у центрах циліндричних поверхонь клина й шарніра. Загальний кут нахилу сили $F_{AB}$ до вертикалі становить $(\varphi + \psi)$. Кут $\psi$ враховує втрати на тертя між парами, що сполучаються, «клин – шарнір» і «шарнір – повзун». Вираз для визначення величини цього кута знайдене із прямокутного трикутника ABC:

$$sin\psi = f \cdot (R + r)/R. \tag{5.9}$$

Розглянемо рівновагу повзуна 3. На нього діють сили $F_{03}$ і $F_{23}$ з боку відкинутих ланок і сила корисного опору $F_в$. Рівняння рівноваги ланки 3 має вигляд:

$$F_в + F_{03} + F_{23} = 0, \tag{5.10}$$

де $F_{23} = F_{AB}$.

Побудувавши замкнений силовий трикутник для цих сил (рис. 5.6, б), запишемо, згідно з теоремою синусів, співвідношення між ними:

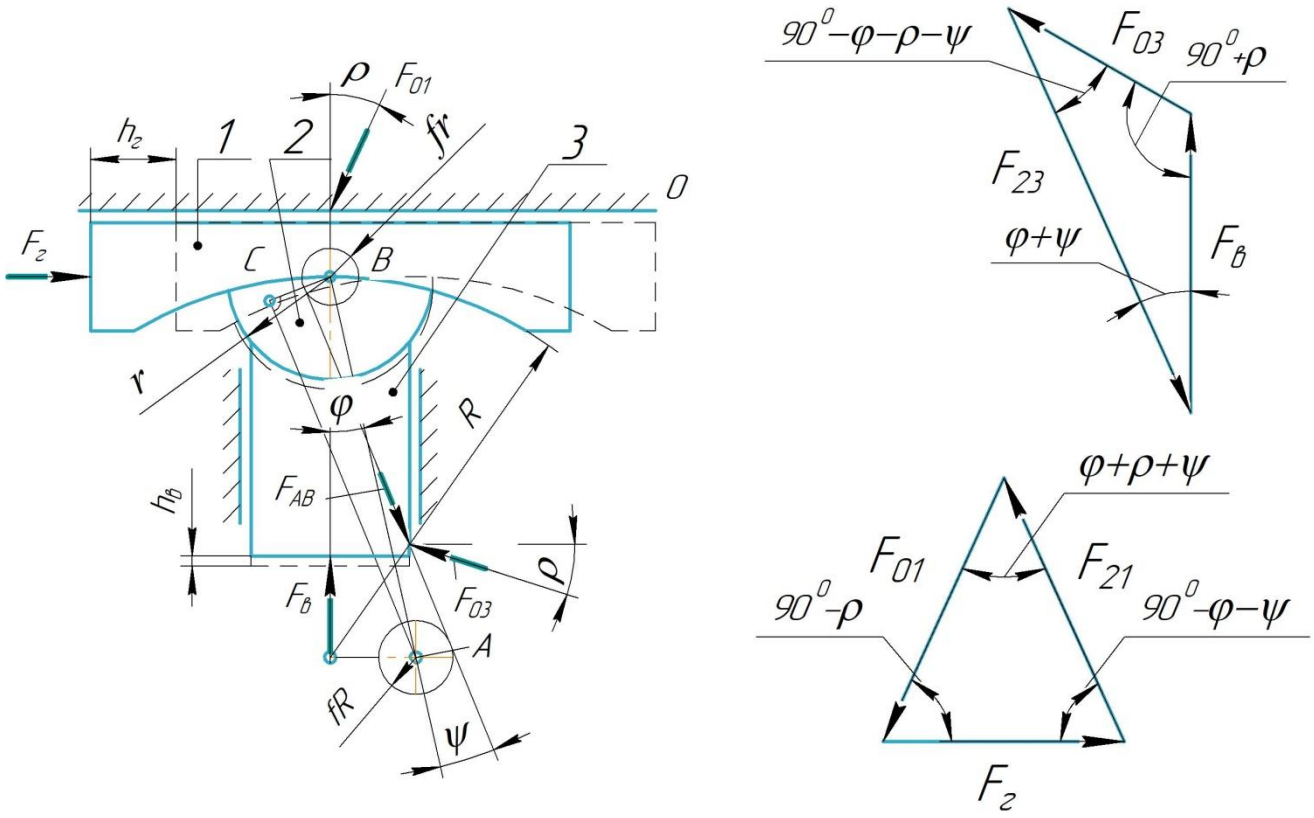
$$F_в/sin(90^0 - \varphi - \rho - \psi) = F_{23}/sin(90^0 + \rho). \tag{5.11}$$

Розглянемо рівновагу ланки 2, враховуючи, що $F_{32} = -F_{23}$:

$$F_{32} + F_{12} = 0, \text{ звідки } F_{12} = -F_{32}. \tag{5.12}$$

Рівняння рівноваги ланки 1 з урахуванням того, що $F_{21} = -F_{12}$, має вигляд:

$$F_{21} + F_{01} + F_г = 0. \tag{5.13}$$




а б

Рис. 5.6 – Силовий аналіз клиношарнірного механізму з увігнутим клином: а – розрахункова схема; б – плани сил [113]

Це рівняння також вирішується побудовою плану сил (див. рис. 5.6, б). Використовуючи теорему синусів, отримаємо:

$$F_г/sin(\varphi+\rho+\psi) = F_{21}/sin(90^0-\rho). \qquad (5.14)$$

З розглянутих рівнянь рівноваги ланок клиношарнірного механізму можна зробити висновок, що сили $F_{23}, F_{32}, F_{12}, F_{21}$ однакові по модулю. Отже, для того, щоб знайти співвідношення між рушійною силою $F_г$ і силою корисного опору $F_в$, необхідно виразити з рівнянь (5.11), (5.14) сили $F_{23}$ й $F_{21}$, і отримані вирази прирівняти. В результаті одержимо:

$$F_г \cdot sin(90^0-\rho)/sin(\varphi+\rho+\psi) = F_в \cdot sin(90^0+\rho)/sin(90^0-\varphi-\rho-\psi). \quad (5.15)$$

Використовуючи тригонометричні залежності отримаємо:

$$F_г \cdot cos\rho / sin(\varphi + \rho + \psi) = F_в \cdot cos\rho / sin(\varphi + \rho + \psi). \qquad (5.16)$$

Отже, шукане співвідношення дорівнює:

$$F_в = F_г / tg(\varphi + \rho + \psi) = \\ = F_г / tg\big(\varphi + arctgf + arcsin(f \cdot (R + r)/R)\big). \qquad (5.17)$$

Для перевірки результатів силового розрахунку, отриманих графоаналітичним методом, проводили аналітичний силовий розрахунок клиношарнірного механізму з увігнутим клином, заснований на складанні рівнянь рівноваги. Для розрахунків аналітичним методом представимо клиношарнірний механізм у вигляді важільного двохповзунного механізму (рис. 5.7). Силовий розрахунок починаємо з розгляду структурної групи 1-2.

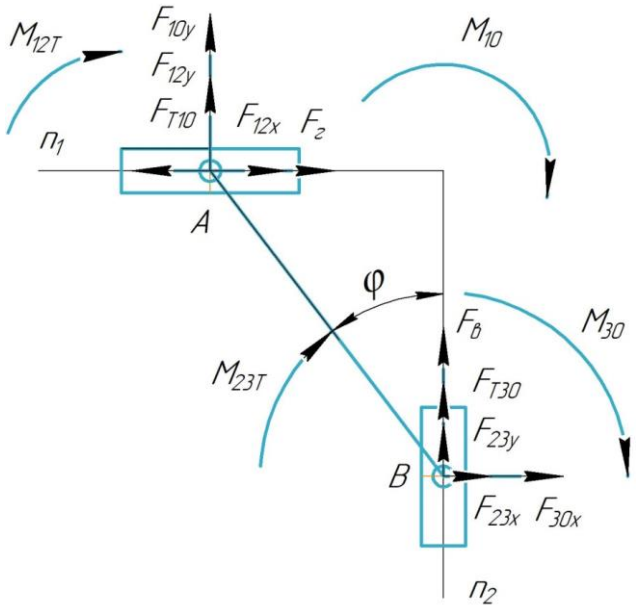



Рис. 5.7 – Розрахункова схема навантаження клиношарнірного механізму з увігнутим клином [113]

Нижче наведена система рівнянь рівноваги, що включає сили тертя в поступальній парі й моменти тертя в обертальній парі:

$$\sum M_A(F_i)_2 = 0: M_{21T} + M_{23T} + F_{23x} \cdot (Y_A - Y_B) - F_{23y} \cdot (X_A - X_B) = 0; \quad (5.18)$$

$$\sum (F_{ix})_1 = 0: F_{12x} + F_г + F_{T10} = 0; \quad (5.19)$$

$$\sum \left(F_{iy}\right)_1 = 0: F_{12y} + F_{10y} = 0; \quad (5.20)$$

$$\sum (F_{ix})_2 = 0: -F_{12x} + F_{23x} = 0; \quad (5.21)$$

$$\sum \left(F_{iy}\right)_2 = 0: -F_{12y} + F_{23y} = 0; \quad (5.22)$$

$$\sum M_A(F_i)_1 = 0: M_{10} + M_{12T} = 0, \quad (5.23)$$

де $F_{12x}, F_{12y}, F_{23x}, F_{23y}$ – реакції в шарнірах;

$F_{10y}$ – реакція в поступальній парі;

$F_{T10}$ – сила тертя в поступальній парі;

$F_г$ – сила, прикладена до клина;

$M_{12T} = -M_{21T}$, $M_{23T} = -M_{32T}$ – моменти тертя в обертальних парах, які можуть бути представлені у вигляді наступних залежностей:

$$M_{23T} = -\sqrt{F_{23x}^2 + F_{23y}^2} \cdot f_B \cdot r_B \cdot sgn\left(\varphi_2^{/}\right); \quad (5.24)$$

$$M_{12T} = -\sqrt{F_{12x}^2 + F_{12y}^2} \cdot f_A \cdot r_A \cdot sgn\left(\varphi_2^{/}\right); \quad (5.25)$$

$$F_{T10} = -\left|F_{10y} \cdot f_{n1}\right| \cdot sgn\left(X_1^{/}\right), \quad (5.26)$$

де $r_A, r_B$ – радіуси шарнірів;

$f_A, f_B, f_{n1}$ – коефіцієнти тертя;

$\varphi_2^{/}, X_1^{/}$ – передатні функції першого порядку.

У результаті розв'язку системи рівнянь (5.18 – 5.23) з урахуванням (5.24 – 5.26) можуть бути визначені реакції в кінематичних парах, сили й моменти тертя. Для розв'язку нелінійних систем рівнянь (5.18 – 5.26) використаний метод Ньютона. Знаючи реакції $F_{23x}$ , $F_{23y}$ визначали силу корисного опору $F_в$, з умови рівноваги ланки 3:

$$\sum (F_{ix})_3 = 0: F_{30x} - F_{23x} = 0; \quad (5.27)$$

$$\sum \left(F_{iy}\right)_3 = 0: F_{T30} - F_{23y} + F_в = 0; \quad (5.28)$$

$$\sum M_B(F_i)_3 = 0: M_{32T} + M_{30} = 0, \quad (5.29)$$

де $F_в$ – сила корисного опору;

$F_{T30}$ – сила тертя в поступальній парі, яка може бути представлена у вигляді наступної залежності:

$$F_{T30} = -|F_{30x} \cdot f_{n2}| \cdot sgn\left(Y_3^{/}\right), \tag{5.30}$$

де $f_{n2}$ – коефіцієнт тертя в поступальній парі;

$Y_3^{/}$ – передатна функція першого порядку.

На рис. 5.8 представлені графіки зміни сили $F_в$ залежно від кута повороту шатуна (шарніра) $\varphi$ для різних значень коефіцієнтів тертя $f$ розраховані двома методами.

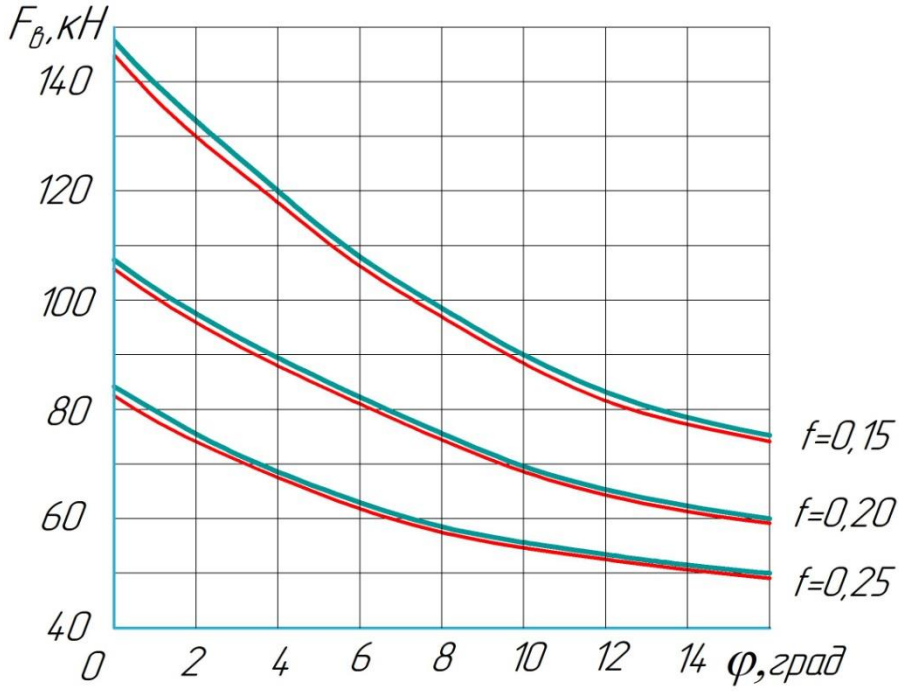



Рис. 5.8 – Графіки зміни сили корисного опору від кута повороту шарніра за розрахунками виконаними: ——— – графоаналітичним методом; ——— – аналітичним методом

Для розрахунків використовували наступні параметри клиношарнірного механізму: радіус клина $R = 300$мм; радіус шарнира $r = 45$мм; сила на клині $F_г = 49$ кН; кут $\varphi$ змінюється от $0^0$ до $15^0$. Аналіз отриманих даних доводить, що розбіжність між результатами, отриманими двома методами, становить не більш 3%,

що доводить можливість їх застосування. Графоаналітичний метод більш простий і наочний у використанні, однак він може бути застосований тільки для важільних механізмів, тоді як аналітичний, є більш універсальним.

### *5.1.3 Методика розрахунків геометричних, кінематичних і силових параметрів пресів з клиношарнірним механізмом з увігнутим клином*

На підставі аналізу математичних моделей розроблена методика розрахунків геометричних, кінематичних і силових параметрів таких механізмів при реалізації безвідходних способів розділення прокату.

Для наочності графіки залежностей геометричних і силових характеристик сполучені, що дозволяє вибирати раціональні параметри цього механізму (рис. 5.9).

Розрахунки проведено при $f = 0{,}15$. При відомій технологічній силі на повзуну $F_в$, ході повзуна $h_в$ і бажаному виграші в силі $F_в/F_г$ можна визначити кут повороту шарніра $\varphi$, а також параметри приводного клина: радіус $R$ і хід $h_г$.

Можна також розв'язати й зворотне завдання: за відомими значеннями геометричних параметрів приводного клина $R$ і $h_г$, визначити кут повороту шарніра $\varphi$, робочий хід повзуна $h_в$ і співвідношення сил $F_в/F_г$. А потім, знаючи або задаючи певне значення приводної сили $F_г$, визначити відповідну робочу силу на повзуні $F_в$.

Наприклад, при відомих: силі відрізки зсувом $F_в = 160$ кН (заготовка діаметром $d = 30$ мм) і рекомендованому ході відрізки, при якому відбувається різке скидання технологічного навантаження – $h_в = 3{,}3$ мм, потрібному співвідношенню $F_в/F_г = 2{,}5$, маємо: $F_г = 64$ кН, $h_г = 36$ мм, $R = 200$ мм, $\varphi = 10{,}4^0$.

Таким чином, використання графіків (див. рис. 5.9) дозволяє підбирати по величині технологічної сили розділення доцільні геометричні, кінематичні й силові параметри устаткування із клиношарнірним механізмом з увігнутим клином для реалізації безвідходних способів розділення прокату.

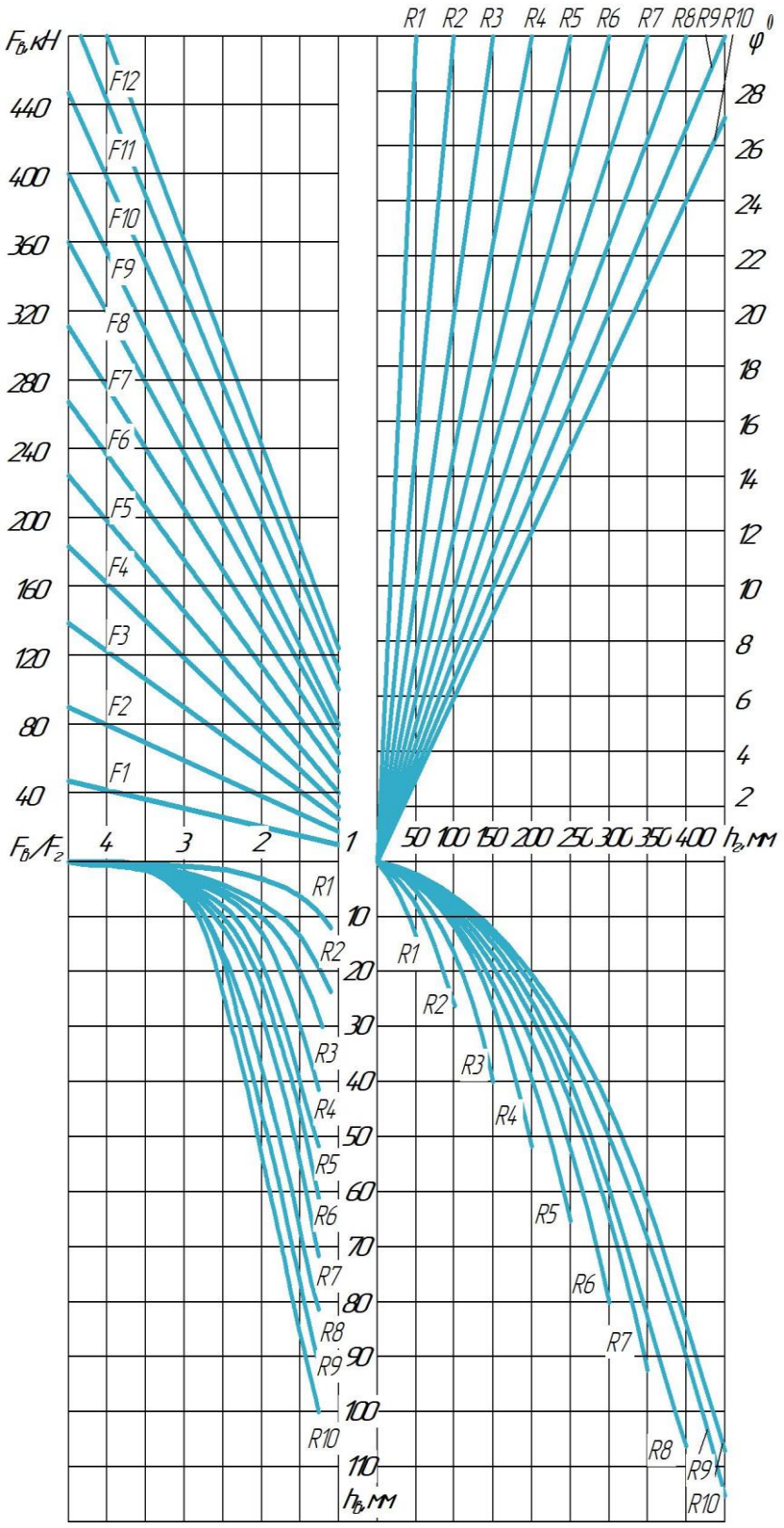



Рис. 5.9 – Графіки для визначення геометричних і силових параметрів клиношарнірного механізму з увігнутим клином: $R1 \dots R10 = 100$ мм $\dots 1000$ мм з кроком 100 мм; $F1 \dots F12 = 10$ кН $\dots 120$ кН з кроком 10 кН [113]

З використанням запропонованої методики розрахунків розроблені програмні засоби щодо проектування пресів із використанням таких клиношарнірних механізмів. На рис. 5.10 представлена запропонована типова конструктивна схема спеціалізованого преса із клиношарнірним механізмом з увігнутим клином для реалізації операцій розділення прокату зсувом.

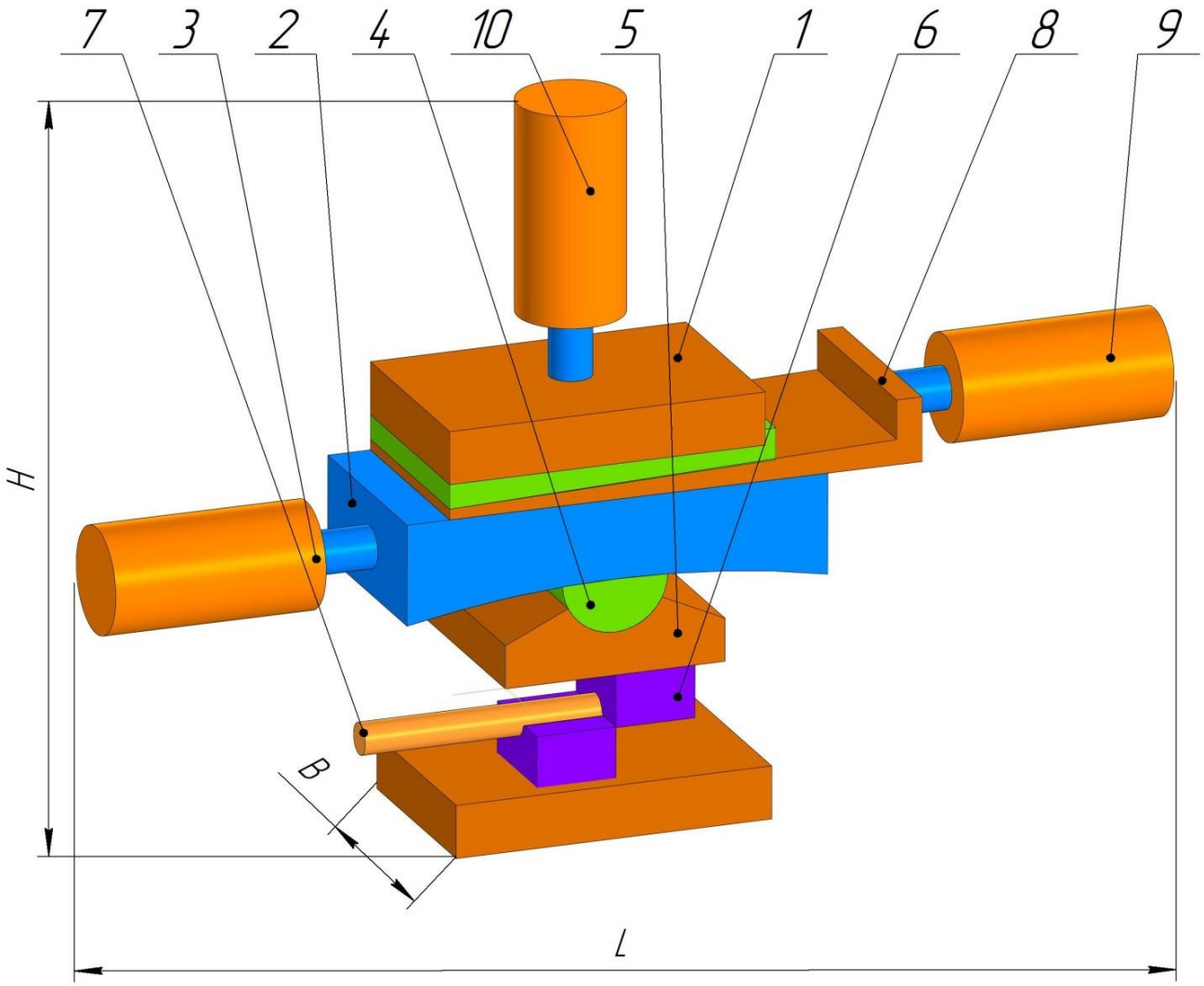



Рис. 5.10 – Конструктивна схема преса з клиношарнірним механізмом з увігнутим клином для розділення сортового прокату відрізкою зсувом зусиллям 4 МН

Прес складається із станини 1, клиношарнірного механізму з увігнутим клином, що включає в себе увігнутий клин 2 з приводом від гідроциліндра 3, взаємодіючого з шарніром 4, який встановлений з можливістю повороту і, у свою

чергу, контактує з відповідною поверхнею повзуна 5, на якому закріплений інструмент 6 для відрізки сортового прокату 7. Прес додатково оснащений клином 8 з постійним кутом нахилу 7º з приводом від гідроциліндра 9. Гідроциліндр 10 здійснює силове замикання системи «станина – клин – шарнір – повзун» і служить для повернення повзуна 5 у вихідне положення.

Розділення сортового прокату відрізкою зсувом відбувається в такий спосіб. Під дією сили приводу від гідроциліндра 9 клин 8 переміщується горизонтально, здійснюючи хід наближення, вибірку зазорів, пружну деформацію системи «прес-інструмент-заготовка». Далі під дією сили приводу від гідроциліндра 3, увігнутий клин 2 переміщується горизонтально, діє на шарнір 4, який повертається відносно своєї осі і здійснює відрізку зсувом заготовки за рахунок вертикального переміщення повзуна 5 з інструментом 6. Пропонований прес з клиношарнірним механізмом з увігнутим клином має велику закриту висоту штампового простору для розширення його технологічних можливостей – реалізації досконаліших схем відрізки з використанням штампового оснащення.

Порівняльний аналіз паспортних даних типових сортових ножиць та розрахункових техніко-економічних показників типового ряду спеціалізованих пресів запропонованої конструкції з клиношарнірним механізмом з увігнутим клином для операцій розділення представлений у табл.5.1.

У результаті підвищення жорсткості преса із використанням запропонованого клиношарнірного механізму з увігнутим клином в (1,2…1,3) рази зменшується пружна деформація деталей преса при реалізації процесів безвідходного розділення сортового прокату, підвищується надійність роботи преса. При цьому коефіцієнт використання устаткування за зусиллям збільшується від (0,3…0,4) до (0,7…0,8). Підвищується ККД преса в наслідок того, що зменшується величина роботи пружної деформації устаткування.

Таблиця 5.1 – Розрахункові параметри ряду пресів запропонованої конструкції та паспортних даних типових сортових ножиць

| Модель | Номінальна сила, МН | Максимальний діаметр розділяємого прокату, мм | Габаритні розміри, $LxBxH$, мм | Маса, т | Жорсткість, МН/м |
|---|---|---|---|---|---|
| Сортові кривошипні ножиці для точної відрізки (з допоміжними пристроями) | | | | | |
| Н1830Б | 1,00 | 56 | 1900x8300x3100 | 13,60 | 1,7 |
| Н1834А | 2,50 | 85 | 3650x6890x3550 | 29,00 | 2,7 |
| Н1836 | 4,00 | 110 | 4250x7100x4000 | 40,50 | 3,4 |
| Н1838 | 6,30 | 140 | 4685x8580x5250 | 75,00 | 4,3 |
| Н1840 | 10,00 | 170 | 5440x8610x5860 | 105,86 | 5,4 |
| Ножиці сортові кривошипні закриті (з допоміжними пристроями) | | | | | |
| Н1534 | 2,50 | 100 | 3050x7000x3000 | 12,38 | 2,7 |
| Н1538 | 6,30 | 140 | 4020x7100x4950 | 39,40 | 4,3 |
| Н1540 | 10,00 | 200 | 6040x8355x6720 | 68,00 | 5,4 |
| Розрахункові параметри ряду пресів з клиношарнірним механізмом з увігнутим клином | | | | | |
| КШМ63 | 0,63 | 40 | 1500x800x1600 | 1,50 | 1,7 |
| КШМ100 | 1,00 | 50 | 1600x900x1700 | 2,75 | 2,2 |
| КШМ125 | 1,25 | 60 | 1800x1000x1800 | 3,50 | 2,5 |
| КШМ250 | 2,50 | 80 | 2200x1100x1900 | 6,50 | 3,5 |
| КШМ400 | 4,00 | 100 | 2500x1300x2000 | 9,70 | 4,4 |
| КШМ630 | 6,30 | 140 | 3000x1500x2200 | 15,00 | 5,5 |
| КШМ1000 | 10,00 | 180 | 4000x1800x3000 | 20,00 | 7,0 |

### *5.1.4 Моделювання процесу відрізки сортового прокату із застосуванням клиношарнірного механізму з увігнутим клином за допомогою програмного комплексу Deform*

Для перевірки отриманих результатів проведено моделювання процесу відрізки прокату зсувом за допомогою програмного комплексу Deform. Параметри процесу моделювання представлені у табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Параметри процесу моделювання

| Назва параметру | Значення параметру |
|---|---|
| 1 Властивість матеріалу зразка | «пластичний» |
| 2 Температура | 20°С |
| 3 Кількість елементів розбиття | 40000 |
| 4 Коефіцієнт тертя по закону Зібеля | 0,12 |
| 5 Параметри клиношарнірного механізму:<br>○ радіус увігнутого клина, мм<br>○ радіус шарніра, мм<br>○ хід клина, мм<br>○ кут повороту шарніра, град<br>○ хід ножа, мм<br>○ швидкість клина, мм/с<br>○ кутова швидкість шарніра, рад/с<br>○ швидкість ножа, мм/с | <br><br>300,0<br>30,0<br>66,0<br>12,71<br>7,50<br>1,80<br>0,006<br>0,40 |
| 6 Параметри розрахунку: | аналіз Лагранжа |
| ○ кількість кроків розрахунку | 100 |
| ○ приріст кроків, мм/крок | 0,075 |

Розрахункова схема навантаження представлена на рис. 5.11.

Моделювання проводилося для розділення сортового прокату із сталі Ст. 06 ($AISI - 1006$) за схемою двохопорної неповністю закритої з пасивним поперечним затиском. Розміри зразків: $d = 10$ мм; $l = 160$ мм. Для даної задачі у програмі Deform обрано вирішувач – $Conjugate\ gradient$ та ітераційний метод – прямий ітераційний; тип розрахунку – $Normalized\ C\&L$.

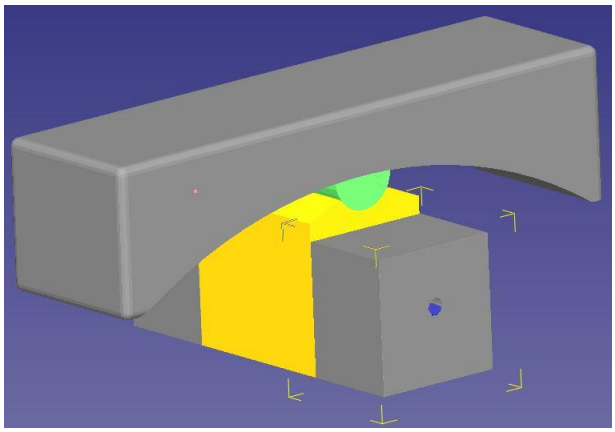
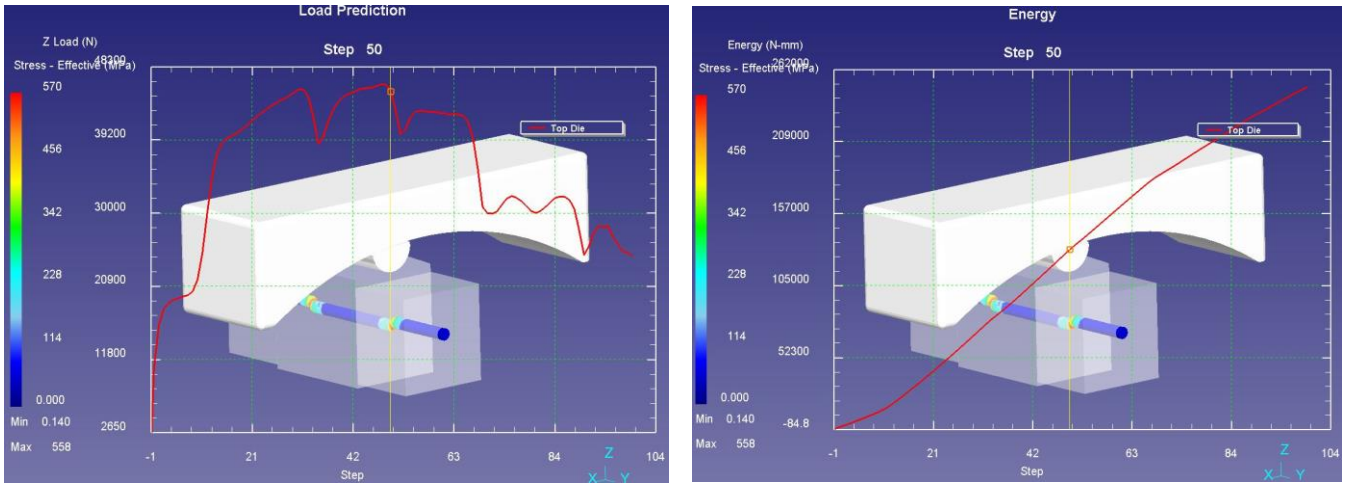


Рис. 5.11 – Розрахункова схема двохопорної неповністю закритої відрізки зсувом з пасивним поперечним затиском з використанням клиношарнірного механізму з увігнутим клином

Результати моделювання представлено на рис. 5.12.




а б

Рис. 5.12 – Залежності сили (а) і роботи (б) від кроку при відрізці за схемою двохопорної неповністю закритої відрізки зсувом з пасивним поперечним затиском зразків із сталі Ст. 6 для клиношарнірного механізму з увігнутим клином

### *5.1.5 Експериментальні дослідження клиношарнірного механізму з увігнутим клином*

Для підтвердження теоретичних розрахунків проведені експериментальні дослідження на установці (див. рис. 2.16).

Параметри експериментальної установки: $R = 300$ мм, $r = 30$ мм. Сила корисного опору $F_в$ створювалася відрізкою зсувом зразків діаметром $10$ мм і довжиною $160$ мм із матеріалу Ст. 6.

З метою мінімізації таких факторів, як перекоси штампу, заготовки, ножів, відрізка проводилася по симетричній двохопорній схемі відрізки.

Силові параметри вимірювали з використанням методу тензометрії з наклейкою датчиків на верхньому піввтулковому ножі 12 (див. рис. 2.16) і штоці гідравлічного циліндра 10. Використовувалися фольгові тензорезистори ФКТК 10 – 200 С – 1, включені за півмостовою схемою. База датчиків – 10 мм, опір – 200 Ом.

Інформація з тензодатчиків через універсальний реєструючий пристрій багатоканального збору інформації $E - 440$ подавалася до ПЕОМ, де після обробки, з використанням оригінальної програми, зберігалася в табличному і графічному видах, зручних для подальшого аналізу. При проведенні експерименту використовувалися два паралельні канали для реєстрування сили деформування і переміщення інструменту (сигнал знімали з ходографа) з метою побудови залежності «сила $F$ – переміщення $H$ інструмента».

Залежність сили відрізки від ходу повзуна $F = f(H)$ представлена на рис. 5.13.

Аналіз графіків $F = f(H)$ показує, що адекватність теоретичних розрахунків підтверджена експериментально (розбіжність до 8%). Експериментальна крива 2 зміщена вправо відносно кривої 1 внаслідок вибірки зазорів і пружної деформації деталей експериментальної установки.

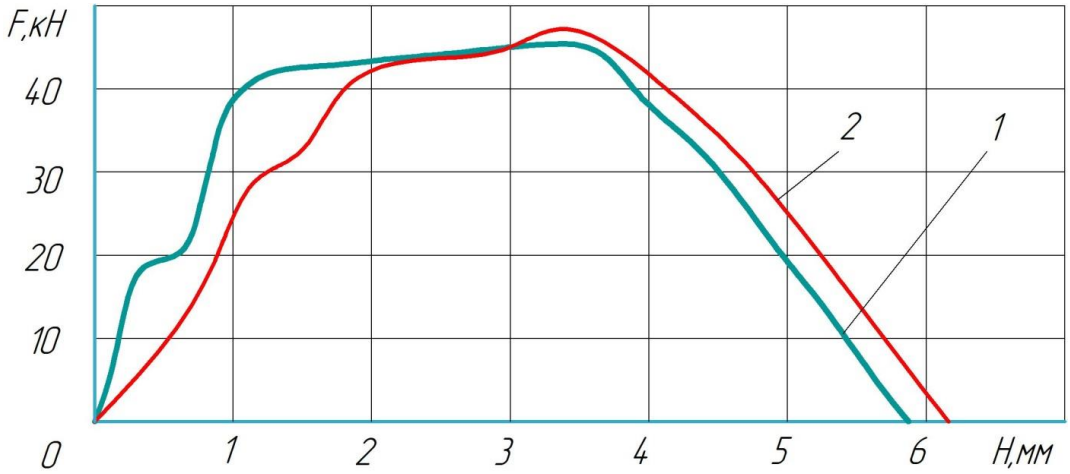



Рис. 5.13 – Залежність сили відрізки від ходу ножа $F = f(H)$ при розділенні зразків із сталі Ст. 6: 1 – розрахунок; 2 – експеримент

На підставі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень клиношарнірного механізму з увігнутим клином можна зробити такі висновки.

1. Установлено, що традиційні виконавчі механізми ковальсько-пресових машин не можуть створити силовий режим навантаження, характерний для процесів безвідходного розділення сортового прокату, що вимагають забезпечення максимальної технологічної сили на початку робочого ходу. Крім того, вони є багатоланковими й мають порівняно невисоку жорсткість.

2. На підставі розробленої класифікації клиношарнірних механізмів і проведених досліджень обґрунтована доцільність застосування в пресах для реалізації процесів безвідходного розділення клиношарнірного механізму з увігнутим клином, у якого графік зміни сили деформування найбільш наближений до технологічного типового графіка зміни сили при розділенні. Клиношарнірний механізм із увігнутим клином має меншу висоту деталей у порівнянні із кривошипними механізмами, що забезпечує меншу пружну деформацію й динаміку преса.

3. Розроблено математичні моделі клиношарнірного механізму з увігнутим клином, представленого у вигляді двохповзунного важільного механізму, які дозволяють виконати його структурний, кінематичний і динамічний аналізи. Проведено теоретичне моделювання процесу розділення за схемою двохопорної

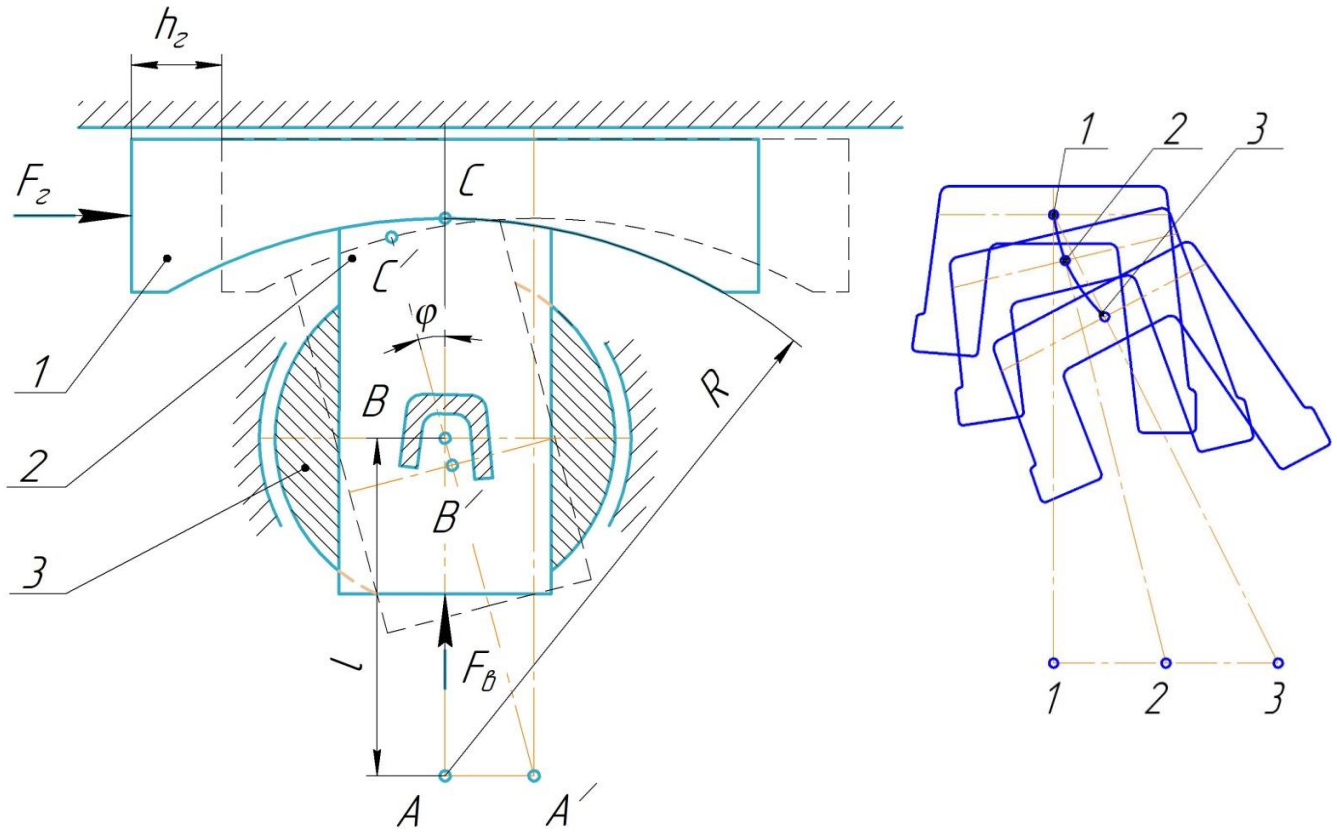
відрізки зсувом із застосуванням програмного комплексу Deform. Порівняння результатів кінематичного й динамічного аналізів, проведених аналітичним і графоаналітичним методами, підтверджує вірогідність розрахунків, тому що їхня розбіжність становить не більш 3%. На основі аналізу запропонованих математичних моделей розроблена методика розрахунків геометричних, кінематичних і силових параметрів клиношарнірного механізму з увігнутим клином для процесів розділення сортового прокату. Порівняльний аналіз розрахункових параметрів ряду пресів запропонованої конструкції, отриманих із застосуванням даної методики, та паспортних даних типових сортових ножиць показав, що коефіцієнт використання пресів нової конструкції за зусиллям збільшується від (0,3…0,4) до (0,7…0,8).

4. Проведені експериментальні дослідження підтвердили адекватність математичних моделей (розбіжність значень енергосилових параметрів на повзуні не перевищує 5%). Геометрична точність отриманих заготовок задовільна.

5. При цьому клиношарнірний механізм має свої недоліки. Основний з них – чисельна кількість поверхонь тертя, що мають значні розміри, у порівнянні з розмірами самого механізму. В результаті чого збільшуються втрати на тертя, а ККД преса – зменшується. Удосконалення обладнання з клиношарнірним механізмом з увігнутим клином може бути здійснено за двома напрямками: поліпшення умов тертя на контактних поверхнях; зменшення кількості поверхонь тертя.

## 5.2 Дослідження нової конструкції установки із клиношарнірним механізмом з увігнутим клином із поворотним ножем для розділення фасонного прокату складної конфігурації

З метою підвищення ефективності клиношарнірного механізму з увігнутим клином, за рахунок зменшення кількості поверхонь тертя, запропонована установка із клиношарнірним механізмом з увігнутим клином із поворотним ножем (рис. 5.14) [312].




а б

Рис. 5.14 – Конструктивна схема установки клиношарнірного механізму з увігнутим клином із поворотним ножем (а) і траєкторія руху заготовки (б)

Установка складається із клина 1, рухомого 2 і нерухомого (не показаний) ножів та шарніра 3. Клин 1 має дві робочі поверхні, одна з яких плоска й опирається на верхню поперечину станини. Друга робоча поверхня клина виконана циліндричною радіусом $R$ й сполучається з опуклою циліндричною поверхнею ножа 2. Бічні прямолінійні поверхні рухомого ножа 2 сполучаються з відповідними внутрішніми поверхнями шарніру 3, зовнішня поверхня якого – циліндрична й установлена в станині установки.

Установка працює в такий спосіб. До вхідної ланки – клина 1 прикладається приводна (горизонтальна) сила $F_г$, у результаті дії якої клин 1 поступально переміщується в напрямних і своєю увігнутою поверхнею радіусом $R$ натискає на відповідну опуклу поверхню рухомого ножа 2. У результаті ніж 2 здійснює складний обертально-поступальний (плоский) рух, переміщуючись поступально

щодо шарніру 3, і повертаючись разом з ним у циліндричних напрямних станини навколо осі, розташованої на відстані $l$ від центру кола радіусом $R$.

Якщо клин 1, а, отже, і точка $A$ – центр кола радіусом $R$ переміститься на величину ходу приводу клина $h_г$, то точка $B$ рухомого ножа 2 переміститься по кардіоїді вниз, виконуючи робочий хід. При цьому точка $B$, що є центром обертання шарніру механізму, співпадає з цетром ваги відрізаємої заготовки. Рухомий ніж 2 надрізає й остаточно відрізає заготовку. Заготовка попадає в тару. Цикл роботи установки відновлюється.

Запропонована установка може бути використана для розділення сортового і трубного прокату. Але найбільш доцільним буде її застосування для розділення фасонного прокату на мірні заготовки.

Як було зазначено у розділі 1, основні дослідження в області розділення сортового і трубного прокату стосуються розділення прокату простих конфігурацій. При цьому в технічній літературі недостатньо обґрунтовані механізми розділення, границі зони деформування і характер напружено-деформованого стану фасонного прокату складної конфігурації. Відсутні рекомендації по вибору технологічних схем розділення і обладнання для їх реалізації. До фасонного прокату складної конфігурації відноситься прокат з П – подібним профілем, із якого виготовляють деталь – «Клема роздільного рейкового скріплення залізничної рейки» (рис. 5.15). Перспективною схемою для відрізки фасонного прокату складного профілю є схема неповністю закритої відрізки з пасивним поперечним затиском. При цьому пасивний поперечний затиск забезпечується за рахунок реактивних сил з боку ножів [313, 314].

Траєкторія руху відрізаної заготовки для трьох положень «1, 2, 3», при використанні запропонованого механізму, представлена на рис. 5.14, б.

При цьому відрізка фасонного профілю може розглядатися як послідовність наступних етапів:

- вдавлення ножів у матеріал заготовки за рахунок повороту рухомого ножа відносно нерухомого з нанесенням концентратора напружень у площині розділення;
- відрізка зсувом по дузі з руйнуванням залишкової перемички.

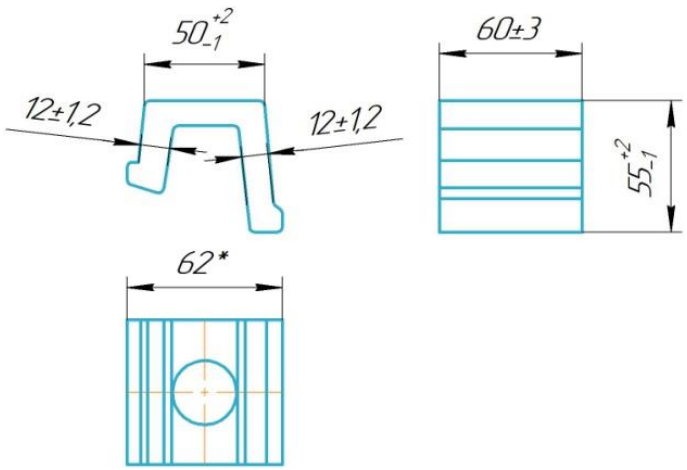



Рис. 5.15 – Деталь «Клема роздільного рейкового скріплення залізничної рейки»

Таким чином, установка забезпечує рух відрізного рухомого ножа, який є сполученим процесом: відрізки зсувом і кручення, і поєднує позитивні сторони обох процесів. Рух ножа по дузі забезпечує надріз профілю по периметру й тим самим, створює концентратор напружень в площині розділення.

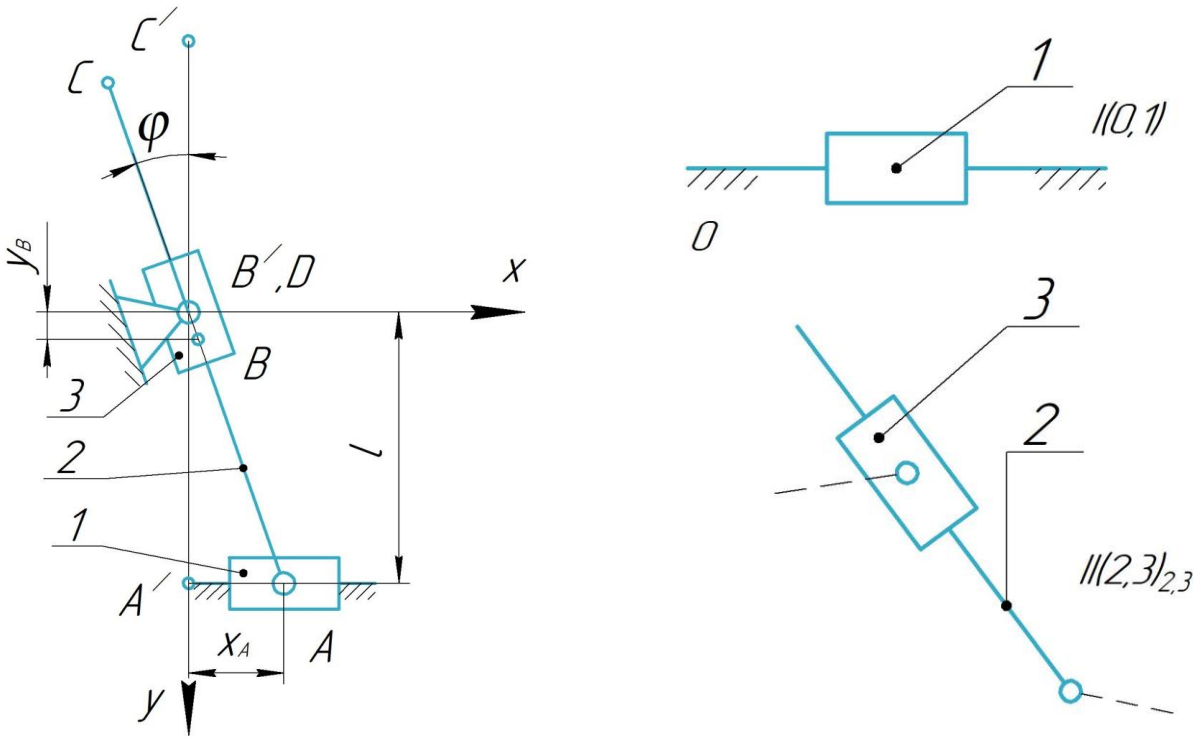
Перевагою запропонованої схеми відрізки є:

1. Підвищення геометричної точності заготовок за рахунок зменшення: зминання на контактних поверхнях, величини кута скосу, утяжини.

2. Зменшення сили відрізки в момент розділення за рахунок нанесення концентратора напружень, що знижує наслідки явища миттєвого розвантаження устаткування, яке супроводжується руйнуванням фундаменту, розслабленням з'єднань, кавітацією тощо.

### *5.2.1 Теоретичний аналіз клиношарнірного механізму з увігнутим клином із поворотним ножем*

Аналізуючи запропонований клиношарнірний механізм із поворотним ножем, можна дійти висновку, що характер руху його ланок аналогічний характеру руху ланок кулісного важільного механізму з хитним кулісним каменем, а, отже, структурні схеми цих механізмів ідентичні (рис. 5.16).




а б

Рис. 5.16 – Структурна схема (а) і структурні групи (б) механізму з клиношарнірним механізмом з увігнутим клином із поворотним ножем

Однак є й принципові відмінності цих механізмів. Запропонований механізм має всі переваги відомого клиношарнірного механізму з увігнутим клином. При цьому, у порівнянні із традиційними клиношарнірними механізмами, зменшується кількість поверхонь тертя. Підвищується технологічність виготовлення деталей установки.

Клиношарнірний механізм нової конструкції включає три рухомі ланки й чотири кінематичні пари п'ятого класу (дві обертальні й дві поступальні) (див. рис. 5.16).

Оскільки механізм плоский, то його рухомість визначається за формулою Чебишева:

$$W = 3 \cdot n - 2 \cdot p_5 - p_4 = 3 \cdot 3 - 2 \cdot 4 - 0 = 1, \qquad (5.31)$$

де $n$ – число рухомих ланок механізму,

$p_5$ – число кінематичних пар 5 класу,

$p_4$ – число кінематичних пар 4 класу.

Отже, для одержання визначеності руху всіх ланок механізму необхідно задати один незалежний рух вхідній ланці (клину 1). Розчленуємо механізм на первинний механізм і структурну групу Ассура (див. рис. 5.16).

Формула його будови має вигляд: $I(0,1) \rightarrow II(2,3)_{2,3}$. Отже, запропонований механізм – механізм $II$ класу.

Визначимо основні співвідношення між геометричними параметрами запропонованого механізму. Для цього розглянемо механізм у довільному положенні (див. рис. 5.16).

Початок координат помістимо у вихідне положення точки $B$ (коли точки $A$ і $B$ розташовані на одній вертикалі й точка $B$ збігається із центром обертання шарніра). Нехай клин 1 переміститься на величину ходу $x_A$ ($x_A = h_г$). При цьому ланка $AB$ відхиляється від вертикалі на кут $\varphi$, який являє собою змінний кут повороту рухомого ножа 2. Тоді вертикальна складова переміщення точки $B$ складає:

$$y_B = l \cdot (1 - cos\varphi), \tag{5.32}$$

де $l$ – відстань, яка визначає положення центру обертання шарніра.

Можна також вивести співвідношення, які встановлюють зв'язок між $h_г$ і $y_B$:

$$y_B = h_г \cdot ctg\varphi \cdot (1 - cos\varphi). \tag{5.33}$$

Залежність між ходом клина $h_г$ і кутом $\varphi$ має вигляд:

$$\varphi = arctg\,(h_г/l). \tag{5.34}$$

Криві залежності вертикальної складової переміщення точки $B$ ($y_B$) і кута $\varphi$ повороту рухомого ножа 2 від переміщення вхідної ланки – клина 1 ($h_г$) для різних значень радіуса увігнутої поверхні клина ($R$) представлені на рис. 5.17, а.

Проведемо кінематичне дослідження клиношарнірного механізму графоаналітичним методом. Для цього побудуємо план швидкостей механізму в розглянутому положенні (рис. 5.17, б).

Швидкість клина, а отже, і точки $A$, спрямована горизонтально і визначається приводом клина. Для визначення швидкості точки $B$ рухомого ножа 2, необхідно спочатку вирішити векторне рівняння, що визначає швидкість точки $D$ ножа, яка збігається в даний момент часу з центром обертання шарніра 3 (див. рис. 5.16), а потім, скориставшись теоремою подібності, визначити швидкість точки $B$:

$$\underset{//DA}{\overline{V}_D} = \underset{//X}{\overline{V}_A} + \underset{\perp DA}{\overline{V}_{DA}}; \tag{5.35}$$

$AD/AB = ad/ab$, звідки $ab = (ad) \cdot AB/AD = (ad) \cdot (l \cdot cos\varphi)/l = (ad) \cdot cos\varphi.$ (5.36)

Із побудованого плану швидкостей знаходимо, що абсолютна швидкість точки $D$:

$$V_D = V_A \cdot sin\varphi, \tag{5.37}$$

відносна швидкість

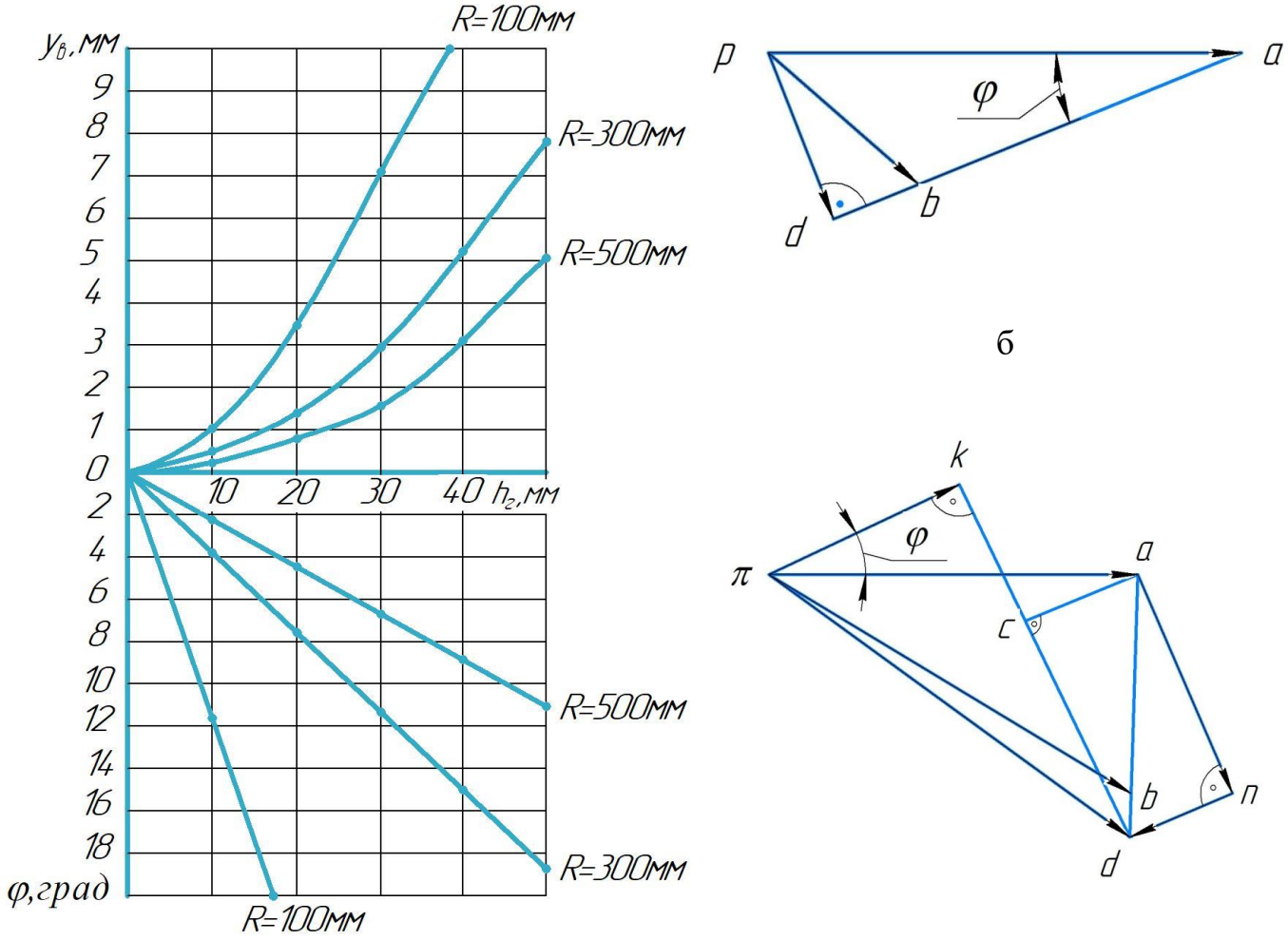
$$V_{DA} = V_A \cdot cos\varphi, \text{ тобто } ad = (pa) \cdot cos\varphi. \tag{5.38}$$

Отже:

$$ab = (pa) \cdot cos^2\varphi. \tag{5.39}$$

Розглянувши трикутник $\Delta pab$ і, скориставшись теоремою косинусів, можна записати формулу для визначення довжини відрізка $pb$, що зображає швидкість точки $B$ на плані швидкостей:

$$pb = \sqrt{(pa)^2 + (ab)^2 - 2 \cdot (pa) \cdot (ab) \cdot cos\varphi}. \tag{5.40}$$




а б в

Рис. 5.17 – Графіки залежностей $y_в = f(h_г)$, $\varphi = f(h_г)$ (а) і кінематичний аналіз клиношарнірного механізму з увігнутим клином із поворотним ножем графоаналітичним методом: б – план швидкостей; в – план прискорень

Після підстановок та перетворень отримаємо швидкість точки $B$:

$$V_B = V_A\sqrt{1 + cos^4\varphi - 2 \cdot cos^3\varphi}. \quad (5.41)$$

Тоді кутова швидкість ножа 2 дорівнює:

$$\omega_2 = V_{DA}/l_{DA} = V_A \cdot cos^2\varphi/l. \quad (5.42)$$

Побудуємо план прискорень клиношарнірного механізму (рис. 5.17, в),

вважаючи, що прискорення клина, а отже, і точки $A$, відомо і за величиною, і за напрямом. Запишемо і розв'яжемо графічно векторні рівняння для визначення прискорення точки $D$ рухомого ножа 2 (див. рис. 5.16), позначивши при цьому точку, що збігається в даний момент з точкою $D$, але належить шарніру 3, як $D_0$:

$$\bar{a}_D = \underset{\perp DA}{\overline{\overline{a^k_{DD_0}}}} + \underset{//DA}{\overline{a_{DD_0}}}, \tag{5.43}$$

де $a^k_{DD_0} = 2 \cdot \omega_2 \cdot V_D = 2 \cdot V_A^2 \cdot cos^2\varphi \cdot sin\varphi / l.$

$$\bar{a}_D = \underset{}{\overline{\overline{a_A}}} + \underset{//DA}{\overline{\overline{a^n_{DA}}}} + \underset{\perp DA}{\overline{a^\tau_{DA}}}, \tag{5.44}$$

де $a^n_{DA} = \omega_2^2 \cdot l_{DA} = V_A^2 \cdot cos^3\varphi / l.$

Із побудованого плану прискорень очевидно, що

$$a_D = \sqrt{\left(a^k_{DD_0}\right)^2 + \left(a_{DD_0}\right)^2} = \sqrt{(2 \cdot V_A^2 \cdot cos^2\varphi \cdot sin\varphi / l)^2 + \left(a_{DD_0}\right)^2}. \tag{5.45}$$

Для визначення відносного прискорення $a_{DD_0}$, проведемо через точку $a$ допоміжний перпендикуляр $(ac)$ та отримаємо:

$$a_{DD_0} = kd = kc + cd = kc + an = a_A \cdot sin\varphi + a^n_{DA} = a_A \cdot sin\varphi + V_A^2 \cdot cos^3\varphi / l. \tag{5.46}$$

Таким чином, прискорення точки $D$ рухомого ножа 2

$$a_D = \sqrt{(2 \cdot V_A^2 \cdot cos^2\varphi \cdot sin\varphi / l)^2 + (a_A \cdot sin\varphi + V_A^2 \cdot cos^3\varphi / l)^2}. \tag{5.47}$$

Для визначення прискорення точки $B$ рухомого ножа 2, необхідно скористатися теоремою подібності. Склавши пропорцію, аналогічну пропорції для плану швидкостей, і з'єднавши одержану точку $b$ на плані прискорень з полюсом $\pi$, можна отримати прискорення точки $B$. У загальному випадку, виведення аналітичної залежності для прискорення точки $B$ становить певні труднощі. Тому розглянемо частковий випадок, прийнявши припущення, що клин рухається рівномірно, тобто швидкість переміщення клина є величиною постійною на всьому його шляху, а отже $a_A = 0$. Тоді, прискорення точки $D$ рухомого ножа 2 дорівнює:

$$a_D = V_A^2 \cdot cos^2\varphi / l \cdot \sqrt{4 \cdot sin^2\varphi + cos^2\varphi}. \quad (5.48)$$

А оскільки на плані прискорень, в цьому випадку, точка $a$ буде співпадати з полюсом $\pi$, то пропорція для пошуку точки $b$ набуває вигляду:

$$\pi b = (\pi d) \cdot cos\varphi. \quad (5.49)$$

Отже прискорення точки $B$

$$a_B = V_A^2 \cdot cos^3\varphi / l \cdot \sqrt{4 \cdot sin^2\varphi + cos^2\varphi}. \quad (5.50)$$

Дотичне прискорення $a_{DA}^{\tau}$ при цьому співпадає з коріолісовим прискоренням $a_{DD_0}^{k}$, а отже кутове прискорення рухомого ножа 2 складає:

$$\varepsilon_2 = a_{DA}^{\tau} / l_{DA} = 2 \cdot V_A^2 \cdot cos^3\varphi \cdot sin\varphi / l. \quad (5.51)$$

### *5.2.2. Моделювання процесу відрізки фасонного прокату з використанням програмного комплексу Deform*

Моделювання процесу відрізки фасонного П – подібного прокату для отримання заготовки деталі «Клема роздільного рейкового скріплення залізничної рейки» (див. рис. 5.15) на установці запропонованої конструкції проведено за допомогою програмного комплексу Deform.

Для моделювання параметрів переміщення деталей установки використовували залежності (5.33, 5.34, 5.41, 5.42), отримані при дослідженні клиношарнірного механізму графоаналітичним методом. Параметри процесу моделювання представлені у табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Параметри процесу моделювання

| Назва параметру | Значення параметру |
|---|---|
| 1 Властивість матеріалу зразка | «пластичний» |
| 2 Температура | 20°С |
| 3 Кількість елементів розбиття | 40000 |
| 4 Коефіцієнт тертя по закону Зібеля | 0,12 |
| 5 Параметри клиношарнірного механізму: | |
| ○ радіус увігнутого клина, мм | 200,0 |
| ○ хід клина, мм | 50,0 |
| ○ кут повороту рухомого ножа, град | 22,62 |
| ○ хід ножа, мм | 9,23 |
| ○ швидкість клина, мм/с | 2,0 |
| ○ кутова швидкість шарніра, рад/с | 0,018 |
| ○ швидкість ножа, мм/с | 0,31 |
| 6 Параметри розрахунку: | аналіз Лагранжа |
| ○ кількість кроків розрахунку | 150 |
| ○ приріст кроків, мм/крок | 0,06 |

Для даної задачі у програмі Deform обрано вирішувач – $Conjugate\ gradient$ та ітераційний метод – прямий ітераційний; тип розрахунку – $Normalized\ C\&L$.

Моделювали вплив величини відстані $l$, яка визначає положення центру обертання шарніра, на енергосилові параметри процеса розділення (див. рис. 5.16). Результати моделювання наведені у табл. 5.4.

Таблиця 5.4 – Результати моделювання

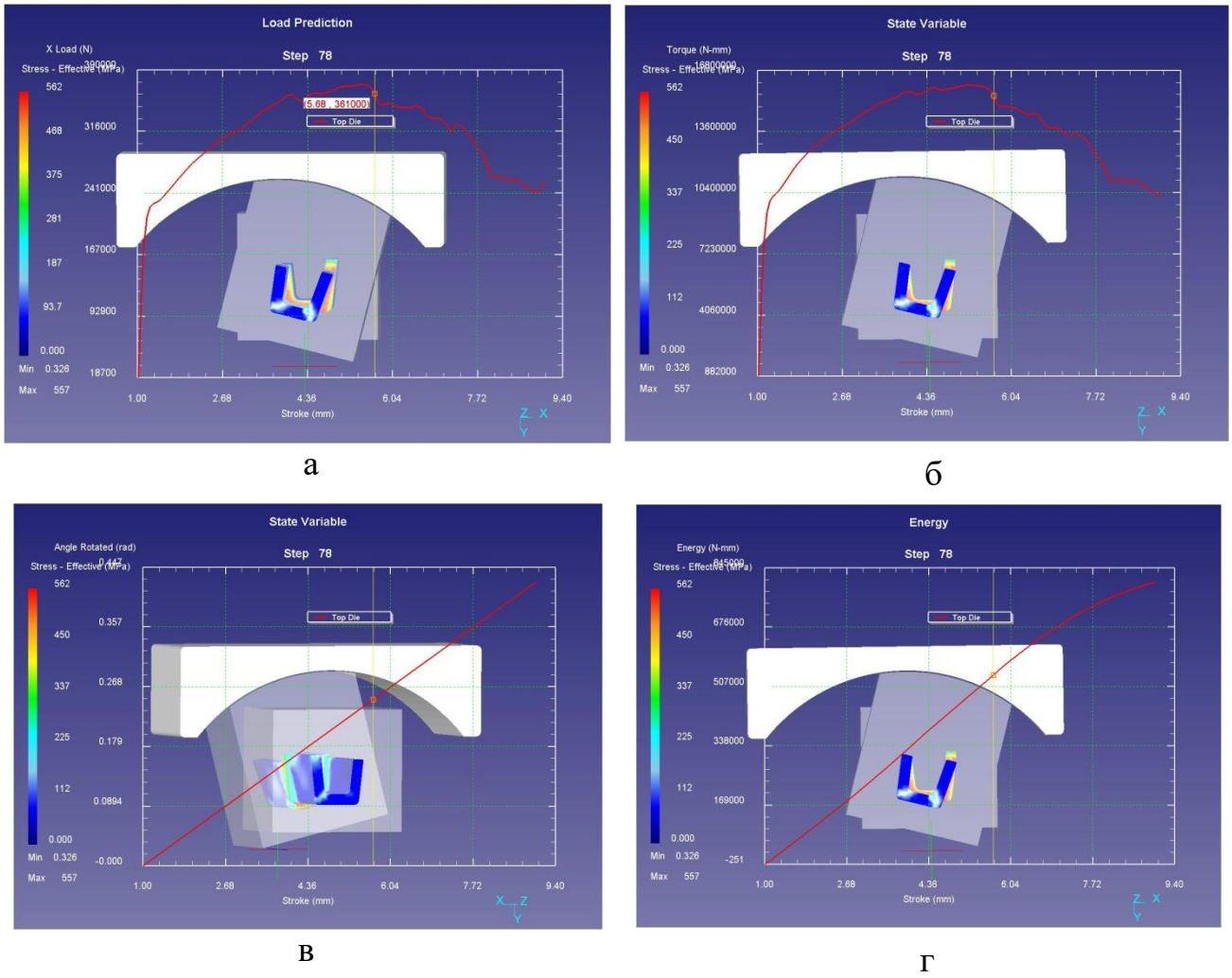
| Параметр | $l = 80$ мм | $l = 100$ мм | $l = 120$ мм | $l = 130$ мм |
|---|---|---|---|---|
| Сила відрізки $F$, кН | 277 | 318 | 382 | 417 |
| Кут повороту рухомого ножа в момент розділення – $\varphi$, рад/$\varphi$, град | 0,325/ 18,63 | 0,281/ 16,11 | 0,249/ 14,27 | 0,186/ 10,70 |
| Момент відрізки $M$, Н · м | 8500 | 8590 | 15400 | 20200 |
| Робота $A$, Дж, що відповідає моменту розділення | 976 | 843 | 802 | 630 |

Результати моделювання при $l = 120$ мм представлені на рис. 5.18.

Залежності величин роботи деформації, сили і моменту відрізки від параметра $l$ представлені на рис. 5.19.

Аналіз отриманих результатів показує, що зі збільшенням параметру $l$ збільшується величина сили і моменту розділення, а величина роботи деформування зменшується. З урахуванням конструктивних міркувань та проведених розрахунків, величину $l$ слід вибирати із урахуванням залежності: $l \cong 0{,}5 \cdot R$.

Для оцінки впливу орієнтації фасонного прокату з П – подібним профілем на величину енергосилових параметрів процесу розділення розглядали три варіанти (рис. 5.20). Інші варіанти орієнтації прокату не мають сенсу з погляду практичної реалізації подачі прокату у зону різання.




а б в г

Рис. 5.18 – Залежності сили розділення, кута повороту, моменту і роботи деформації від ходу рухомого ножа ($l = 120$ мм): а – $F = f(y_в)$; б – $M = f(y_в)$; в – $\varphi = f(y_в)$; г – $A = f(y_в)$

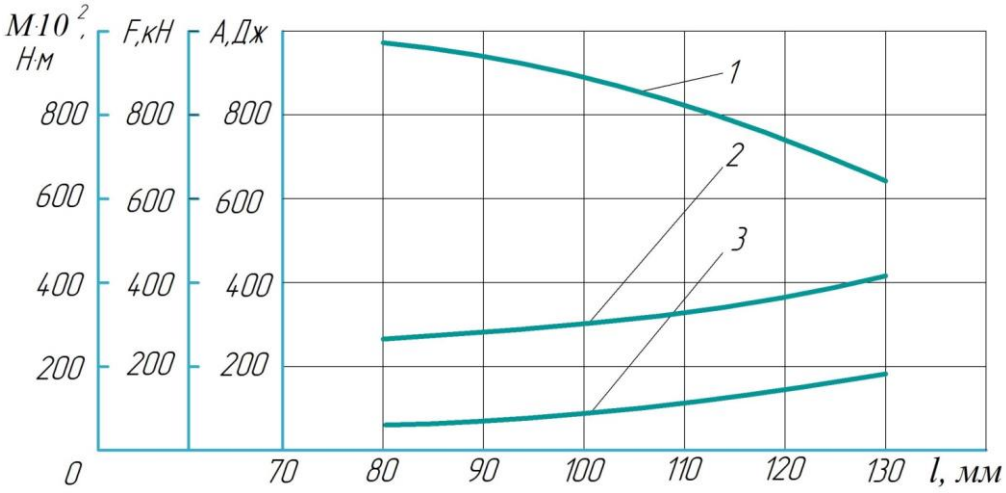



Рис. 5.19 – Залежності роботи (1), сили (2) і моменту (3) розділення від величини відстані $l$, яка визначає положення центру обертання шарніра

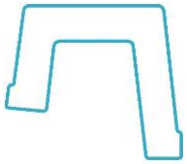
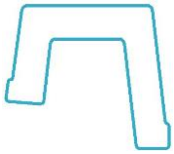
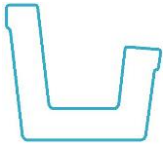
| Варіант №1 | Варіант №2 | Варіант №3 | Варіант №4 |
|---|---|---|---|
|  |  |  |  |
| Обертовий рух проти годинникової стрілки | Обертовий рух за годинниковою стрілкою | Обертовий рух проти годинникової стрілки | Обертовий рух за годинниковою стрілкою |

Рис. 5.20 – Варіанти орієнтації фасонного П – подібного прокату відносно напряму навантаження

Результати моделювання наведені у табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Результати моделювання при $l = 100$ мм

| Параметр | Варіант №1 | Варіант №2 | Варіант №3 | Варіант №4 |
|---|---|---|---|---|
| Сила відрізки $F$, кН | 311 | 303 | 318 | 315 |
| Момент відрізки $M$, Н · м | 8412 | 8346 | 8590 | 8514 |
| Робота $A$, Дж, що відповідає моменту розділення | 805 | 811 | 843 | 856 |

Аналіз отриманих даних дозволяє зробити висновок про те, що енергосилові параметри процесу розділення практично не залежать від орієнтації фасонного П – подібного прокату при складному плоскому русі. Але з практичних міркувань подачі прокату до зони різання доцільним є варіант №3.

Результати моделювання (див. табл. 5.4) показують, що сила відрізки фасонного П – подібного прокату при розділенні за схемою навантаження, реалізованою у новій конструкції установки $F_{max} = 417$ кН, менша від експериментальної сили відрізки, дані відносно якої наведено у роботі [315]: сила надрізки прокату на етапі обертального руху рухомого ножа – 24 кН; сила відрізки

на етапі остаточного розділення прокату при вертикальному русі ножа – 610 кН. Це підтверджує, що установка нової конструкції має значні переваги у порівнянні з відомими конструкціями аналогічного обладнання за енергосиловими показниками.

### *5.2.3 Експериментальні дослідження процесу розділення фасонного прокату*

Для перевірки результатів теоретичних досліджень проведений експеримент щодо розділення зразків П – подібного перерізу при складному плоскому русі ножів.

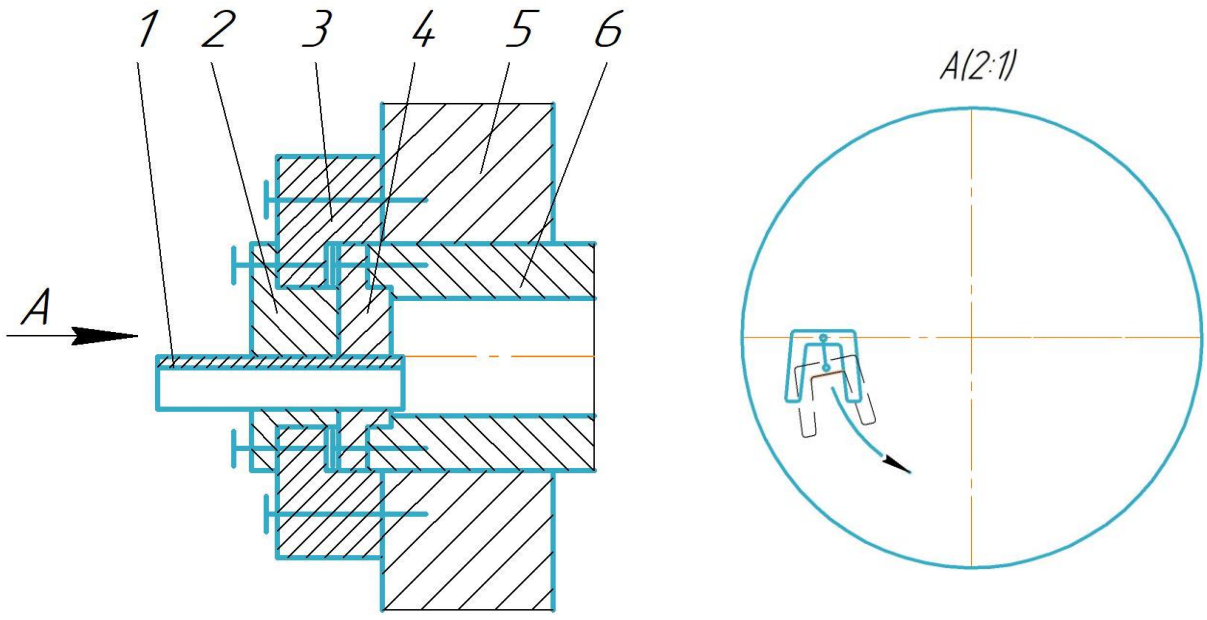
Для цього розроблена й виготовлена експериментальна установка оригінальної конструкції (див. рис. 2.17). Для відрізки зразків з П – подібним профілем установка додатково комплектувалася набором ножів (рис. 5.21). При включенні привода рухомий ніж 3 робить обертовий рух щодо своєї осі. При цьому на початковому етапі відрізки зразок 1 заклинюється між ножами 2, 3. Потім відбувається пластичне вдавлення ріжучих крайок ножів 2, 3 у зразок з П – подібним профілем 1 зі створенням концентратора напружень. При цьому відбувається одночасне кручення відрізаємої заготовки в площині концентратора напружень до руйнування.

В експерименті використовувалися зразки, які спеціально виготовлялися з алюмінієвого сплаву АД1 у масштабі 1:4 до реальних розмірів профілю деталі «Клема» (див. рис. 5.15). Для спрощення полиці зразка виконані симетричними (рис. 5.21, б).

Ножі виготовляли з інструментальної сталі 6ХВ2С.

Силові параметри процесу розділення вимірювали за допомогою одноручного динамометра з індикаторною голівкою, який попередньо тарувався.

Вимір параметрів геометричної точності відрізаних заготовок проводили методом прямого виміру з використанням універсального вимірювального інструмента за відомою схемою виміру [3].




а б

Рис. 5.21 – Конструкція експериментальної установки (а) для відрізки зразків з П – подібним профілем та рухомого ножа (б)

Результати проведених вимірів відносних середніх величин викривлень геометричної форми заготовок, отриманих відрізкою зсувом представлені в табл. 5.6.

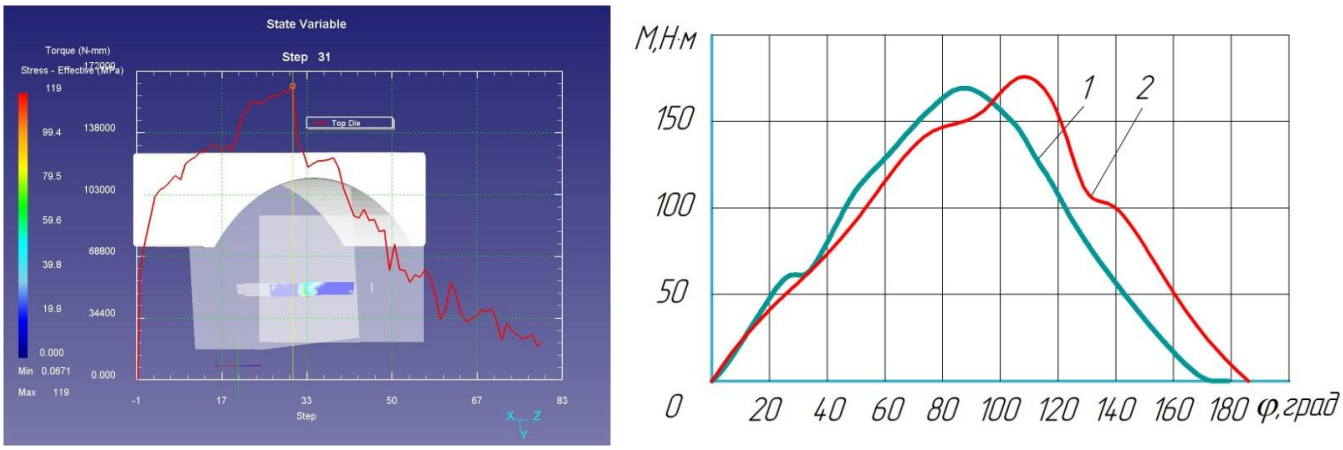
Таблиця 5.6 – Значення величин, що характеризують геометричну точність відрізаних заготовок (див. рис. 1.1)

| Величини, які характеризують геометричну точність заготовок | Значення | |
|---|---|---|
| Кут скосу торця $\varphi$, град | 1,5 |  |
| Утяжина повздовжня $U$, мм | 3,2 | |
| Утяжина поперечна $M$, мм | 1,3 | |
| Вм’ятина повздовжня $S$, мм | 0,5 | |
| Вм’ятина поперечна $B$, мм | 1,1 | |

Порівняльний аналіз значень моментів відрізки, отриманих розрахунковим (Deform) (рис. 5.22, а) і експериментальним способами, представлений на рис. 5.22, б.

Результати експериментів свідчать про те, що застосування складного плоского руху змінює напружено-деформований стан у зоні деформації й забезпечує високу геометричну точність відрізаних заготовок.

Розбіжність теоретичних і експериментальних результатів $M = f(\varphi)$ не перевищує 8%. Зміщення експериментальної кривої пов'язане з вибіркою зазорів і пружною деформацією деталей установки.




а б

Рис. 5.22 – Залежності моменту відрізки від кроку розрахунку (а) та повороту рухомого ножа (б): 1 – розрахунок; 2 – експеримент

На підставі аналізу результатів теоретичних і експериментальних досліджень клиношарнірного механізму з увігнутим клином із поворотним ножем можна зробити такі висновки.

1. Запропонована конструкція клиношарнірного механізму з увігнутим клином із поворотним ножем, який має менше число поверхонь тертя і більш технологічний у виготовленні в порівнянні з відомими клиношарнірними механізмами. Установка забезпечує рух відрізного рухомого ножа, який є сполученим процесом: відрізки зсувом і кручення, і поєднує позитивні сторони обох процесів. Складний плоский рух ножа по дузі забезпечує надріз П – подібного профілю по периметру й тим самим, створює концентратор напруження в площині розділення. Перевагою запропонованої схеми відрізки є підвищення геометричної точності заготовок:

зменшення зминання на контактних поверхнях, величини кута скосу, утяжини та зменшення сили відрізки в момент розділення.

2. На основі запропонованих математичних моделей нової конструкції установки із клиношарнірним механізмом з увігнутим клином із поворотним ножем та аналізу результатів моделювання з використанням програмного комплексу Deform розроблені залежності для розрахунку технологічних параметрів процесу розділення фасонного прокату. Встановлено, що зі збільшенням параметру, який визначає положення центру шарніру механізму, збільшуються величини сили і моменту розділення, а величина роботи деформування зменшується. Рекомендована величина цього параметру повинна дорівнювати половині радіуса увігнутого клина.

3. Проведені експериментальні дослідження підтвердили адекватність математичних моделей й правильність теоретичних висновків. Розбіжність теоретичних і експериментальних результатів $M = f(\varphi)$ не перевищує 8%. Зміщення експериментальної кривої пов'язане з вибіркою зазорів і пружною деформацією деталей експериментальної установки. Геометрична точність отриманих заготовок задовільна.

4. Аналіз результатів розрахунку і даних експерименту дозволяє зробити висновок про те, що енергосилові параметри процесу розділення практично не залежать від орієнтації фасонного П – подібного профілю прокату при його подачі у зону розділення.

5. Результати моделювання показують, що застосування установки нової конструкції забезпечує зниження енергосилових параметрів процесу розділення у порівнянні з відомими конструкціями сучасного обладнання.

## 5.3 Дослідження процесу розділення трубного прокату за схемою ексцентричного закручування з використанням кривошипно-кругового механізму

На підставі висновків, зроблених у розділі 2, встановлено, що для розділення трубного прокату доцільно застосувати схему розділення «ексцентричним

закручуванням». Проводили теоретичне дослідження даного процесу із застосуванням аналітичних методів і методу скінченних елементів.

### *5.3.1 Математичне моделювання процесу розділення трубного прокату*

Для реалізації схеми відрізки запропонована принципова конструктивна схема установки (рис. 5.23).

Основними елементами установки є: рухома 1 і нерухома 2 повзушки; кругова шайба 3, яка розташована у рухомій повзушці 1 з ексцентрично вставленим ріжучим ножом-втулкою 4 з ексцентриситетом $e$. При цьому другий ріжучий ніж-втулка 5 встановлено у нерухомій повзушці 2 [316, 317].

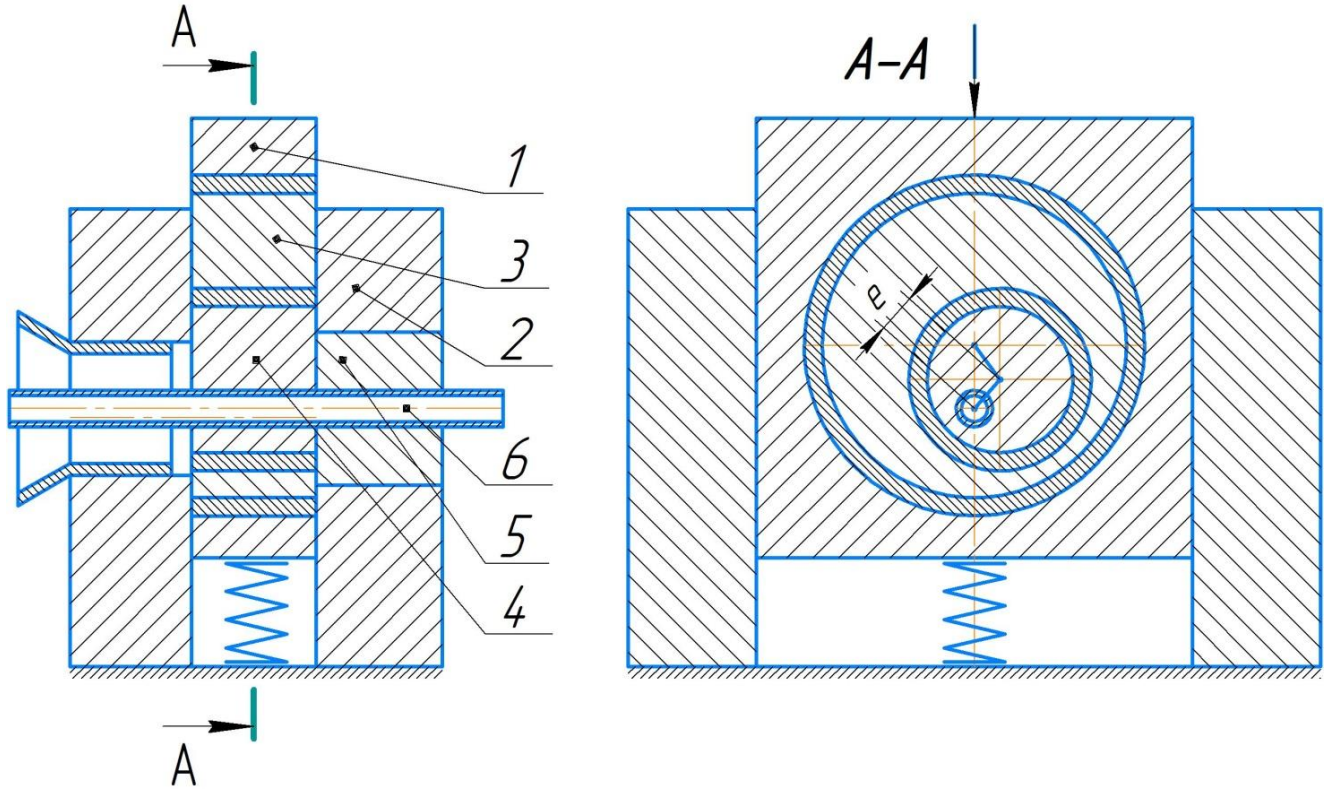



Рис. 5.23 – Принципова конструктивна схема установки для відрізки трубного прокату за схемою ексцентричного закручування

Установка працює в такий спосіб. У вихідному положенні ріжучі ножі-втулки 4, 5 розташовані співвісно. У порожнину цих втулок подається труба 6 до упору. Під дією сили з боку преса рухома повзушка 1 переміщується вниз у напрямних. При цьому труба заклинюється в ножах 4, 5. Відбувається пластичне вдавлювання ножів,

що викликає пластичний тангенціальний зсув частин труби. При цьому на трубний прокат у площині розділення наноситься концентратор напружень. При перевищенні сил тертя на поверхнях ріжучого ножа 4, кругової шайби 3 і труби 6, ріжучий ніж 4 отримує обертовий рух відносно своєї осі. При цьому він захоплює за собою частину труби, що відрізається – заготовку. Таким чином, у площині розділення діє крутний момент, що приводить до остаточного відділення трубчастої заготовки. Відрізка закінчується при повороті ріжучого ножа-втулки 4 на величину, яка залежить від механічних властивостей матеріалу трубного прокату. Після здійснення ножем 4 повного оберту на $360^0$, осі ріжучих ножів-втулок 4, 5 знову збігаються. Цикл роботи установки поновлюється [318].

Силовий розрахунок механізму з кривошипно-круговим механізмом для відрізки трубчастих заготовок «ексцентричним закручуванням» проводили аналітичним методом (рис. 5.24).

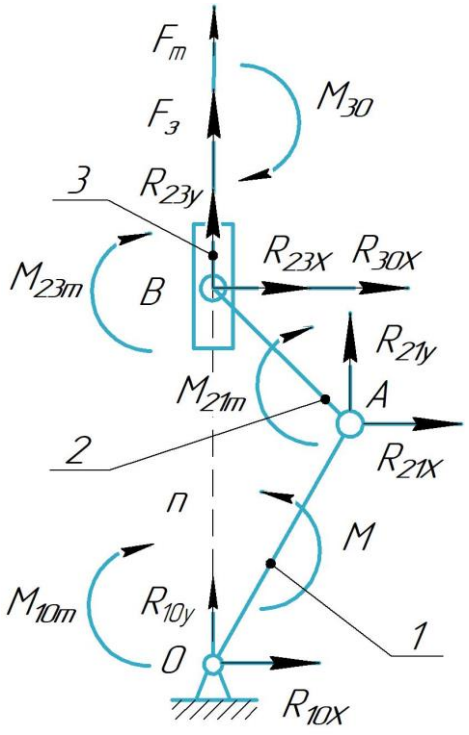



Рис. 5.24 – Силовий розрахунок механізму з кривошипно-круговим механізмом для відрізки трубчастих заготовок «ексцентричним закручуванням» [319]

Силами ваги й інерції деталей механізму зневажали. Силові розрахунки починали з розгляду структурної групи $2-3$. Нижче наведена система рівнянь рівноваги, що включає сили тертя в поступальній парі й моменти тертя в обертальній.

$$\begin{cases} \sum M_A(F_i)_2 = 0;\ R_{23x}\cdot(y_A - y_B) - R_{23x}\cdot(x_A - x_B) + M_{21m} + M_{23m} = 0; \\ \sum M_B(F_i)_3 = 0;\ M_{32m} + M_{30} = 0; \\ \sum(F_{ix})_3 = 0;\ R_{30x} - R_{23x} = 0; \\ \sum\left(F_{iy}\right)_3 = 0;\ -R_{23y} + F_3 + F_m = 0; \\ \sum(F_{ix})_2 = 0;\ R_{21x} + R_{23x} = 0; \\ \sum\left(F_{iy}\right)_2 = 0;\ R_{21y} + R_{23y} = 0, \end{cases} \tag{5.52}$$

де $R_{21x}, R_{21y}, R_{23x}, R_{23y}$ – реакції у шарнірах;

$R_{30x}$ – реакція у поступальній парі;

$F_m$ – сила тертя у поступальній парі;

$F_3$ – сила, яка прикладена до повзуна;

$M_{21m}, M_{23m}, M_{32m}$ – моменти тертя в обертальній парі, які можуть бути представлені у вигляді наступних залежностей:

$$\begin{cases} M_{21m} = -\sqrt{R_{21x}^2 + R_{21y}^2}\cdot f_A \cdot r_A \cdot sgn\left(\varphi_2^{/} - \varphi_1^{/}\right); \\ M_{23m} = -\sqrt{R_{23x}^2 + R_{23y}^2}\cdot f_B \cdot r_B \cdot sgn\varphi_2^{/}; \\ M_{32m} = -M_{23m}; \\ M_{12m} = -M_{21m}; \\ F_m = -|R_{30x}\cdot f_n|\cdot sgnx_3^{/}. \end{cases} \tag{5.53}$$

де $r_A, r_B$ – радіуси шарнірів;

$f_A, f_B, f_n$ – коефіцієнти тертя;

$\varphi_1^{/}, \varphi_2^{/}$ – передатні функції першого порядку.

У результаті розв'язку системи рівнянь (5.52) з урахуванням (5.53) можуть бути визначені реакції в кінематичних парах, сили й моменти тертя. Для визначення знаків сил тертя й моментів тертя необхідно знати передатні функції першого порядку всіх ланок. З метою їх визначення розроблена методика кінематичного аналізу механізму за допомогою розроблених процедур. Для розв'язку нелінійної системи рівнянь (5.52), (5.53) використаний метод Ньютона.

Знаючи реакції $R_{21x}$ й $R_{21y}$ визначали момент опору з боку заготовки, з умови рівноваги ланки 1:

$$\begin{cases} \sum(F_{ix})_1 = 0;\ -R_{21x} + R_{10x} = 0; \\ \sum\left(F_{iy}\right)_1 = 0;\ -R_{21y} + R_{10y} = 0; \\ \sum M_0(F_i)_1 = 0;\ M_{10m} + M + R_{21x} \cdot (y_0 - y_A) - R_{21y} \cdot (x_0 - x_A) = 0, \end{cases} \quad (5.54)$$

де $M$ – момент опору;

$R_{10x}, R_{10y}$ – реакції у шарнірі;

$M_{10m}$ – момент тертя в обертальній парі, який може бути описаний виразом:

$$M_{10m} = -\sqrt{R_{10x}^2 + R_{10y}^2} \cdot f_0 \cdot r_0 \cdot sng\varphi_1^{/}, \quad (5.55)$$

де $r_0$ – радіус шарніра;

$f_0$ – коефіцієнт тертя.

### *5.3.2 Моделювання процесу відрізки трубчастих заготовок з використанням програмного комплексу Deform*

Для перевірки розробленої математичної моделі проведене моделювання технологічного процесу відрізки трубчастих заготовок «ексцентричним

закручуванням» за схемою (див. рис. 5.23), з використанням програмного комплексу Deform [319].

Параметри процесу моделювання представлені у табл. 5.7.

Таблиця 5.7 – Параметри процесу моделювання

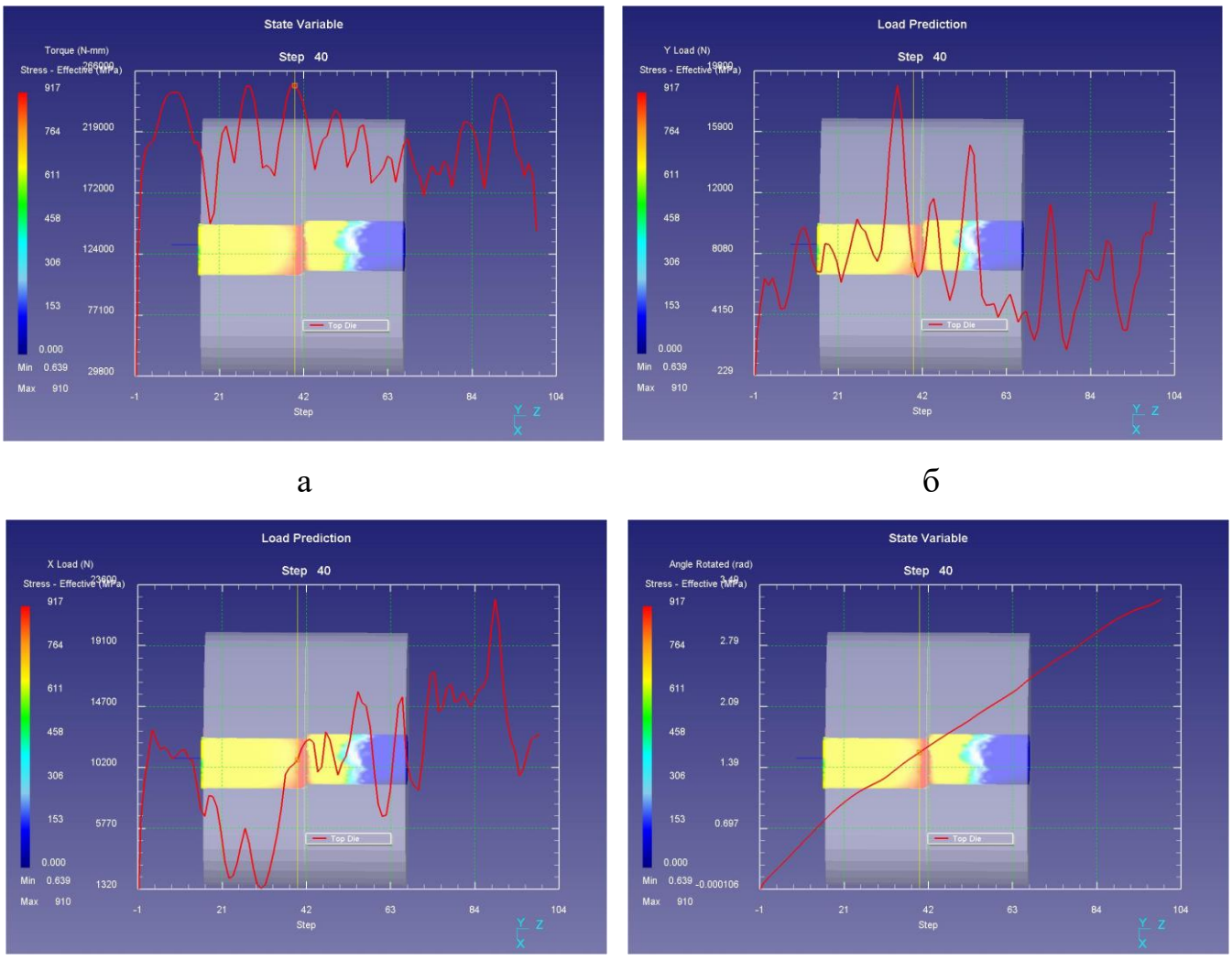
| Назва параметру | Значення параметру |
|---|---|
| 1 Властивість матеріалу зразка | «пластичний» |
| 2 Температура | 20°C |
| 3 Кількість елементів розбиття | 40000 |
| 4 Компенсація втрати об'єму, мм$^3$ | 5707,44 |
| 5 Параметри розрахунку: | аналіз Лагранжа |
| ○ кількість кроків розрахунку | 100 |
| ○ приріст кроків, с/крок | 0,6 |
| ○ час завершення, с | 60 |
| 6 Рух ножа | обертання |
| ○ кутова швидкість, рад/с | 0,10472 |

Для даної задачі у програмі Deform обрано вирішувач – $Conjugate\ gradient$ та ітераційний метод – прямий ітераційний; тип розрахунку – $Normalized\ C\&L$.

Параметри заготовки: зовнішній діаметр – 16 мм, внутрішній діаметр – 12 мм, довжина – 64 мм. Розрахунки проводили для матеріалів трубчастої заготовки, які є представниками двох класів: клас «пластичних» матеріалів – Ст. 6 ($AISI$ – 1006); клас «пружно-пластичних» матеріалів – Сталь 45 ($AISI$ – 1045).

Досліджували вплив величини ексцентриситету в діапазоні (0,5…3) мм на величини енергосилових параметрів процесу розділення.

Результати моделювання – залежності $M = f(step)$, $F_y = f(step)$, $F_x = f(step)$, $\varphi = f(step)$ від кроків розрахунків для трубного прокату із сталі $AISI - 1045$ при $e = 1{,}5$ мм та $f = 0{,}12$ представлені на рис. 5.25.




а б

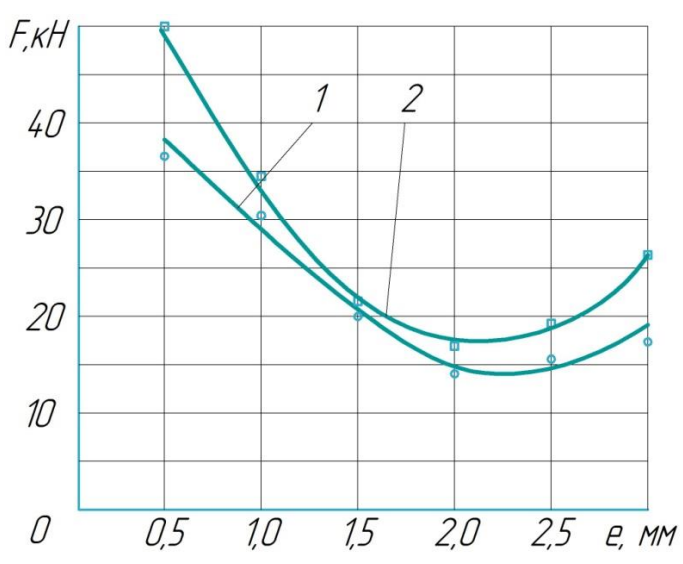
в г

Рис. 5.25 – Залежності $M = f(step)$ (а), $F_y = f(step)$ (б), $F_x = f(step)$ (в), $\varphi = f(step)$ (г) для трубного прокату із сталі $AISI - 1045$ при $e = 1{,}5$ мм та $f = 0{,}12$ [319]

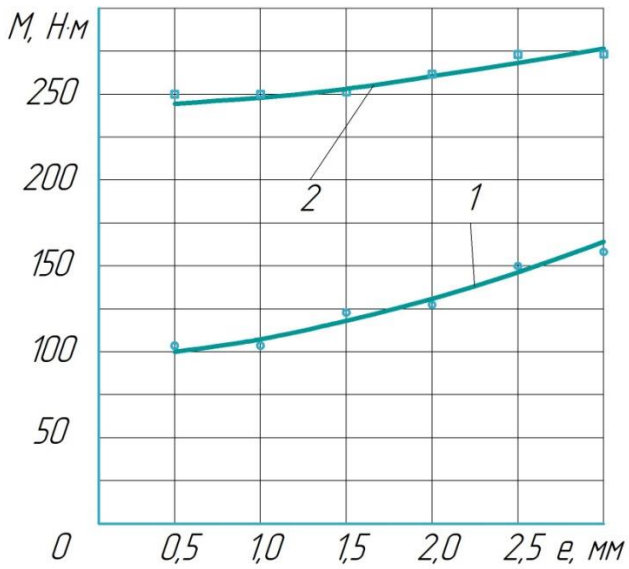
Аналіз результатів розрахунків представлений на рис. 5.26 – 5.28.

Максимальний момент відрізки зразків із матеріалу $AISI - 1045$ склав $M = 257$ Н · м, сила відрізки – $F_y = 18{,}2$ кН при куті повороту рухомого ножа близько $\varphi \approx 90^{\circ}$ (див. рис. 5.25).

Аналіз отриманих результатів показує, що на величини енергосилових параметрів процесу розділення трубного прокату і геометричну точність отриманих заготовок значний вплив має величина ексцентриситету $e$.




а




б

Рис. 5.26 – Залежності $F = f(e)$ (а), $M = f(e)$ (б) для трубного прокату із сталей: $AISI - 1006$ (1), $AISI - 1045$ (2) при $f = 0{,}12$

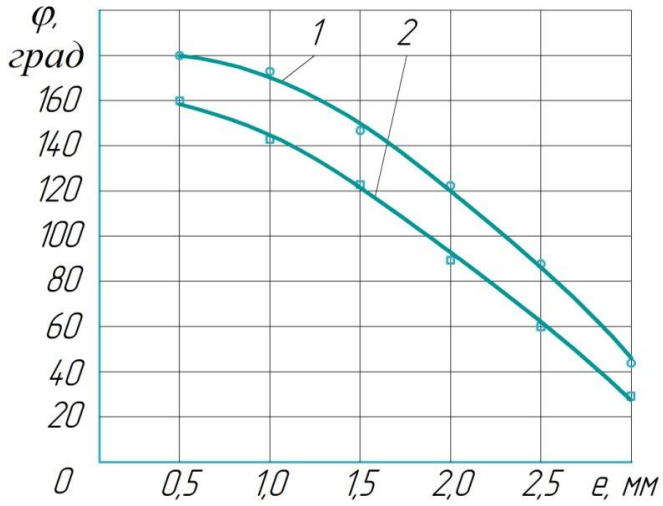



Рис. 5.27 – Залежності кута повороту рухомого ножа від ексцентриситету $\varphi = f(e)$ для трубчастих зразків із сталей: 1 – $AISI - 1006$, 2 – $AISI - 1045$

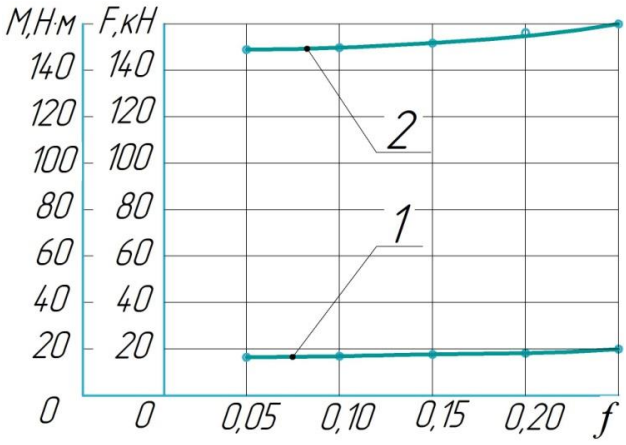



Рис. 5.28 – Залежності моменту (1) і сили (2) відрізки від коефіцієнту тертя при розділенні трубчастих зразків із сталі $AISI - 1006$

Зі збільшенням ексцентриситету до величини $e \approx 2\,мм$ сила відрізки зменшується, а потім, при $e > 2\,мм$, сила збільшується (див. рис. 5.26, а). Зі збільшенням величини ексцентриситету момент відрізки трубчастих заготовок збільшується (див. рис. 5.26, б). Аналіз залежностей (див. рис. 5.27) $\varphi = f(e)$

показує, що зі збільшенням величини ексцентриситету кут повороту рухомого ножа, який відповідає моменту розділення заготовки, зменшується.

Коефіцієнт тертя мінімально впливає на величини моменту і сили відрізки (див. рис. 5.28).

### *5.3.3 Експериментальні дослідження процесу відрізки трубчастих заготовок*

Для перевірки результатів теоретичних розрахунків проведені експериментальні дослідження розділення трубчастих заготовок за схемою «ексцентричного закручування». Для цього розроблена й виготовлена експериментальна установка оригінальної конструкції (див. рис. 2.17). При включенні привода рухомий ніж 3 робить обертовий рух щодо своєї осі. При цьому на початковому етапі відрізки трубчаста заготовка 1 заклинюється між ножами 2, 3. Потім відбувається пластичне вдавлення ріжучих крайок ножів 2, 3 у заготовку 1 зі створенням концентратора напружень. При цьому відбувається одночасне кручення відрізаємої заготовки в площині концентратора напружень до руйнування.

В експерименті використовувалися трубчасті зразки з розмірами: зовнішній діаметр 16 мм, внутрішній – 12 мм, довжина – 200 мм. Матеріали зразків: Ст. 6; Сталь 45.

У рухомому й нерухомому ножах, спільно за один прохід, свердлили отвір для розміщення трубчастої заготовки, вісь якого зміщена щодо осей обертання ножів на величину ексцентриситету $e$.

Досліджували вплив величини ексцентриситету на величину енергосилових параметрів розділення трубного прокату. Величина ексцентриситету $e$, мм: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0.

Силові параметри процесу розділення вимірювали за допомогою одноручного динамометра з індикаторною головкою, який попередньо тарували.

Результати експериментальних досліджень представлені на рис. 5.29.

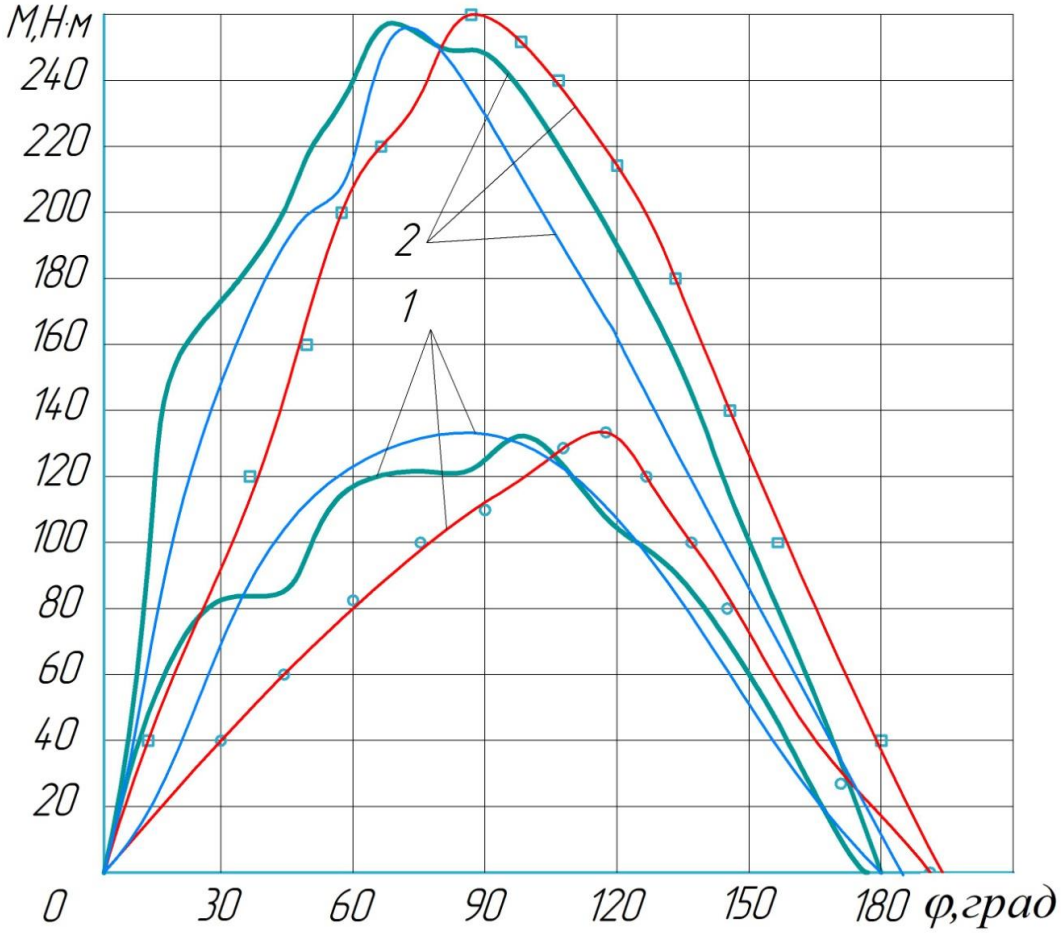



Рис. 5.29 – Залежності моменту відрізки від кута повороту рухомого ножа для зразків із сталей: Ст. 6 (1), Сталь 45 (2) при $e = 1{,}5$ мм і $f = 0{,}12$; ▬ – розрахунок Deform; ▬ – розрахунок за математичною моделлю (рівняння 5.54); ▬ – експериментальні дані

Вимір параметрів, що характеризують геометричну точність відрізаних заготовок, проводили з використанням універсального вимірювального інструмента за відомою схемою [3].

Результати проведених вимірювань відносних середніх величин викривлень геометричної форми трубчастих заготовок, отриманих відрізкою «ексцентричним закручуванням», представлені в табл. 5.8.

Відрізані трубчасті заготовки мають задовільні показники геометричної точності. Фотографія відрізаної заготовки представлена на рис. 5.30.

Таблиця 5.8 – Показники геометричної точності заготовок (див. рис. 1.1)

| Матеріал | Величина викривлень | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\varphi°$ | | $u = U/d$ | | $s = S/d$ | | $m = M/d$ | | $b = B/d$ | |
| | $\varphi_{\text{п}}$ | $\varphi_{\text{з}}$ | $u_п$ | $u_з$ | $s_п$ | $s_з$ | $m_п$ | $m_з$ | $b_п$ | $b_з$ |
| Ст. 6 | 1,00 | 1,10 | 0,1 | 0,03 | 0,05 | 0,06 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,02 |
| Сталь 45 | 0,80 | 0,90 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,03 |

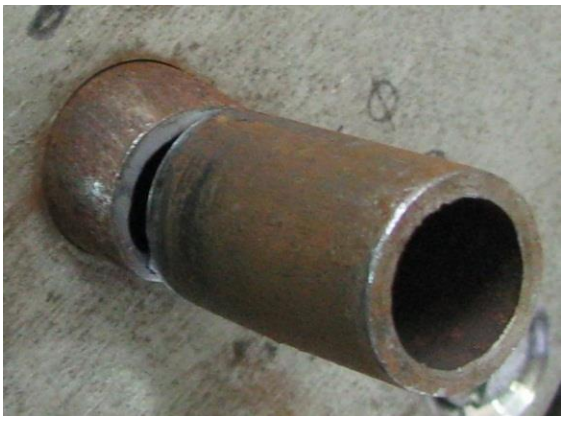


Рис. 5.30 – Фотографія відрізаної заготовки зі сталі Ст. 6 при $e = 1{,}5$ мм

На підставі аналізу результатів теоретичних і експериментальних досліджень відрізки трубчастого прокату за схемою «ексцентричного закручування» можна зробити наступні висновки.

1. Розроблені залежності для розрахунків геометричних і силових параметрів процесу розділення трубного прокату комбінованим навантаженням з використанням кривошипно-кругового механізму, який забезпечує складний плоский рух інструмента, що дозволяє зменшити енергосилові параметри процесу розділення, підвищити жорсткість преса та збільшити коефіцієнти використання пресів за зусиллям і корисної дії.

2. Із застосуванням аналітичних методів та моделювання технологічного процесу відрізки трубчастих заготовок з використанням програмного комплексу Deform встановлено, що на величини енергосилових параметрів процесу розділення трубного прокату і геометричну точність отриманих заготовок значний вплив має величина ексцентриситету. Зі збільшенням величини ексцентриситету енергосилові

параметри відрізки збільшуються. Для забезпечення геометричної точності отриманих заготовок величину ексцентриситету рекомендується приймати в діапазоні $(0{,}5 \ldots 1{,}5)$ товщини стінки труби. Раціональним діапазоном величини кута повороту, при якому відбувається розділення трубчастих зразків, є діапазон $(80 \ldots 120)^{\circ}$, у залежності від механічних характеристик матеріалів.

3. Для перевірки результатів теоретичних розрахунків проведені експериментальні дослідження розділення трубчастих заготовок на установці оригінальної конструкції. Відрізані трубчасті заготовки мають задовільні показники геометричної точності. Розбіжність максимальних значень моменту, отриманих теоретично й експериментально, не перевищує 8%. Максимальні значення величини моменту відрізки, побудовані за результатами експерименту, зміщені по осі кута повороту рухомого ножа вправо. Це пояснюється вибіркою зазорів і пружною деформацією деталей конструкції.

## 5.4 Аналіз конструктивних схем установок із спільним використанням клиношарнірного механізму з увігнутим клином і короткошатунних виконавчих механізмів

У попередніх розділах дисертації досліджені клиношарнірний механізм з увігнутим клином та компактні виконавчі механізми. Перспективним напрямком розвитку обладнання для розділення сортового і трубного прокату є спільне використання клиношарнірного механізму з увігнутим клином і короткошатунних виконавчих механізмів. Їх реалізація дозволяє забезпечити складний плоский рух інструмента, що забезпечує зменшення енергосилових параметрів розділення і потрібну геометричну точність отриманих заготовок. При цьому застосування клиношарнірного механізму з увігнутим клином забезпечує високу жорсткість обладнання і зменшення ефекту розвантаження пресу в момент зняття технологічного навантаження.

Принципова (рис. 5.31, а) та структурна (рис. 5.31, б, в) схеми кривошипно-кулісного механізму з приводом від клиношарнірного механізму з увігнутим клином представлені на рис. 5.31.

Запропонований механізм (див. рис. 5.31, а) складається із клина 1 з радіусом увігнутої поверхні $R$, шарніра 2, повзуна 3, що є одночасно й кулісою, кулісного каменю 4 і кривошипа 5 довжиною $l$.

Аналізуючи запропонований клиношарнірний механізм, можна дійти висновку, що характер руху його ланок аналогічний характеру руху ланок важільного механізму, у якого куліса поступально рухаються, а, отже, структурні схеми цих механізмів ідентичні (див. рис. 5.31, б).

Даний механізм включає п’ять рухомих ланок і сім кінематичних пар п’ятого класу (чотири обертальні і три поступальні). Оскільки механізм плоский, то його рухомість визначається за формулою Чебишева:

$$W = 3 \cdot n - 2 \cdot p_5 - p_4 = 3 \cdot 5 - 2 \cdot 7 - 0 = 1, \qquad (5.56)$$

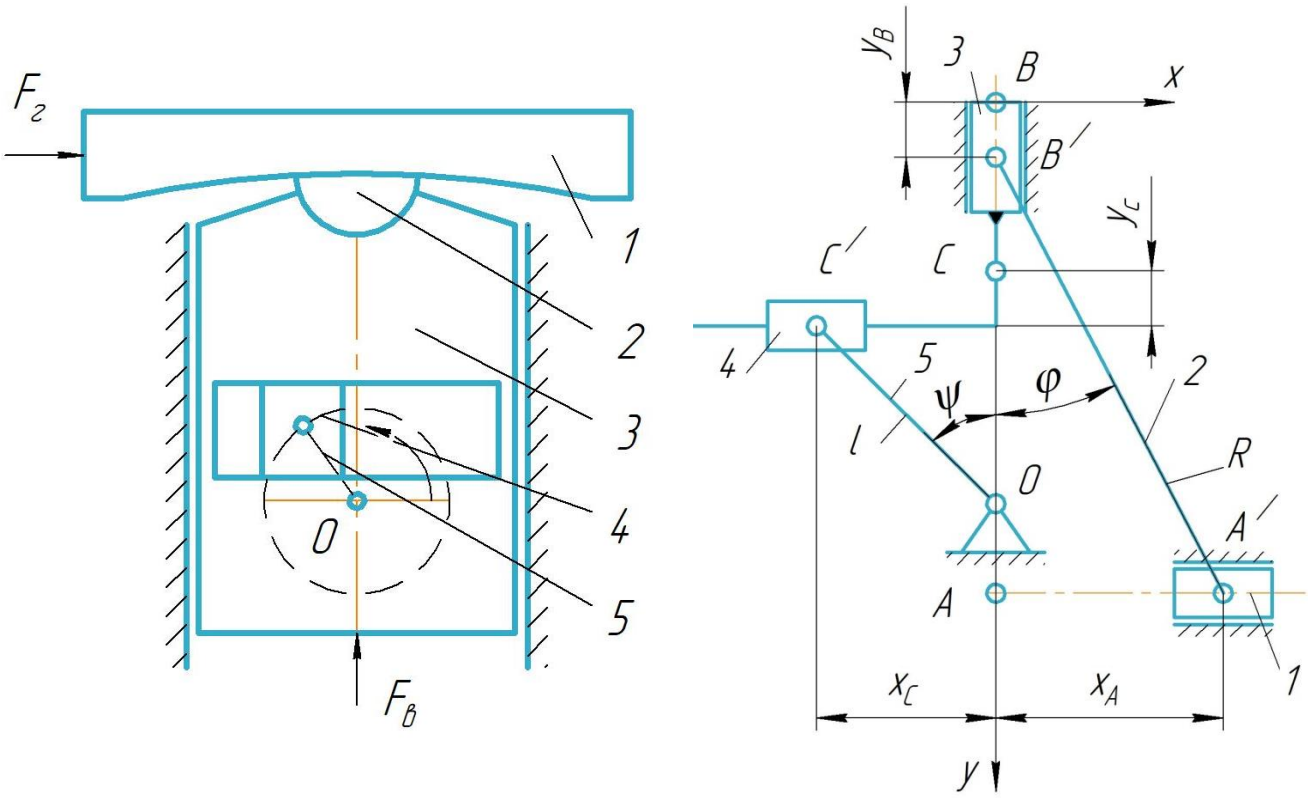
де $n$ – число рухомих ланок механізму;

$p_5$ – число кінематичних пар 5 класу,

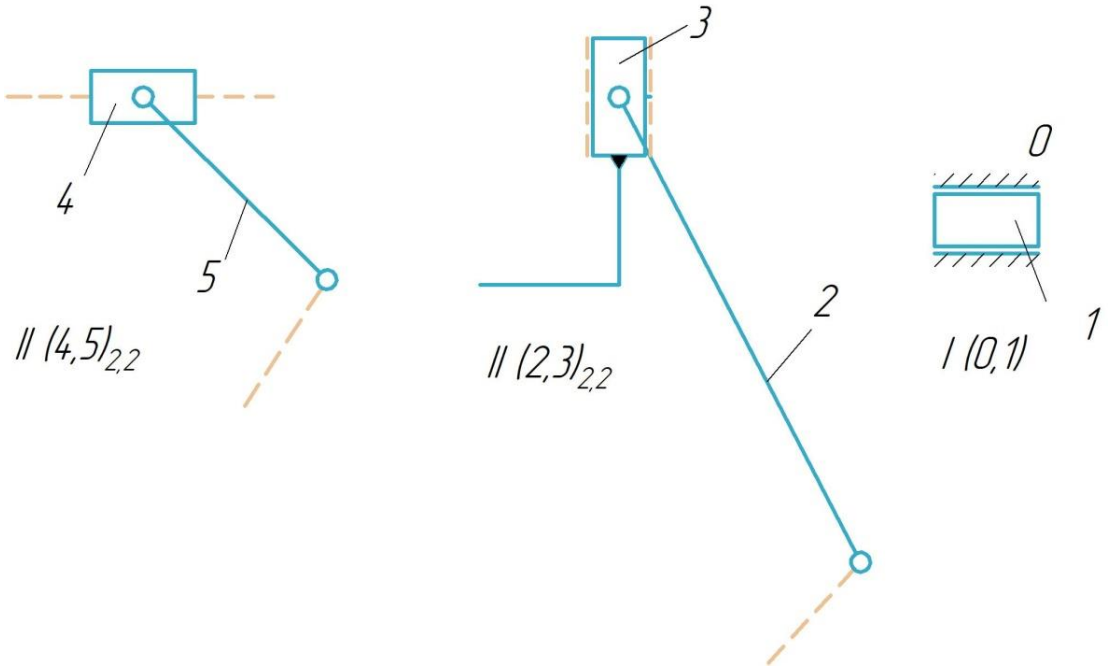
$p_4$ – число кінематичних пар 4 класу.

Отже, для того, щоб надати визначеності руху всіх ланок механізму необхідно задати один незалежний рух вхідній ланці (клину 1). Розчленуємо механізм на первинний механізм і структурні групи Ассура (див. рис. 5.31, б, в). Формула його побудови має вигляд: $I(0,1) \rightarrow II(2,3)_{2,2} \rightarrow II(4,5)_{2,2}$. Отже, клиношарнірний механізм – механізм $II$ класу.

Визначимо основні співвідношення між геометричними параметрами клиношарнірного механізму. Для цього розглянемо механізм у довільному положенні (див. рис. 5.31, б). Початок координат помістимо у вихідне положення точки $B$ (коли точки $A, B, C$ розташовані на одній вертикалі). Нехай клин 1 переміститься на величину ходу $x_A$.




а б




в

Рис. 5.31 – Структурний аналіз кривошипно-кулісного механізму з приводом від клиношарнірного механізму з увігнутим клином

При цьому ланка $AB$ відхиляється від вертикалі на кут $\varphi$, який являє собою змінний кут шарніра 2, а повзун 3, а, отже, і точка $B$ переміщується на відстань $y_B$.

Оскільки повзун 3, що рухається поступально, є одночасно й кулісою, то вертикальна складова переміщення точки $C$ буде дорівнювати переміщенню точки $B$:

$$y_C = y_B = R - R \cdot cos\varphi = R \cdot (1 - cos\varphi) = R - \sqrt{R^2 - x_A^2}. \qquad (5.57)$$

Залежність між ходом клина $x_A$ і кутом $\varphi$ має вигляд:

$$\varphi = arcsin(x_A/R). \qquad (5.58)$$

Горизонтальна складова переміщення точки С може бути визначена, як:

$$x_C = \sqrt{l^2 - (l - y_C)^2} = \sqrt{2 \cdot l \cdot y_C - y_C^2}$$

або через кут $\psi$ поворота кривошипа 5

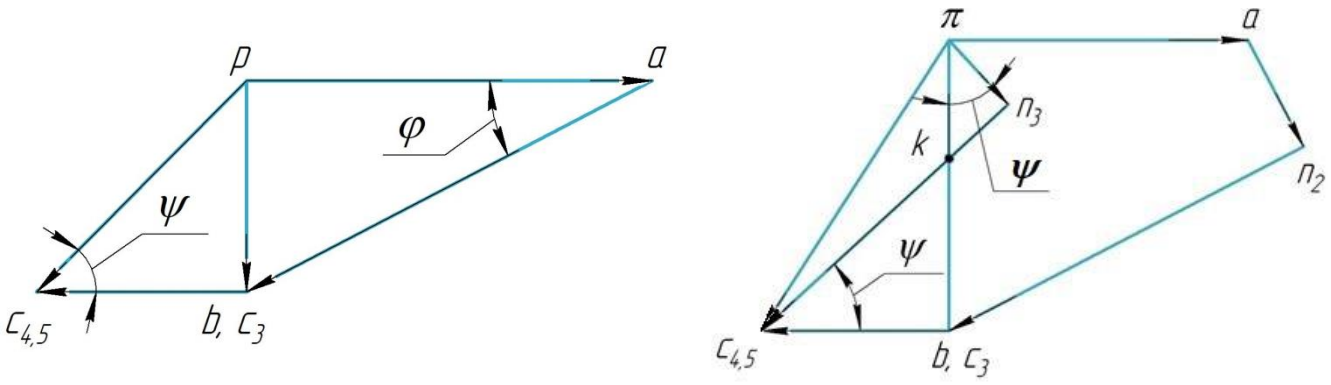
$$x_C = l \cdot sin\psi;$$

$$\psi = arccos((l - y_C)/l). \qquad (5.59)$$

Проведемо кінематичне дослідження клиношарнірного механізму графоаналітичним методом. Для цього побудуємо план швидкостей механізму в розглянутому положенні (рис. 5.32, а).

Швидкість клина, а отже, і точки $A$, спрямована горизонтально. Для визначення швидкості точки $B$, а, отже, і швидкості повзуна, розв'яжемо графічно векторне рівняння:

$$\underset{//Y}{\overline{V}_B} = \underset{//X}{\overline{V}_A} + \underset{\perp BA}{\overline{V}_{BA}}.$$




а б

Рис. 5.32 – Кінематичний аналіз механізму графоаналітичним методом: а – план швидкостей; б – план прискорень

Швидкість точки $C$, яка належить повзуну (кулісі) 3, дорівнює швидкості точки $B$, оскільки повзун здійснює поступальний рух: $V_{C_3} = V_B$.

Тоді швидкість точки $C$, яка належить кулісному каменю 4 і кривошипу 5, визначиться із векторного рівняння:

$$\underset{\perp OC}{\bar{V}_{C_{4,5}}} = \underset{\text{//}Y}{\bar{V}_{C_3}} + \underset{\text{//}X}{\bar{V}_{C_{4,5}C_3}}.$$

Із побудованого плану швидкостей знаходимо:

$$V_{C_3} = V_B = V_A \cdot tg\varphi;$$
$$V_{C_{4,5}} = V_{C_3}/sin\psi = V_A \cdot tg\varphi/sin\psi. \quad (5.60)$$

Кутова швидкість шарніра 2:

$$\omega_2 = V_{BA}/R = V_A/(R \cdot cos\varphi). \quad (5.61)$$

Кутова швидкість кривошипа 5:

$$\omega_5 = V_{C_{4,5}}/l = V_A \cdot tg\varphi/(l \cdot sin\psi). \quad (5.62)$$

Побудуємо план прискорень клиношарнірного механізму (рис. 5.32, б) з урахуванням того, що прискорення клина, а отже й точки $A$, відомо і за величиною, і за напрямком. Запишемо й розв'яжемо графічно векторне рівняння для визначення прискорення точки $B$, тобто повзуна 3:

$$\underset{//Y}{\overline{a}_B} = \underset{//X}{\overline{\overline{a}}_A} + \underset{//AB}{\overline{\overline{a}}^n_{BA}} + \underset{\perp AB}{\overline{a}^\tau_{BA}},$$

де $a^n_{BA} = an_2 = \omega_2^2 \cdot R = V_A^2/(R \cdot cos^2\varphi)$.

Після додаткових побудов, можна отримати прискорення точки $B$:

$$a_B = \pi b = V_A^2/(R \cdot cos^3\varphi) + a_A \cdot tg\varphi. \quad (5.63)$$

Прискорення точки $C_3$, яка належить повзуну (кулісі) 3, дорівнює прискоренню точки $B$, а прискорення точки $C_{4,5}$, яка належить кулісному камню 4 и кривошипу 5, можна визначити із векторного рівняння:

$$\overline{a}_{C_{45}} = \underset{//Y}{\overline{\overline{a}}_{C_3}} + \underset{//X}{\overline{a}_{C_{4,5}C_3}}.$$

Звідки:

$$a_{C_{4,5}} = \sqrt{a^2_{C_3} + a^2_{C_{4,5}C_3}}, \quad (5.64)$$

де $a_{C_3} = a_B = V_A^2/(R \cdot cos^3\varphi) + a_A \cdot tg\varphi$.

Для визначення відносного прискорення $a_{C_{4,5}C_3}$ вирішували графічним способом векторне рівняння:

$$\overline{a}_{C_{4,5}} = \underset{//CO}{\overline{\overline{a}}^n_{C_{4,5}}} + \underset{\perp CO}{\overline{a}^\tau_{C_{4,5}}},$$

де $a^n_{C_{4,5}} = \pi n_3 = \omega_5^2 \cdot l = V_A^2 \cdot tg^2\varphi/(l \cdot sin^2\psi)$.

Точка $k$ – точка перетину дотичного прискорення $a^\tau_{C_{4,5}}$ с вертикалью, звідки:

$$a_{\mathrm{C_{4,5}C_3}} = c_{4,5}c_3 = c_3c_{4,5} = kc_3/tg\psi = (\pi c_3 - \pi k)/tg\psi, \qquad (5.65)$$

де $\pi k = a^n_{C_{4,5}}/cos\psi = (V_A^2 \cdot tg^2\varphi)/(l \cdot cos\psi \cdot sin^2\psi)$.

Тоді:

$$a_{\mathrm{C_{4,5}C_3}} = V_A^2/(R \cdot cos^3\varphi \cdot tg\psi) + a_A \cdot tg\varphi/tg\psi - V_A^2 \cdot tg^2\varphi/(l \cdot sin^3\psi). \qquad (5.66)$$

Для отримання додаткової інформації щодо структурного і кінематичного аналізу розглянутого механізму проводили його розрахунок аналітичним методом з визначенням передатних функцій елементів механізму – ланок і характерних точок, нульового, першого й іншого порядків. Якщо узагальнену координату позначити через $x_1$, то передатні функції точки $A$ повзуна можуть бути представлені у вигляді:

$$\text{ПФ} - \ Y_A = f(x_1), \qquad (5.67)$$

$$\text{ПФ1} - \ dx_A/dx_1 = y_A^{/} = f^{/}(x_1), \qquad (5.68)$$

$$\text{ПФ2} - \ d^2y_A/dx_1^2 = y_A^{//} = f^{//}(x_1). \qquad (5.69)$$

Вирішуючи систему рівнянь:

$$(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 = l_{AB}^2; \qquad (5.70)$$

$$y_B = y_{\mathrm{C}}; \qquad (5.71)$$

визначали координати точки $B$ – $x_{\mathrm{B}}$, $y_{\mathrm{B}}$.

Передатні функції першого порядку можна визначити за формулами:

$$x_B^{/} = x_A^{/} \cdot (x_B - x_A) + y_A^{/} \cdot (y_B - y_A)/(x_B - x_A). \quad (5.72)$$

$$y_B^{/} = y_A^{/} \cdot (y_B - y_A) + x_A^{/} \cdot (x_B - x_A) - x_B^{/} \cdot (x_B - x_A)/(y_B - y_A). \quad (5.73)$$

$$\varphi_{AB}^{/} = \left(y_B^{/} - y_A^{/}\right)/(l_{AB} \cdot cos\varphi_{AB}) = \left(x_A^{/} - x_B^{/}\right)/(l_{AB} \cdot sin\varphi_{AB}). \quad (5.74)$$

Для визначення передатних функцій другого порядку диференціюємо вирази (5.73, 5.74):

$$x_B^{//} = x_A^{//} \cdot (x_B - x_A) + x_A^{/} \cdot \left(x_B^{/} - x_A^{/}\right) + y_A^{//} \cdot (y_B - y_A) + \\ + y_A^{/} \cdot \left(y_B^{/} - y_A^{/}\right) - x_B^{/} \cdot \left(x_B^{/} - x_A^{/}\right)/(x_B - x_A); \quad (5.75)$$

$$y_B^{//} = y_A^{//} \cdot (y_B - y_A) - \left(y_B^{/} - y_A^{/}\right)^2 - \left(x_B^{/} - x_A^{/}\right)^2 - \left(x_B^{//} - x_A^{//}\right)/(y_B - y_A); \quad (5.76)$$

$$\varphi_{AB}^{//} = \left(y_B^{//} - y_A^{//}\right) \cdot l_{AB} \cdot cos\varphi_{AB} - \left(y_B^{/} - y_A^{/}\right) \cdot l_{AB} \cdot sin\varphi_{AB} \cdot \varphi_{AB}^{/}/(l_{AB} \cdot cos\varphi_{AB})^2. \quad (5.77)$$

У такий же спосіб можуть бути визначені передатні функції ланок 4 і 5.

На підставі аналізу досвіду проектування і експлуатації клиношарнірного механізму можна зробити висновок про те, що значна частина ходу увігнутого клина 1 витрачається на вибірку зазорів і створення пружної деформації у системі «прес – оснастка – заготовка». Для підвищення ефективності роботи пресів з клиношарнірним механізмом доцільно їх комплектувати додатковим клином з малим кутом нахилу, який може бути використаний для ходу наближення, вибірки зазорів і навіть для нанесення концентратора напружень на прокат (рис. 5.33). При цьому за допомогою додаткового клина здійснюється нахил увігнутого клина.

За допомогою розробленої програми моделювали рух механізмів установки (див. рис. 5.31) і досліджували вплив кута повороту увігнутого клина – $(0 \ldots 10)^{\circ}$ на кут повороту і аналог кутової швидкості вихідної ланки $OC$.

На рис. 5.34, 5.35 представлені графіки залежностей кута повороту і аналога кутової швидкості вихідної ланки $OC$ від переміщення клина 1 (див. рис. 5.31) – $x_1$ при різних кутах його нахилу: $0^0$; $5^0$, $10^0$. Аналіз графіків дозволяє зробити

висновок про те, що навіть незначна зміна кута нахилу увігнутого клина 1 приводить до істотної зміни кута повороту ланки 5.

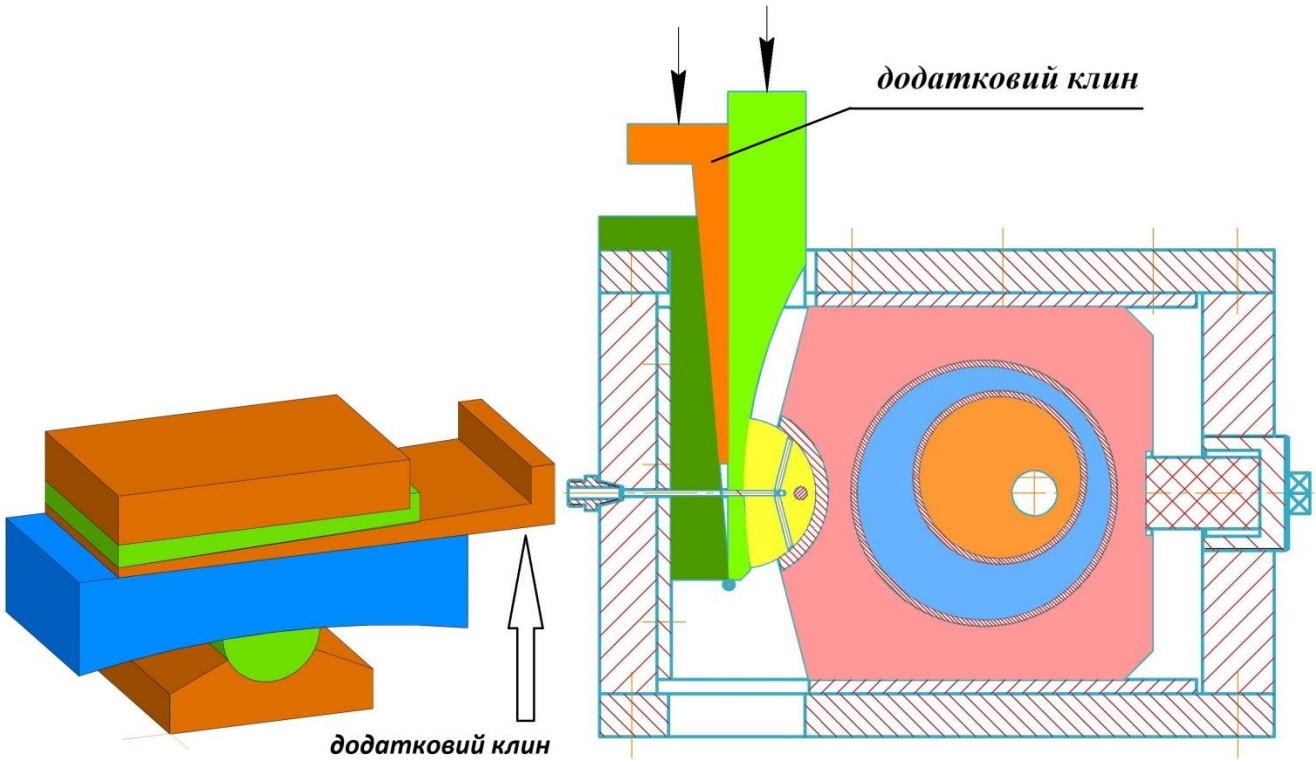



Рис. 5.33 – Клиношарнірний механізм з додатковим клином

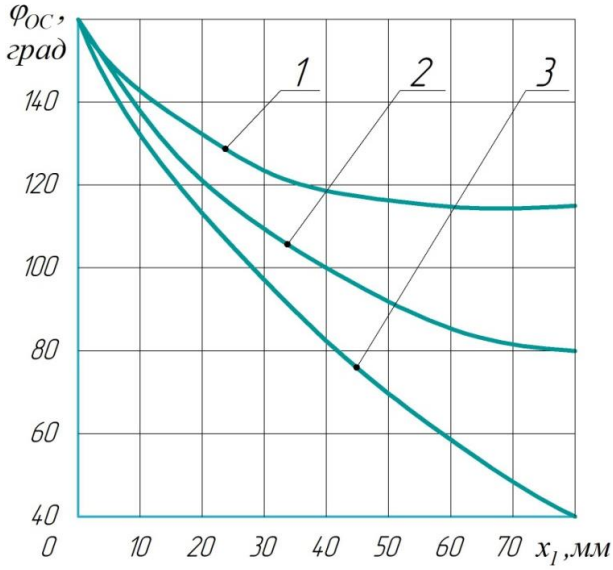



Рис. 5.34 – Графіки залежностей кута повороту вихідної ланки $OC$ від переміщення клина при різних кутах його нахилу: 1 – $0^0$; 2 – $5^0$, 3 – $10^0$

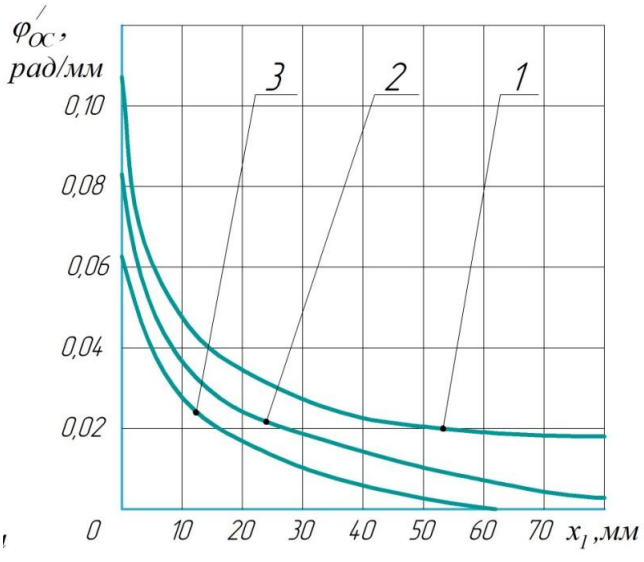
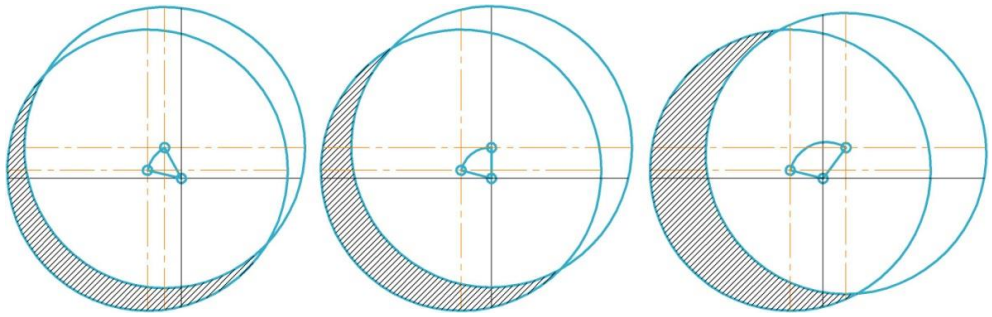



Рис. 5.35 – Графіки залежностей аналога кутової швидкості вихідної ланки $OC$ від переміщення клина при різних кутах його нахилу: 1 – $0^0$; 2 – $5^0$, 3 – $10^0$

На підставі аналізу математичної моделі запропонованої установки встановлено, що саме за рахунок зміни кута нахилу увігнутого клина клиношарнірного механізму можливо підбирати оптимальну траєкторію руху ексцентричних втулкових ножів (рис. 5.36).



а б в

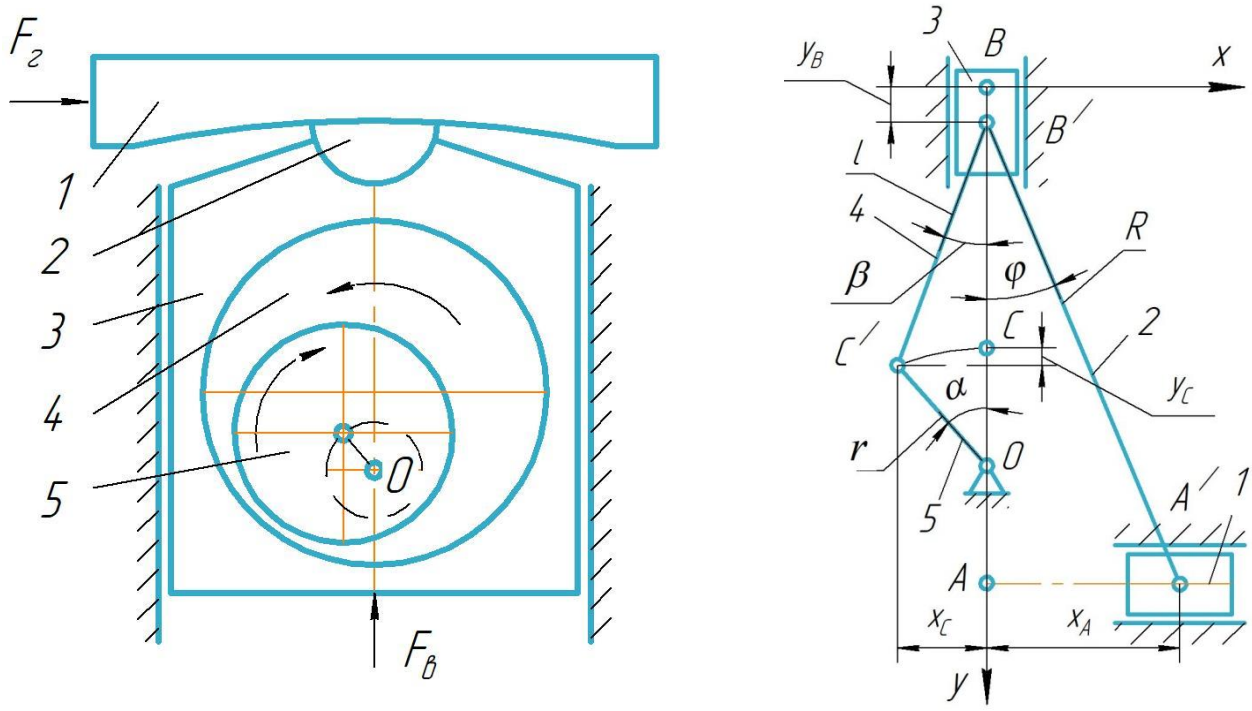
Рис. 5.36 – Траєкторії руху ножів при різних кутах нахилу увігнутого клина: а – $0^{\circ}$; б – $5^{\circ}$; в – $10^{\circ}$

Принципова (рис. 5.37, а) та структурна (рис. 5.37, б, в) схеми кривошипно-кругового механізму з приводом від клиношарнірного механізму з увігнутим клином представлені на рис. 5.37.

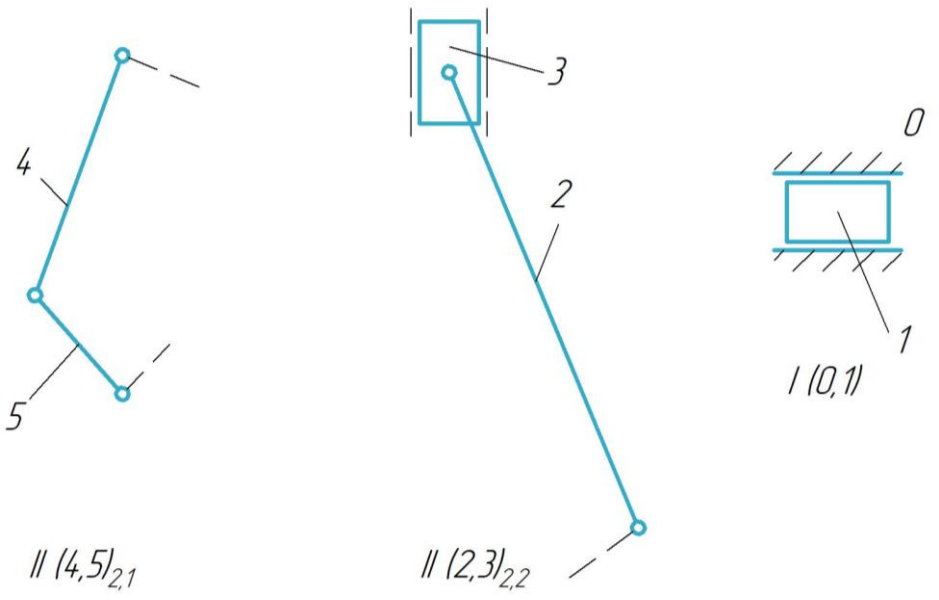
Запропонована конструкція установки (див. рис. 5.37, а) складається із клина 1 з радіусом увігнутої поверхні $R$, шарніра 2, повзуна 3, шатуна 4 длиною $l$ і кривошипа 5 радіусом $r$.

Аналізуючи кривошипно-круговий механізм з клиношарнірним приводом, можна дійти висновку, що характер руху його ланок аналогічний характеру руху ланок важільного механізму, що представляє собою комбінацію двохповзунного й кривошипно-шатунного механізмів, а, отже, структурні схеми цих механізмів ідентичні (див. рис. 5.37, б, в).

Кривошипно-круговий механізм з клиношарнірним приводом включає п'ять рухомих ланок і сім кінематичних пар п'ятого класу (п'ять обертальних і дві поступальні).




а б




в

Рис. 5.37 – Структурний аналіз кривошипно-кругового механізму з приводом від клиношарнірного механізму з увігнутим клином

Оскільки механізм плоский, то його рухомість визначається за формулою Чебишева:

$$W = 3 \cdot n - 2 \cdot p_5 - p_4 = 3 \cdot 5 - 2 \cdot 7 - 0 = 1, \qquad (5.78)$$

де $n$ – число рухомих ланок механізму,

$p_5$ – число кінематичних пар 5 класу,

$p_4$ – число кінематичних пар 4 класу.

Отже, для одержання визначеності руху всіх ланок механізму необхідно задати один незалежний рух вхідній ланці (клину 1). Розчленуємо механізм на первинний механізм і структурні групи Ассура (див. рис. 5.37, в). Формула його будови має вигляд: $I(0,1) \rightarrow II(2,3)_{2,2} \rightarrow II(4,5)_{2,1}$. Таким чином, запропонований механізм – механізм *II* класу.

Визначимо основні співвідношення між геометричними параметрами кривошипно-кругового механізму з клиношарнірним приводом. Для цього розглянемо механізм у довільному положенні (див. 5.37, б). Початок координат помістимо у вихідне положення точки $B$ (коли точки $A$, $B$ і $C$ розташовані на одній вертикалі). Нехай клин 1 переміститься на величину ходу $x_A$. При цьому ланка $AB$ відхиляється від вертикалі на кут $\varphi$, який являє собою змінний кут шарніра 2, а повзун 3, а, отже, і точка $B$ переміщується на відстань $y_B$:

$$y_B = R - R \cdot cos\varphi = R \cdot (1 - cos\varphi) \tag{5.79}$$

або

$$y_B = R - \sqrt{R^2 - x_A^2} \tag{5.80}$$

Залежність між ходом клина $x_A$ й кутом $\varphi$ має вигляд:

$$\varphi = arcsin(x_A/R). \tag{5.81}$$

При переміщенні повзуна 3 на відстань $y_B$, шатун 4 відхиляється від осі повзуна на кут $\beta$, а кривошип 5 повертається на кут $\alpha$. При цьому вертикальна складова переміщення точки $C$ (кінця кривошипа):

$$y_C = l \cdot cos\beta + y_B - l = y_B - l \cdot (1 - cos\beta) \quad (5.82)$$

або через кут повороту кривошипа:

$$y_C = \sqrt{l^2 - (r \cdot sin\alpha)^2} + y_B - l. \quad (5.83)$$

Тоді горизонтальна складова переміщення точки $C$ визначиться, як

$$x_C = r \cdot sin\alpha = l \cdot sin\beta = \sqrt{r^2 - (r - y_C)^2} = \sqrt{2 \cdot r \cdot y_C - y_C^2}. \quad (5.84)$$

Звідси можна одержати залежності між кутами повороту кривошипа 5 і шатуна 4:

$$sin\beta = r \cdot sin\alpha / l;\ cos\beta = \sqrt{1 - sin^2\beta} = \sqrt{1 - (r \cdot sin\alpha / l)^2}.$$

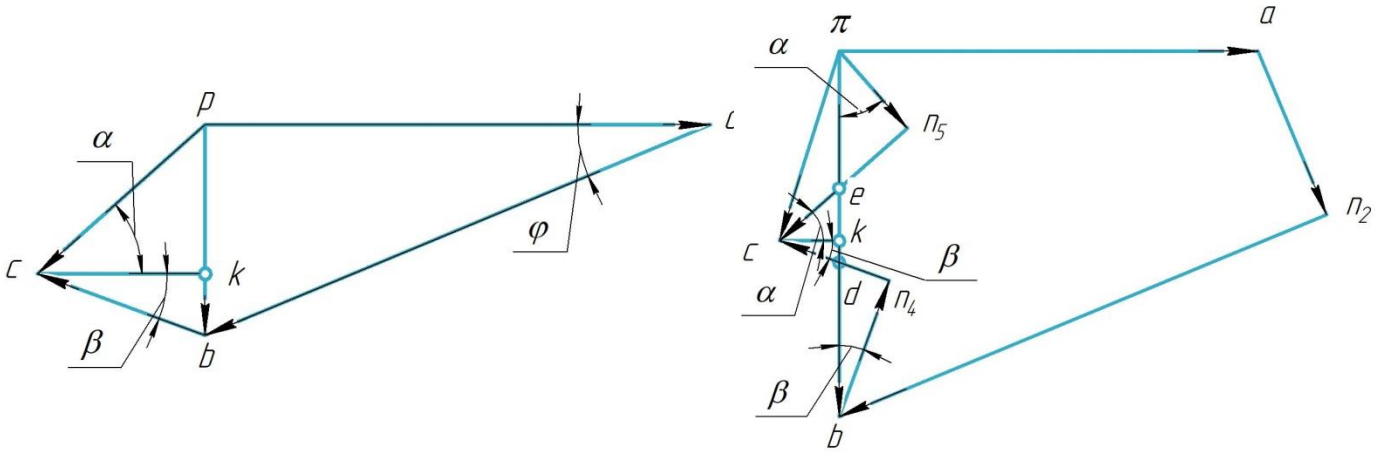
Для визначення залежності між кутом повороту кривошипа α і переміщенням повзуна 3 можна скористатися відомою формулою для кривошипно-ползунного механізму преса [99]:

$$y_B = r \cdot \left[(1 - cos\alpha) + r \cdot \left(1 - cos(2 \cdot \alpha)\right)/4 \cdot l\right]. \quad (5.85)$$

Проведемо кінематичне дослідження клиношарнірного механізму графоаналітичним методом. Для цього побудуємо план швидкостей механізму в розглянутому положенні (рис. 5.38, а).

Швидкість клина, а отже, і точки $A$, спрямована горизонтально й визначається застосовуваним приводом клина. Для визначення швидкості точки $B$, а, отже, і швидкості повзуна, розв'яжемо графічно векторне рівняння:

$$\underset{//Y}{\overline{V}_B} = \underset{//X}{\overline{V}_A} + \underset{\perp BA}{\overline{V}_{BA}}. \quad (5.86)$$




а б

Рис. 5.38 – Кінематичний аналіз механізму графоаналітичним методом: а – план швидкостей; б – план прискорень

З побудованого плану швидкостей знаходимо, що

$$V_{BA} = V_A/cos\varphi,$$
$$V_B = V_A \cdot tg\varphi. \quad (5.87)$$

Швидкість точки $C$ визначиться з векторного рівняння:

$$\underset{\perp OC}{\overline{V}_C} = \underset{//Y}{\overline{V}_B} + \underset{\perp BC}{\overline{V}_{CB}}. \quad (5.88)$$

Розв'язавши графічно це векторне рівняння й провівши через отриману точку $c$ допоміжну горизонталь $ck$, одержимо:

$$V_B = pb = pk + kb = pc \cdot sin\alpha + cb \cdot sin\beta, \quad (5.89)$$

де $ck = pc \cdot cos\alpha = cb \cdot cos\beta$;

$cb = pc \cdot cos\alpha / cos\beta$

Отже:

$$V_B = pb = pc \cdot sin\alpha + pc \cdot cos\alpha \cdot tg\beta. \quad (5.90)$$

Тоді швидкість кінця кривошипа (точки $C$):

$$V_C = pc = V_B/(sin\alpha + cos\alpha \cdot tg\beta) = V_B \cdot tg\varphi/(sin\alpha + cos\alpha \cdot tg\beta), \quad (5.91)$$

а відносна швидкість

$$V_{CB} = bc = V_B \cdot cos\alpha/(sin\alpha \cdot cos\beta + cos\alpha \cdot sin\beta) = \\ = V_B \cdot cos\alpha/= V_A \cdot tg\varphi \cdot cos\alpha/sin(\alpha + \beta). \quad (5.92)$$

Кутова швидкість шарніра 2:

$$\omega_2 = V_{BA}/R = V_A/(R \cdot cos\varphi). \quad (5.93)$$

Кутова швидкість кривошипа 5:

$$\omega_5 = V_C/r = V_A \cdot tg\varphi/(r \cdot (sin\alpha + cos\alpha \cdot tg\beta)). \quad (5.94)$$

Кутова швидкість шатуна 4:

$$\omega_4 = V_{CB}/l = V_A \cdot tg\varphi \cdot cos\alpha/(l \cdot \sin(\alpha + \beta)). \quad (5.95)$$

Побудуємо план прискорень клиношарнірного механізму (рис. 5.38, б), з урахуванням того, що прискорення клина, а отже й точки $A$, відомо і за величиною, і за напрямком. Запишемо й розв'яжемо графічно векторне рівняння для визначення прискорення точки $B$, тобто повзуна 3:

$$\underset{//Y}{\overline{a}_B} = \underset{//X}{\overline{\overline{a}}_A} + \underset{//AB}{\overline{\overline{a}}^n_{BA}} + \underset{\perp AB}{\overline{a}^\tau_{BA}}, \tag{5.96}$$

де $a^n_{BA} = an_2 = \omega_2^2 \cdot R = V_A^2/(R \cdot cos^2\varphi)$.

Провівши деякі додаткові побудови, можна одержати прискорення точки *B*:

$$a_B = \pi b = V_A^2/(R \cdot cos^3\varphi) + a_A \cdot tg\varphi. \tag{5.97}$$

Прискорення точки $C$ визначиться із системи векторних рівнянь:

$$\overline{a}_C = \underset{//Y}{\overline{a}_B} + \underset{//CB}{\overline{\overline{a}}^n_{CB}} + \underset{\perp CB}{\overline{a}^\tau_{CB}},$$

$$\overline{a}_C = \underset{//CO}{\overline{\overline{a}}^n_C} + \underset{\perp CO}{\overline{a}^\tau_C}, \tag{5.98}$$

де $a^n_{CB} = bn_4 = \omega_4^2 \cdot l = V_A^2 \cdot tg^2\varphi \cdot cos^2\alpha/(l \cdot sin^2(\alpha+\beta))$,
$a^n_C = \pi n_5 = \omega_5^2 \cdot r = V_A^2 \cdot tg^2\varphi/(r \cdot (sin\alpha + cos\alpha \cdot tg\beta)^2)$.

Вирішив графічну систему векторних рівнянь і побудував точку $c$ на плані прискорень, визначимо шукане прискорення точки *C*, як:

$$a_C = \sqrt{(a^n_C)^2 + (a^\tau_C)^2}, \tag{5.99}$$

де недостатнє значення дотичного прискорення точки $C$ дорівнює:

$$a^\tau_C = n_5c = n_5e + ec = \pi n_5 \cdot tg\alpha + ec = a^n_C \cdot tg\alpha + ec. \tag{5.100}$$

Для визначення довжини відрізка *ec*, проведемо через побудовану точку *c* допоміжну горизонталь $ck$ і тоді:

$$a_B = \pi b = \pi e + bd + ek + kd = a_C^n/cos\alpha + a_{CB}^n/cos\beta + ck(tg\alpha + tg\beta). \quad (5.101)$$

Звідки:

$$ck = (a_B \cdot cos\alpha \cdot cos\beta - a_C^n \cdot cos\beta - a_{CB}^n \cdot cos\alpha)/\big(cos\alpha \cdot cos\beta \cdot (tg\alpha + tg\beta)\big) =$$
$$= (a_B \cdot cos\alpha \cdot cos\beta - a_C^n \cdot cos\beta - a_{CB}^n \cdot cos\alpha)/sin(\alpha + \beta). \quad (5.102)$$

Тоді:

$$ec = ck/cos\alpha = (a_B \cdot cos\alpha \cdot cos\beta - a_C^n \cdot cos\beta - a_{CB}^n \cdot cos\alpha)/\big(cos\alpha \cdot sin(\alpha + \beta)\big) =$$
$$= (a_B \cdot cos\beta - a_C^n \cdot cos\beta/cos\alpha - a_{CB}^n)/sin(\alpha + \beta), \quad (5.103)$$

$$ec = \frac{ck}{\cos\alpha} = \frac{a_B \cos\alpha \cos\beta - a_C^n \cos\beta - a_{CB}^n \cos\alpha}{\cos\alpha \sin(\alpha + \beta)} = \frac{a_B \cos\beta - a_C^n \cos\beta / \cos\alpha - a_{CB}^n}{\sin(\alpha + \beta)}, \quad (5.104)$$

звідки

$$a_C^\tau = a_C^n \cdot tg\alpha + (a_B \cdot cos\beta - a_C^n \cdot cos\beta/cos\alpha)/sin(\alpha + \beta). \quad (5.105)$$

Силовий аналіз розглянутих установок (див. рис. 5.31, 5.37) з кривошипно-круговим і кривошипно-кулісним механізмами з приводом від клиношарнірного механізму з увігнутим клином виконати складно як аналітичним, так і графоаналітичним методом. Але ж силові розрахунки окремих складових цих механізмів представлені вище.

## 5.5 Перспективні схеми обладнання з використанням компактних виконавчих механізмів

На підставі виконаних досліджень розроблено і запатентовано ряд конструкцій обладнання з використанням компактних виконавчих механізмів:

клиношарнірного, кривошипно-кругового і кривошипно-кулісного (рис. 5.39, 5.40). Компактні виконавчі механізми мають розвинені контактні поверхні, що знижує питомі сили в опорах й сприяє гасінню коливань. Це у комбінації з малою деформаційною зоною приводить до високої динамічної стійкості.

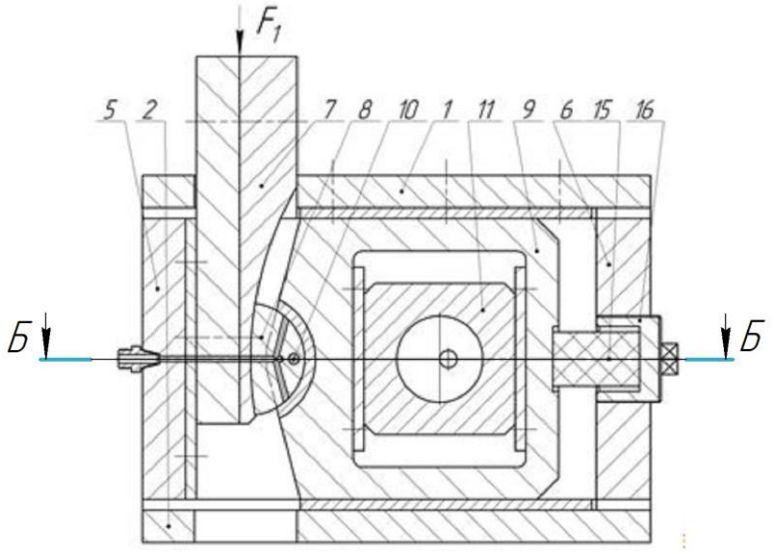
Клиношарнірні механізми також мають великі опорні поверхні деталей, невелику висоту ланок в напрямку дії робочої сили, можливість винесення найбільш піддатливих деталей і вузлів преса із зони дії максимальної сили.

Застосування клиношарнірного механізму підвищує енергосилові показники обладнання, надійність його роботи та геометричну точність відрізаних заготовок. Розширюються технологічні можливості обладнання.

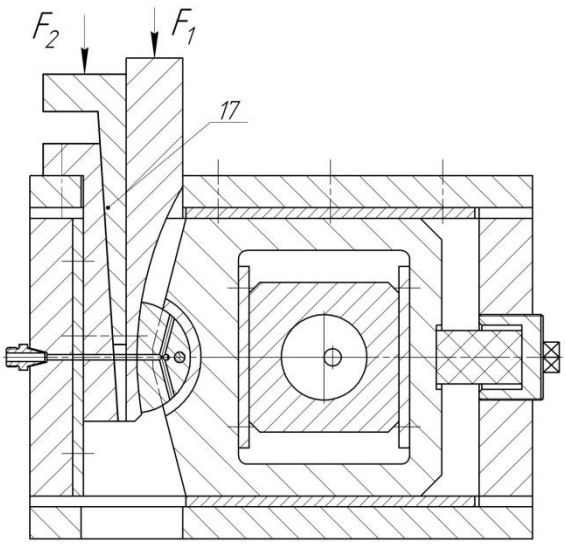
У вихідному положенні пристрою (див. рис. 5.39, а) з кривошипно-кулісним механізмом прокат розміщається в отворах втулкових ножів 13, 14. Під дією сили приводу клин 7 рухається вниз, взаємодіючи по криволінійній поверхні із шарніром 8, який повертається навколо своєї осі. При цьому плоский рух шарніра 8 перетворюється у поступальний рух повзуна 9, який переміщується вправо. Камінь 11 також рухається вправо, а ножі 13, 14 здійснюють ексцентричну відрізку прокату. Після здійснення робочого ходу повзун 9 повертається у вихідний стан під дією сили буфера 15. Можливі три конструктивні схеми установлення втулкових ножів 13, 14.

Варіант 1 (див. рис. 5.39, а). Втулкові ножі 13, 14 виконані цільними у виді двох ексцентричних циліндрів, осі обертання яких зміщені відносно один одного на величину ексцентриситету $e$ і встановлені з можливістю обертального руху в протилежні сторони. При ході повзуна 9 вправо ножі 13, 14 обертаються в протилежних напрямах до крайнього правого положення, здійснюючи відрізку прокату (труб) [320].

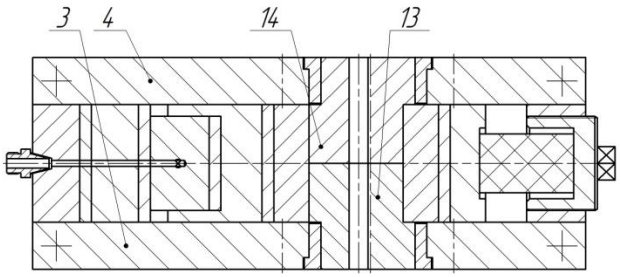
Варіант 2 (див. рис. 5.39, б). Один із втулкових ножів 13 виконаний у вигляді ексцентричного циліндра з можливістю обертального руху з ексцентриситетом $e$, а другий 14 – нерухомим, який кріпиться до стінки 4.




*Б-Б*

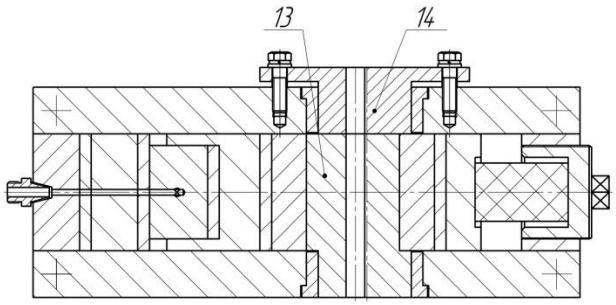



г



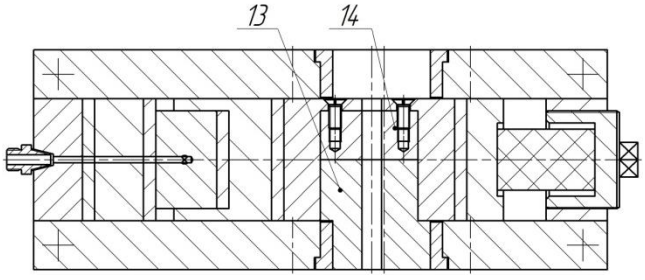

а

*Б-Б*

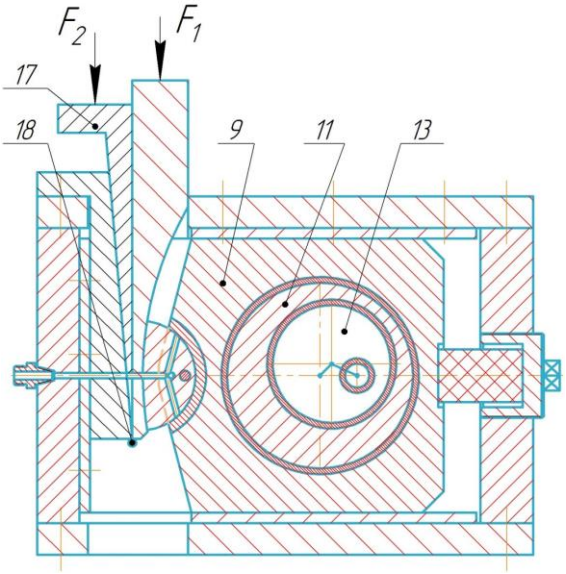



б

*Б-Б*




в




д

Рис. 5.39 – Пристрої для відрізки сортового і трубного прокату «ексцентричним закручуванням»

Варіант 3 (див. рис. 5.39, в). Один із втулкових ножів 13 виконаний у вигляді ексцентричного циліндра з можливістю обертального руху з ексцентриситетом $e$, а другий 14 – нерухомим, який кріпиться до каменя 11 [321].

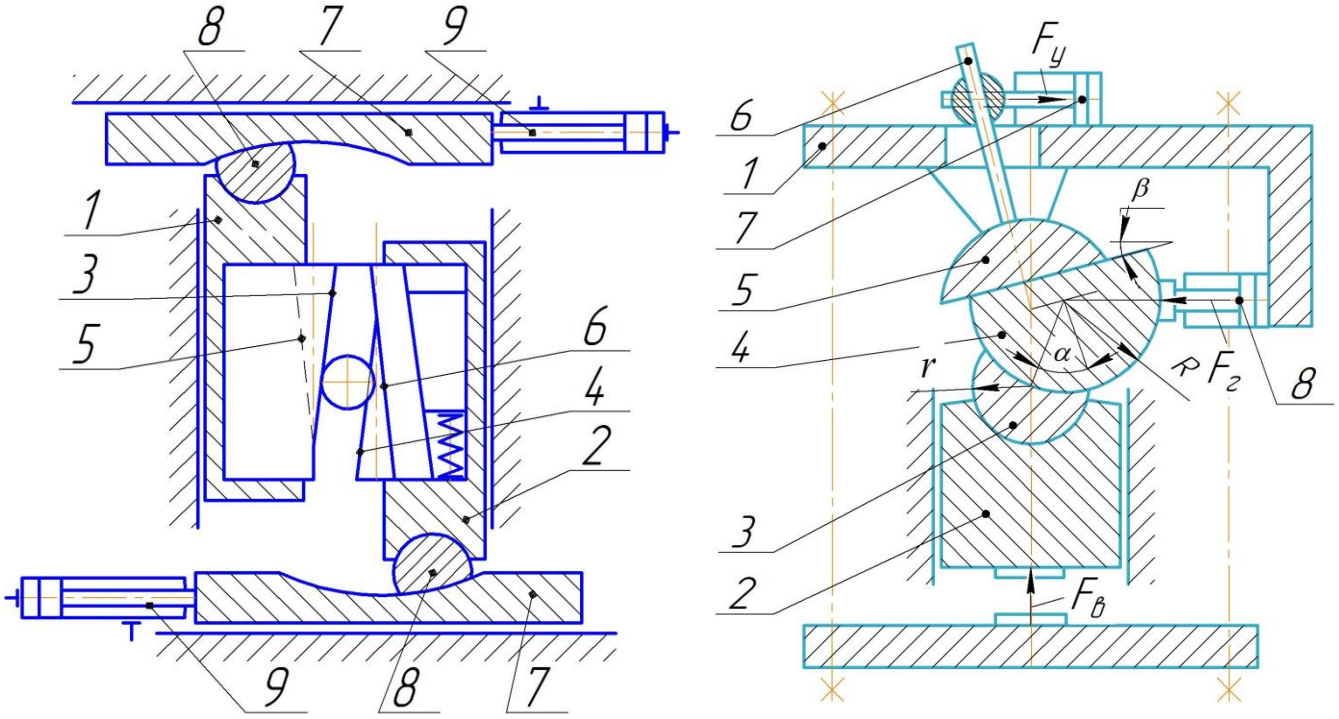
У конструкції пристрою може бути застосований клин 17 з постійним кутом нахилу $(5\ldots10)^0$, який розташовано між робочим увігнутим клином і корпусом (див. рис. 5.39, г) [322] і призначений для виконання ходу наближення і вибірки зазорів.

На рис. 5.39, д запропонована конструкція обладнання для відрізки труб, у якій в якості виконавчого механізму застосовано кривошипно-круговий механізм у поєднанні з клиношарнірним механізмом. Під дією клиношарнірного механізму повзун 9 переміщується вправо. При цьому кругова шайба 11 обертається навколо своєї осі і видавлює рухомий втулковий ніж 13, який обертається у протилежну сторону на кут, достатній для відрізки заготовки «ексцентричним закручуванням». У конструкції передбачена можливість зміни кута нахилу увігнутого клина клиношарнірного механізму, внаслідок чого можна підбирати раціональну траєкторію руху ексцентричних втулкових ножів. Це дозволить забезпечити високу геометричну точність заготовок, які розділяються при мінімальній енергоємності процесу. Для цього між увігнутим клином і плитою, які з'єднані між собою за допомогою шарніра 18, установлений клин 17 з постійним кутом нахилу з можливістю зворотно-поступального руху за допомогою різьбової пари [322].

Запропонована конструкція пристрою для відрізки прокату (див. рис. 5.40, а) містить ножі 1, 2 з ріжучими 3, 4 і притискними 5, 6 кромками, які встановлені в направляючих з можливістю одночасного зустрічного плоско-паралельного переміщення.

При цьому приводи ножів виконано у вигляді клиношарнірних механізмів, кожен із яких складається із клина 7 з увігнутою циліндричною поверхнею і шарніру 8, який встановлено з можливістю взаємодії однією опуклою поверхнею з відповідною увігнутою поверхнею клина 7, а другою опуклою поверхнею – з відповідною поверхнею ножа [323].

Клиношарнірний прес з опуклим клином (див. рис. 5.40, б) містить: станину 1, в напрямних якої розміщено повзун 2, упорну деталь, шарнір 3 і клин 4, який плоскою робочою поверхнею контактує з упорною деталлю, а другою, циліндричною – з шарніром 3, що у свою чергу по циліндричній поверхні контактує з повзуном 2. При цьому упорна деталь виконана у вигляді сектора циліндра 5 зі штангою 6 з можливістю повороту для зміни кута нахилу упорної деталі. Клин 4 може бути виконаний як з опуклою, так і з увігнутою поверхнею, яка контактує з відповідною поверхнею шарніра 3.




а б

Рис. 5.40 – Конструкції обладнання для розділення прокату з клиношарнірним механізмом

Клиношарнірний прес працює таким чином. За допомогою гідроциліндра 8 приводиться в рух клин 4 силою $F_г$. Рух від клина 4 через шарнір 3 передається до повзуна 2, який здійснює робочий хід вертикальною силою $F_в$ [324, 325].

Залежність між приводною силою на клині 4 $F_г$ і технологічною силою на повзуні 2 $F_в$ клиношарнірного механізму має вигляд:

$$F_в = F_г \cdot cos(\alpha - \beta + \rho + \psi)/(cos\beta \cdot sin(\alpha + \rho + \psi)), \quad (5.106)$$

де $\alpha$ – кут, який визначає положення клина 4 и повзуна 2;

$\beta$ – кут між напрямом переміщення клина 4 и горизонталлю;

$\rho = arctgf$ – кут тертя у напрямних клина 4 і повзуна 2;

$\psi = arctg(f \cdot (R + r)/R)$ – сумарний кут тертя у циліндричних поверхнях клина 4 і шарніра 3;

$f$ – коефіцієнт тертя у кінематичних парах;

$R$ – радіус циліндричної поверхні «клин 4 – шарнір 3»;

$r$ – радіус циліндричної поверхні «шарнір 3 – повзун 2».

Можливість зміни величини сили $F_в$ при постійній $F_г$ забезпечується за рахунок зміни величини кута $\beta$. Поворот упорної деталі 5 здійснюється прикладенням сили $F_у$ з боку гідроциліндра 7 до штанги 6. Проведені розрахунки ($R = 80$ мм; $r = 20$ мм; $f = 0{,}1$) показують, що зі збільшенням кута $\beta$: від 0° до 15° співвідношення сил $F_в/F_г$ збільшується в середньому на 30%; від 15º до 30º – на 40%; від 30º до 45º – на 50%. Отже, змінюючи у клиношарнірному механізмі кути $\alpha$ і $\beta$, можна домогтися різного характеру зміни співвідношення технологічної і приводної сил $F_в/F_г$, що дозволить для реалізації безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату підібрати конструкцію і режим роботи клиношарнірного пресу. Після здійснення корисної роботи цикл роботи клиношарнірного преса поновлюється.

**Висновки до розділу 5:**

1. Аналізом розробленої класифікації клиношарнірних механізмів виявлений клиношарнірний механізм з увігнутим клином, який забезпечує максимальну технологічну силу на початку робочого ходу при розділенні прокату та має високу жорсткість. Із застосуванням аналітичних і графоаналітичних методів, методу скінченних елементів розроблені залежності для розрахунку технологічних параметрів процесу розділення сортового прокату на пресах з клиношарнірним механізмом із увігнутим клином. Запропонована методика розрахунків

геометричних, кінематичних і силових параметрів пресів із застосуванням цього механізму для реалізації безвідходних способів розділення сортового прокату. Розбіжність результатів кінематичного й динамічного аналізів, виконаних аналітичним і графоаналітичним методами, становить не більше 3%. Застосування запропонованого клиношарнірного механізму з увігнутим клином дозволяє збільшити коефіцієнт використання пресів за зусиллям до (0,7…0,8), зменшити наслідки розвантаження преса в момент зняття технологічного навантаження. Геометрична точність отриманих заготовок задовільна. Вірогідність теоретичних результатів підтверджена експериментальними даними (розбіжність у межах 8%).

2. Аналізом вдосконаленої конструкції клиношарнірного механізму з увігнутим клином із поворотним ножем встановлено, що запропонований механізм має меншу кількість поверхонь тертя і може бути використаний для відрізки зсувом фасонного прокату складної конфігурації. Застосування механізму дозволяє забезпечити складний плоский рух інструмента, результатом якого є сполучений процес відрізки зсувом і кручення, що зменшує енергосилові параметри процесу розділення та шкідливі наслідки післядії розвантаження преса у кінці робочого ходу. На основі аналізу результатів моделювання із застосуванням графоаналітичного методу та програмного комплексу Deform встановлені залежності розрахунків геометричних і силових параметрів обладнання з використанням таких механізмів, які забезпечують раціональні режими відрізки. Величину параметру, який визначає положення центру обертання шарніру механізму, рекомендується вибирати рівною половині радіуса увігнутого клина. Установлено, що застосування установки нової конструкції забезпечує зниження енергосилових параметрів процесу розділення у порівнянні з відомими конструкціями сучасного обладнання. Проведені експериментальні дослідження підтвердили адекватність математичних моделей й правильність теоретичних висновків. Розбіжність теоретичних і експериментальних результатів не перевищує 8%.

3. Аналізом теоретичних розрахунків процесу відрізки трубчастих заготовок за схемою «ексцентричного закручування» з використанням кривошипно-кругового механізму, виконаних за допомогою аналітичного методу ТММ та методу

скінченних елементів, встановлені залежності для розрахунку геометричних і силових параметрів процесу розділення запропонованим способом. Виявлено, що зі збільшенням величини ексцентриситету енергосилові параметри розділення збільшуються. Для забезпечення геометричної точності отриманих заготовок величину ексцентриситету рекомендується приймати в діапазоні (0,5...1,5) від товщини стінки труби. Застосування обладнання з кривошипно-круговим і кривошипно-кулісним механізмами забезпечує складний плоский рух інструмента, що дозволяє зменшити енергосилові параметри процесу розділення, підвищити жорсткість преса та збільшити коефіцієнти використання пресів за зусиллям і корисної дії. Результати експериментальних досліджень задовільно узгоджуються з теоретичними даними – розбіжність максимальних значень моменту відрізки не перевищує 8%.

4. Із застосуванням графоаналітичних методів ТММ встановлені залежності для розрахунків геометричних, кінематичних і енергосилових параметрів обладнання із клиношарнірним приводом з увігнутим клином у комбінації з кривошипно-круговим або кривошипно-кулісним механізмами для розділення сортового і трубного прокату. Обґрунтована доцільність застосування додаткового клина з постійним кутом нахилу до $10^0$, який може бути використаний для ходу наближення, вибірки зазорів, зміни кута нахилу увігнутого клина, що дозволяє забезпечити оптимальну траєкторію руху ножів і геометричну точність заготовок. Застосування запропонованих конструкцій виконавчих механізмів дозволяє зменшити енергосилові параметри процесу розділення, шкідливі наслідки розвантаження преса в кінці робочого ходу, підвищити жорсткість преса, коефіцієнти корисної дії і використання преса за зусиллям.

Розроблено і запатентовано конструкції обладнання з компактними виконавчими механізмами для безвідходного розділення сортового прокату.

*Результати досліджень опубліковані в роботах [113, 311, 312, 318 – 325].*

# РОЗДІЛ 6
# РОЗРОБКА, МОДЕЛЮВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ПРОЦЕСІВ РОЗДІЛЕННЯ СОРТОВОГО ПРОКАТУ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕНЕРГІЇ РОЗВАНТАЖЕННЯ ПРЕСА

Як було зазначено у попередніх розділах, однією з основних проблем устаткування для процесів безвідходного розділення прокату є те, що воно працює в умовах різкого скидання навантаження в момент стрімкого зростання закритичної тріщини і відділення заготовки. Це негативне явище приводить до руйнування деталей, станини преса й виводу з ладу його фундаменту [98, 326]. Через ці явища доводиться вибирати обладнання із завищеною потужністю. Тому устаткування для процесів розділення має низький коефіцієнт завантаження: пресове устаткування зусиллям менш 2 МН використовується не більше ніж на $(60 \ldots 80)\%$ від номінального зусилля; зусиллям менше 4 МН – на $(40 \ldots 60)\%$; зусиллям більш 4 МН – менше 40% [327, 328].

Вирішенням цієї проблеми може бути розробка нових схем безвідходного розділення сортового прокату з використанням стандартного пресового обладнання [329]. У роботах [330 – 332] запропоновано використовувати енергію розвантаження преса в момент зняття технологічного навантаження на здійснення корисної роботи – нанесення концентратора напружень.

Нанесення концентратора напружень можливо проводити двома способами [333]:

- за рахунок вдавлення інструмента в прокат;
- за рахунок зсуву частини прокату (заготовки) відносно основного профілю прокату.

Перший варіант, відповідно до висновків, зроблених у розділі 1, доцільно проводити вдавленням клинового ножа, який забезпечує нанесення ефективного концентратора напружень і має практичні переваги при реалізації.

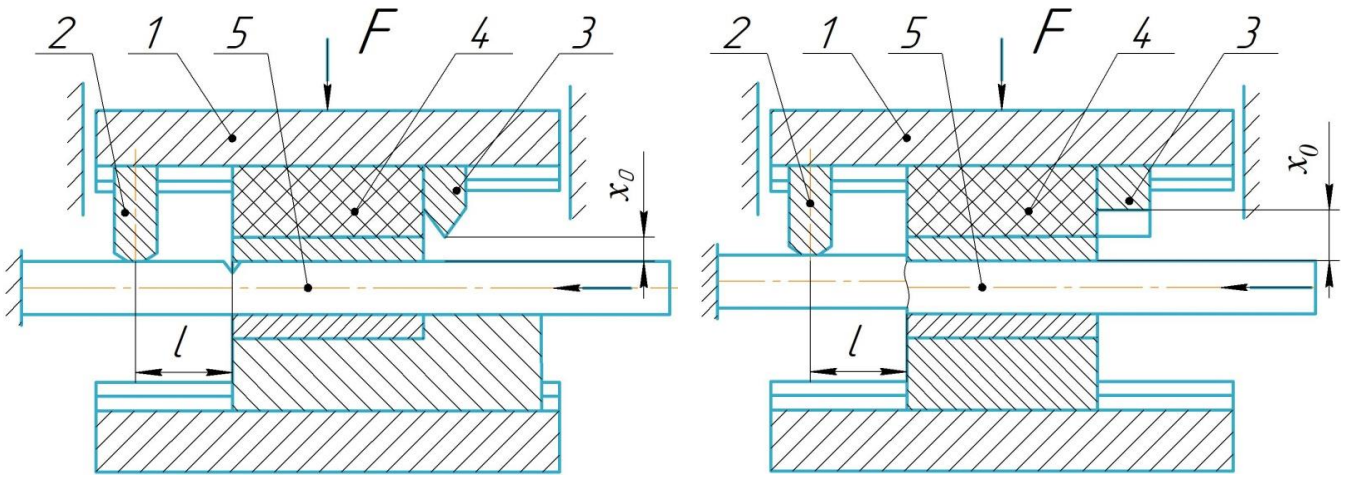
Другий варіант нанесення концентратора напружень супроводжується виникненням і розвитком субмікро- і мікротріщин, їх накопиченням, що визначає

напрямок майбутньої макротріщини. При цьому в обсязі металу, що примикає до площини руйнування, при відрізці зсувом має місце ефект зміцнення, що супроводжується зміною механічних характеристик макро- і мікроструктури металу. Підвищується тимчасовий опір, напруження текучості, твердість, знижуються характеристики пластичності. Зароджується макротріщина на лінії, що з'єднує надрізи з обох сторін прокату. Таким чином, концентратором напружень у даному способі є наведена магістральна макротріщина. Макротріщина може мати гранично великі розміри, що відповідає оптимальним вимогам, пропонованим до процесу подальшої холодної ломки згином. При цьому передбачається, що уздовж усієї траси руху наведеної тріщини створюються додаткові напруження стискання, орієнтовані уздовж необхідного напрямку розділення.

Розвиток магістральної тріщини відбувається шляхом розриву перемичок між мікротріщинами й мікродефектами, наявними як у вихідному матеріалі, так і тими, які утворюються на пластичному етапі надрізки. Передбачається, що наведені напруження стискання в площині концентратора напружень забезпечують стабілізацію траєкторії тріщини.

Для реалізації запропонованих ідей розроблені конструктивні схеми установок для ломки сортового прокату згином. Типова схема установки (рис. 6.1) складається зі станини, рухомої плити 1, на якій закріплені ломник 2 і ніж 3. Установка служить для нанесення концентратора напружень вдавленням клинового ножа 3 (див. рис. 6.1, а) або для нанесення концентратора напружень за рахунок зсуву частини прокату (заготовки) відносно основного профілю (див. рис. 6.1, б). Під дією сили $F$ з боку привода рухома плита 1 рухається вниз, здійснюючи затиск (за допомогою пружного елемента 4) і ломку згином прокату 5, з попередньо нанесеним концентратором напружень, у площині розділення на плечі $l$.

Інша конструктивна схема установки (рис. 6.2) відрізняється тим, що сортовий прокат розділяється відрізкою зсувом у напрямку, протилежному напрямку нанесення концентратора напружень.




а б

Рис. 6.1 – Установки для розділення сортового прокату способом консольної ломки [330, 331]

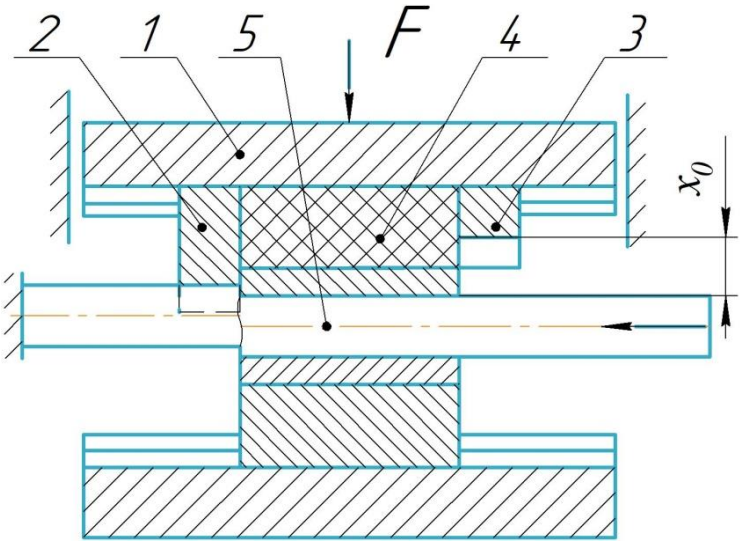



Рис. 6.2 – Установка для розділення сортового прокату способом відрізки зсувом

У момент розділення прокату відбувається різке скидання технологічного навантаження (див. рис. 6.1, 6.2) і установка стає динамічно неврівноваженою. Рухома плита 1 розганяється на ході $x_0$, а ніж 3 наносить на прокат концентратор напружень. Установка статичної дії працює в динамічному режимі й забезпечує підвищену швидкість нанесення концентратора напружень, що покращує геометричну точність заготовок.

Таким чином, в роботі досліджувалися закономірності процесу розділення сортового прокату комбінованим навантаженням за рахунок активних зусиль деформування пресом та реактивних зусиль пружної деформації технологічної системи, що дозволяє послідовно за один робочий хід виконувати операції нанесення концентратора напружень і розділення за схемами: «вдавлення клинового ножа – консольна ломка», «частковий зсув – консольна ломка», «частковий зсув – реверсний зсув».

## 6.1 Теоретичні дослідження процесу розділення за схемою «вдавлення клинового ножа – консольна ломка»

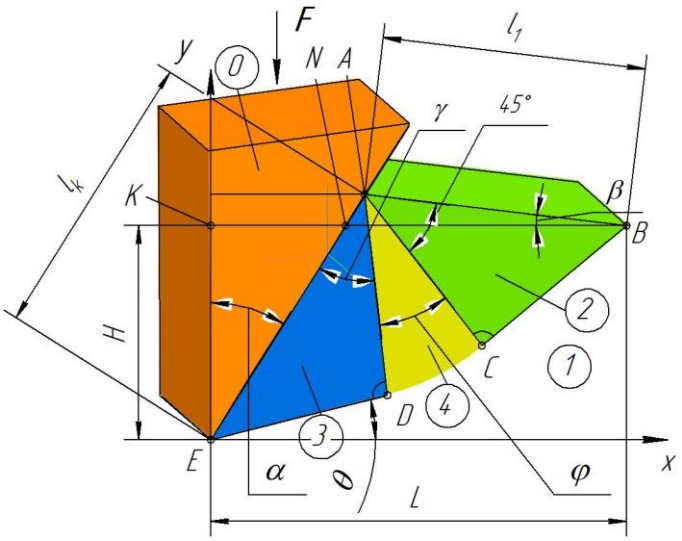
### *6.1.1 Математичне моделювання напружено-деформованого стану металу при нанесенні концентратора напружень клиновим інструментом*

У роботах [334 – 339] представлені результати математичного моделювання напружено-деформованого стану металу при нанесенні концентратора напружень клиновим інструментом з використанням методу полів ліній ковзання, який відрізняється своєї інформативністю, що дозволяє у повній мірі врахувати двомірний характер пластичної формозміни [340, 341].

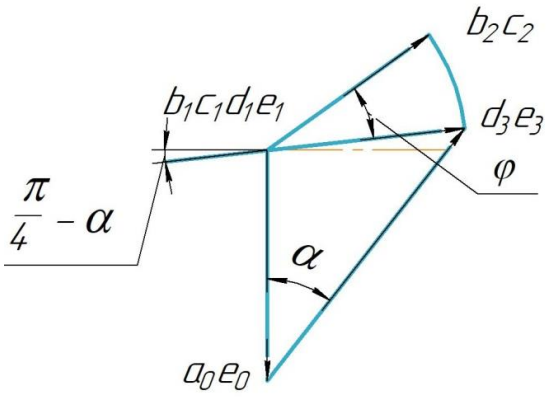
Методика рішення завдань даного класу розглянута в роботах [334 – 339] і дана кількісна оцінка сили вдавлення гладкого клинового інструмента при відсутності зовнішнього тертя на його контактних поверхнях. У роботі [334] автори роблять допущення про збереження площинності поверхні деформованої заготовки, зневажаючи обсягом металу – напливом, який видавлюється на поверхню заготовки. Разом з тим чисельна інтерпретація методу полів ліній ковзання дозволяє підвищити точність і розширити коло розв'язуваних завдань.

В роботах [331, 338] розглянута математична модель, яка побудована на основі розв’язання задачі щодо вдавлення клина у напівнескінченне твердопластичне тіло методом ліній ковзання (рішення Р. Хілла). Дана математична модель отримала подальший розвиток за рахунок вдосконалення алгоритму визначення величин контактного тиску та технологічної сили вдавлення клина у

зразок круглого перерізу (рис. 6.3). При цьому на підставі літературних і експериментальних даних [342] можна стверджувати, що для більшості матеріалів більш точною є конструкція поля ліній ковзання, в якій прямолінійна ділянка границі пластичної області $AB$ може бути замінена увігнутою дугою кола радіусом $R_0$ (рис. 6.4). При проведенні досліджень виконаний порівняльний аналіз математичних моделей з прямолінійною (див. рис. 6.3) і увігнутою границями пластичної зони витисненого металу (див. рис. 6.4).

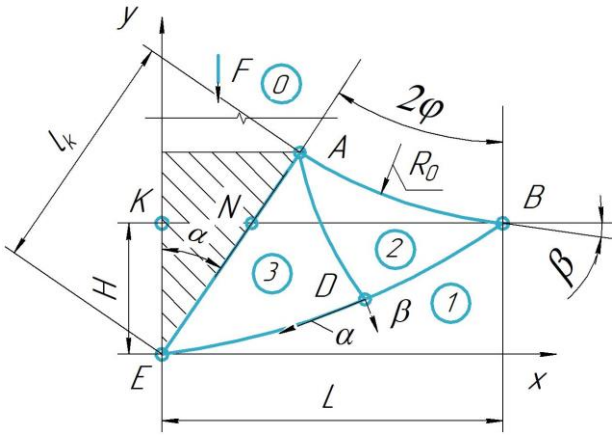



а

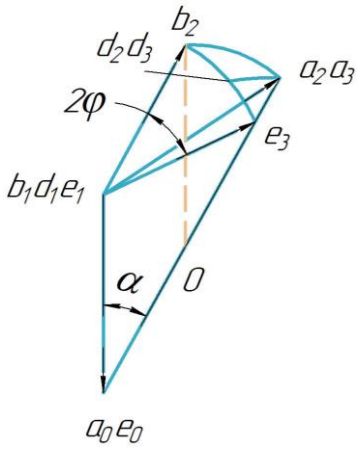



б

Рис. 6.3 – Розрахункова схема побудови полів ліній ковзання при вдавленні двостороннього гладкого клинового ножа в прокат зі створенням напливу з прямолінійною вільною границею пластичної зони (а), годограф швидкості (б) [331]




а




б

Рис. 6.4 – Розрахункова схема побудови полів ліній ковзання при вдавленні двостороннього гладкого клинового ножа в прокат зі створенням напливу з увігнутою вільною границею пластичної зони (а), годограф швидкості (б) [342]

Розглянемо математичну модель, яка являє собою рішення Р. Хілла, з урахуванням того факту, що клин вдавлюється в заготовку круглого перерізу. Розрахункова схема однієї з половинок середовища деформації та годограф швидкостей представлені на рис. 6.3 [331, 343]. При цьому безпосередньо побудова поля характеристик у фізичній площині (див. рис. 6.3, а), а разом із цим і в площині годографа (див. рис. 6.3, б) була здійснена шляхом чисельного визначення геометричних координат усієї сукупності особливих точок $A, B, C, D, E$ стосовно осей $x, y$, що мають свій початок на вістрі клинового ножа.

Особливістю даного рішення є збереження подоби та незалежності форми пластичної області і годографа швидкостей від глибини вдавлення клина. Зі збільшенням глибини вдавлення клина пластична область збільшується у масштабі, але не змінюється по формі.

Довжину прямолінійної вільної границі пластичної області позначимо $l_1$, а довжину контактної границі клина з матеріалом, який деформується – $l_k$. Позначивши глибину вдавлення клина – $H$, записували геометричні співвідношення, що визначають координати допоміжних точок $N$ і $K$ приналежних первісній поверхні заготовки:

$$x_N = H \cdot tg\alpha;\ y_N = H, \tag{6.1}$$

$$x_K = 0;\ y_K = H, \tag{6.2}$$

де $\alpha$ – півкут при вершині двостороннього клина.

З урахуванням цього площу трикутника $ENK$, що визначає обсяг витиснутого металу, можна розрахувати як

$$A_{ENK} = x_N \cdot y_K/2 = H^2 \cdot tg\alpha/2. \tag{6.3}$$

Знаючи довжину відрізка $NA$, визначали геометричні координати особливої точки $A$:

$$x_A = x_N + l_{NA} \cdot sin\alpha,\ y_A = y_N + l_{NA} \cdot cos\alpha. \quad (6.4)$$

Прийнявши, за аналогією з методиками робіт [334 – 339], поверхню витиснутого металу $AB$ прямолінійною й враховуючи, що висота трикутника $BAN$ дорівнює $(y_A - y_N)$, а його площа повинна відповідати площі трикутника $EKN$, визначали довжину відрізка $NB$

$$l_{NB} = 2 \cdot A_{ENK}/(y_A - y_N). \quad (6.5)$$

Разом із цим розраховували геометричні координати точки $B$:

$$x_B = x_N + l_{NB},\ y_B = H. \quad (6.6)$$

У відповідності із властивостями ліній ковзання, кутові характеристики рівнобедреного прямокутного трикутника $BAC$ дорівнюють: $\angle BCA = \pi/2;$ $\angle CBA = \pi/4$, а довжина гіпотенузи $BA$ відповідає рівності

$$l_1 = l_{BA} = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_A - y_B)^2}. \quad (6.7)$$

Тоді довжини катетів $CB$ і $CA$ можуть бути представлені, як:

$$l_{CB} = l_{CA} = l_{BA}/\sqrt{2}. \quad (6.8)$$

Виходячи з того, що кут підходу гіпотенузи $BA$ до горизонталі дорівнює виразу:

$$\beta = arctg[(y_A - y_B)/(x_B - x_A)], \quad (6.9)$$

геометричні координати особливої точки $C$ дорівнюють:

$$x_C = x_B - l_{CB} \cdot cos[\pi/4 - arctg\,((y_A - y_B)/(x_B - x_A))];$$
$$y_C = y_B - l_{CB} \cdot sin[\pi/4 - arctg\,((y_A - y_B)/(x_B - x_A))]. \qquad (6.10)$$

У самому загальному випадку, поле характеристик у фізичній площині при вдавленні твердого клинового ножа (див. рис. 6.3, а) являє собою розв'язок четвертого крайового завдання статично визначеної плоскої течії металу [334], що характеризується наявністю особливої точки $A$, у якій характеристики $CA$, $DA$ утворюють центроване віяло з кутом $\varphi$.

Враховуючи, що $l_{DA} = l_{CA}$, а кут нахилу характеристики $DA$ відносно вертикалі дорівнює $(\gamma - \alpha)$, де $\gamma = 0{,}5 \cdot arccos(\tau/k)$ – кут підходу характеристики $DA$ до контактної поверхні деформуючого інструмента, обумовлений співвідношенням дотичних контактних напружень $\tau$ і опором деформованого металу зсуву $k$, геометричні координати особливої точки $D$ дорівнюють:

$$x_D = x_A + l_{DA} \cdot sin(\gamma - \alpha); \quad y_D = y_A + l_{DA} \cdot cos(\gamma - \alpha). \qquad (6.11)$$

Якщо виразити із прямокутного трикутника $ADE$ довжину катета $l_{DE} = l_{DA} \cdot tg\gamma$ й визначити кут його підходу до горизонталі $\theta = \pi/2 - \alpha - (\pi/2 - \gamma) = \gamma - \alpha$, розрахункові, тобто відповідні до даного значення довжини відрізка $l_{NA}$, координати особливої точки $E$ можуть бути представлені у вигляді рівняння

$$x_{E_p} = x_D - l_{DE} \cdot cos(\gamma - \alpha);\ y_{E_p} = y_D - l_{DE} \cdot sin(\gamma - \alpha), \qquad (6.12)$$

де розрахункові значення $x_{E_p}, y_{E_p}$, відповідно прийнятій розрахунковій схемі (див. рис. 6.3, а), повинні відповідати початку координат, тобто повинні дорівнювати нулю.

Виконання даної умови, у свою чергу, може бути забезпечене на основі організації додаткової ітераційної процедури визначення необхідної довжини відрізка $NA$ з використанням, наприклад, методу цілеспрямованого перебору варіантів:

$$l_{NA} \cdot (i+1) = l_{NA} \cdot i + S_l \cdot signy_{E_p} \cdot i, \tag{6.13}$$

де $i$ – порядковий номер чергового циклу ітераційної процедури розв'язку;

$S_l$ – крок зміни довжини відрізка $NA$;

$signy_{E_p}$ – функція знака, відповідна до знака розрахункової геометричної координати точки $E$.

При виконанні умови $y_{E_p} \to 0$ шукана кутова характеристика $\varphi$ визначалася як:

$$\varphi = arctg[(x_C - x_A)/(y_A - y_C)] - arctg[(x_D - x_A)/(y_A - y_D)]. \tag{6.14}$$

Також величину кута $\varphi$ можна визначити із відношення:

$$2\alpha = \varphi + arccos(tg(\pi/4 - \varphi)). \tag{6.15}$$

Звідки

$$\varphi = 2\alpha - arccos\big(tg(\pi/4 - \varphi)\big). \tag{6.16}$$

На рис. 6.5 представлена графічна залежність кута центрованого віяла $\varphi$ від кута $\alpha$ клинового інструмента, розрахованого за рівнянням (6.16).

З урахуванням рівняння (6.14) гідростатичне (середнє) напруження в особливій точці $E$, нормальні напруження $\sigma_{xE}, \sigma_{yE}$ та наведені до одиниці ширини значення сил $F_x, F_y$, згідно із властивостями ліній ковзання [335, 336], дорівнюють:

$$\sigma_E = k + 2 \cdot k \cdot \varphi = k \cdot (1 + 2\varphi); \tag{6.17}$$

$$\sigma_{xE} = \sigma_E - k \cdot sin(2\theta); \tag{6.18}$$

$$\sigma_{yE} = \sigma_E + k \cdot sin(2\theta); \quad (6.19)$$

$$F_x = \sigma_{xE} \cdot y_A - \tau \cdot x_A; \quad (6.20)$$

$$F_y = \sigma_{yE} \cdot x_A + \tau \cdot y_A, \quad (6.21)$$

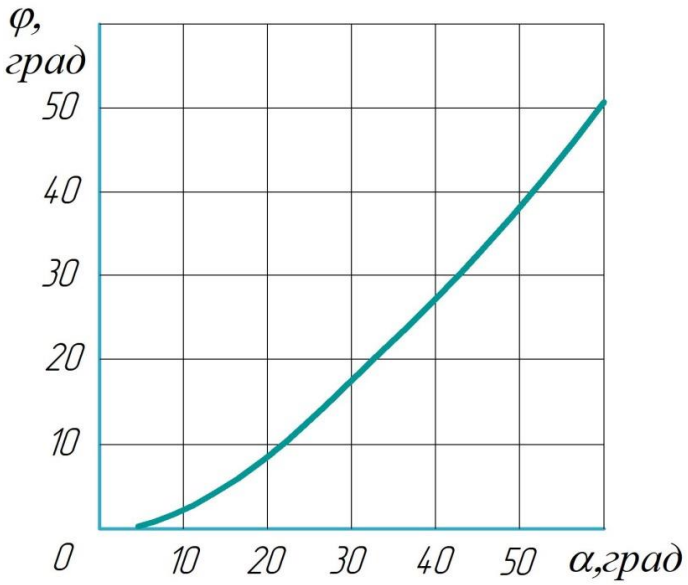



Рис. 6.5 – Залежність кута центрованого віяла $\varphi$ від кута $\alpha$ клинового інструмента

Кількісна оцінка дотичних напружень може бути задана за допомогою коефіцієнта пластичного тертя $\mu = \tau/2k$.

Безрозмірний контактний тиск $\bar{p}$ можна визначити з використанням залежності

$$\bar{p} = p/2k = 1 + \varphi. \quad (6.22)$$

Безрозмірна величина технологічної сили $\bar{F}$, яка діє на грані клинового інструмента при його вдавленні, що приходиться на одиницю довжини у напрямку, перпендикулярному до площини креслення (див. рис. 6.3) та відносна безрозмірна величина технологічної сили $\bar{F}^*$ визначаються за залежностями:

$$\bar{F} = F/2k = 2 \cdot \bar{p} \cdot l_k \cdot sin\varphi; \quad (6.23)$$

$$\bar{F}^* = F/(2 \cdot k \cdot H) = (2 \cdot \bar{p} \cdot l_k \cdot sin\varphi)/\big(cos\alpha - sin(\alpha - \varphi)\big). \quad (6.24)$$

Залежність, отримана Р. Хіллом [338], що встановлює зв'язок між $l_k$ і $\varphi$:

$$l_k \cdot cos\varphi - H = l_k \cdot (\alpha - \varphi),$$

перетворюється у вираз, який дозволяє визначити довжину контакту клина з деформованим металом. При цьому довжина лінії контакту дорівнює довжині вільної прямолінійної границі пластичної зони:

$$l_k = l_1 = H/\big(cos\alpha - sin(\alpha - \varphi)\big). \quad (6.25)$$

Відносна довжина лінії контакту дорівнює:

$$\overline{l_k}^* = l_k/H = l_1 = 1/\big(cos\alpha - sin(\alpha - \varphi)\big). \quad (6.26)$$

Горизонтальна проекція довжини контактної границі $AE$

$$l_{AE} = l_1 \cdot sin\alpha. \quad (6.27)$$

Горизонтальна проекція довжини вільної границі $AB$

$$l_{AB} = l_1 \cdot cos\beta = l_1 \cdot cos(\alpha - \varphi). \quad (6.28)$$

Тоді горизонтальна проекція поля ліній ковзання $L$ та відносна горизонтальна проекція поля ліній ковзання $\bar{L}^*$ можуть бути визначені як

$$L = l_1 \cdot \big(sin\alpha + cos(\alpha - \varphi)\big). \quad (6.29)$$

$$\bar{L}^* = L/H = \big(sin\alpha + cos(\alpha - \varphi)\big)/\big(cos\alpha - sin(\alpha - \varphi)\big). \quad (6.30)$$

Більш точною є апроксимація вільної границі увігнутою дугою кола, яка приводить до конструкції поля ліній ковзання (див. рис. 6.4, а), яка забезпечує безперервне зростання контактного тиску від точки $A$ до вершини клина $E$. Розподіл швидкості (рис. 6.4, б) у пластичній зоні дозволяє зробити висновок про незалежність годографа від глибини вдавлення $H$, що забезпечує автомодальность запропонованого рішення. При цьому матеріальні точки кругової вільної границі переміщуються відносно свого центра, який розташовано на грані клина с однаковими швидкостями $0b_2\,(0a_2)$, і $AB$ остається дугою кола протягом усього періоду вдавлення.

Оскільки $AB$ – це дуга кола, то лінії ковзання $AD$ і $BD$ є логарифмічними спіралями, радіуси кривизни яких визначаються за формулами:

$$\overline{R_{BD}}(\xi,0) = R_{BD}(\xi,0)/R_0 = -\sqrt{2}\cdot exp\xi; \qquad (6.31)$$

якщо система криволінійних координат Міхліна – Христиановича [344] розміщена у точці $B$ і

$$\overline{R_{AD}}(0,\eta) = R_{AD}(0,\eta)/R_0 = -\sqrt{2}\cdot exp\eta \qquad (6.32)$$

якщо система криволінійних координат Міхліна – Христиановича розміщена у т. $A$,

де $\xi,\eta$ – завжди позитивні криволінійні (кутові) параметри.

Радіус кривизни граничної лінії ковзання

$$\overline{R_{DE}}(\xi,\varphi) = -\sqrt{2}\cdot\left(\varphi_0^4(\xi,\varphi) + \varphi_1^4(\varphi,\xi)\right) = -\sqrt{2}\cdot exp(\xi+\varphi), \qquad (6.33)$$

де $\varphi_0^4(\xi,\varphi)$, $\varphi_1^4(\varphi,\xi)$ – спеціальні циліндричні умовні $\varphi$ – функції [345].

Після інтегрування уздовж граничних ліній ковзання з використанням радіусів кривизни отримані їх проекції, які дозволяють установити геометричні і силові параметри процесу:

- відносна горизонтальна протяжність поля ліній ковзання дорівнює:

$$\bar{L}^* = L/H = \big(exp(2\cdot\varphi)\cdot sin\alpha + sin(2\cdot\varphi-\alpha)\big)/\big(exp(2\cdot\varphi)\cdot cos\alpha - cos(2\cdot\varphi-\alpha)\big);$$

- відносна довжина лінії контакту пластичної області з інструментом:

$$\bar{l_k}^* = l_k/H = (exp(2\cdot\varphi)-1)/\big(exp(2\cdot\varphi)\cdot cos\alpha - cos(2\cdot\varphi-\alpha)\big); \quad (6.34)$$

- відносний радіус увігнутої вільної границі:

$$\overline{R_0}^* = R_0/H = 1/\big(exp(2\cdot\varphi)\cdot cos\alpha - cos(2\cdot\varphi-\alpha)\big); \quad (6.35)$$

- відносна величина вертикальної технологічної сили:

$$\overline{F^*} = F/(2\cdot k\cdot H) = (2\cdot\varphi\cdot exp(2\cdot\varphi)\cdot sin\alpha)/\big(exp(2\cdot\varphi)\cdot cos\alpha - cos(2\varphi-\alpha)\big); \quad (6.36)$$

- осереднений безрозмірний контактний тиск на грані клина:

$$\bar{p} = p/(2\cdot k) = \overline{F^*}/\big(\bar{l}_k^*\cdot sin\alpha\big). \quad (6.37)$$

При наявності квадратної або прямокутної заготовки шириною $b$, з урахуванням симетричності схеми навантаження, повна сила вдавлення клинового інструмента складе:

$$F_i = 2\cdot F_{yi}\cdot b. \quad (6.38)$$

Для заготовки із круглим поперечним перерізом, картина значно видозмінюється й вимагає організації додаткового чисельного розв'язку з розбивкою на елементарні перерізи за шириною, тобто по осі $z$. При цьому, за аналогією з середовищем деформації процесу прокатки [340], півширина ділянки вдавлення $l_i$ у

$i$-тий момент часу, тобто при відомій глибині вдавлення в середній частині заготовки $H_{ci}$, може бути визначена із умови (рис. 6.6):

$$l_i^2 = R^2 - (R - H_{Ci})^2 = 2 \cdot R \cdot H_{Ci} - H_{Ci}^2, \tag{6.39}$$

звідки

$$l_i = \sqrt{2 \cdot R \cdot H_{Ci} - H_{Ci}^2}. \tag{6.40}$$

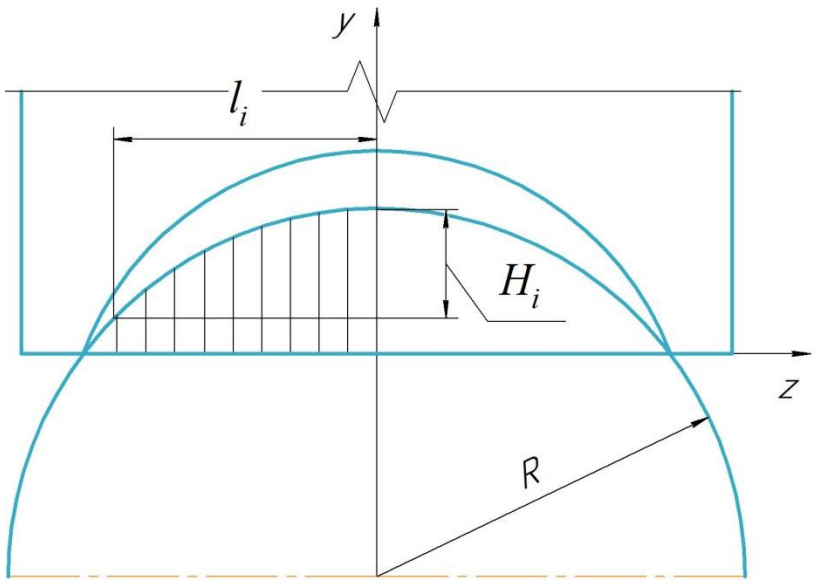



Рис. 6.6 – Розрахункова схема визначення сили вдавлення клинового інструмента у заготовку круглого перерізу

З урахуванням відомого значення $l_i$ й заданого значення кількості розбивок $KR_j$, крок розбивки дорівнює $\Delta z_i = l_i / KR_j$, а координата кожного окремого $j$– того значення відносно осі $z$, що має свій початок у центрі заготовки, складе:

$$z_{ij} = \Delta z_i \cdot j. \tag{6.41}$$

Глибина вдавлення у $j$ – тому перерізі $H_{ij}$ буде дорівнювати

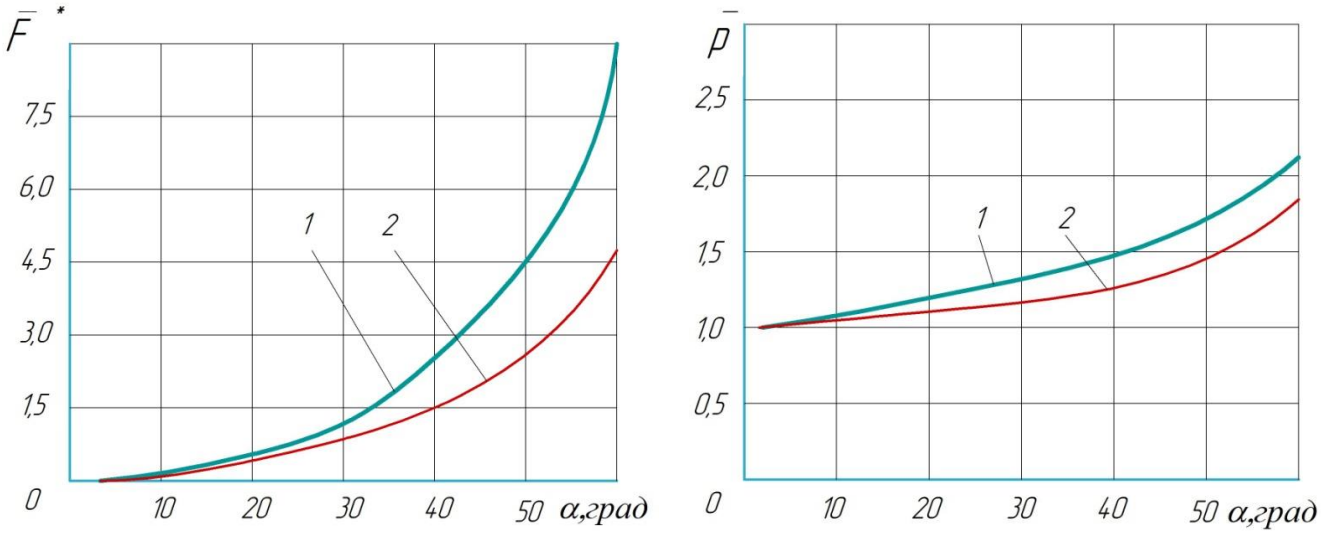
$$H_{ij} = R - \sqrt{R^2 - z_{ij}^2}. \tag{6.42}$$

Залежно від цього, відповідно розглянутому вище алгоритму, може бути визначена сила $F_{ij}$, а повна величина сили вдавлення складе

$$F_i = 2\left[F_{Ci} \cdot \Delta z_i + \sum_{j=2}^{KR_{j-2}} \left((F_{ij} + F_{i(j-1)})/2\right) \cdot \Delta z_i + F_{i(KR_{j-1})} \cdot \Delta z_i/2\right], \quad (6.43)$$

де $F_{Ci}$ – сила вдавлення в середній частині заготовки $H_{ci}$.

Виконані розрахунки дозволили побудувати залежності безрозмірної відносної вертикальної технологічної сили та осередненого безрозмірного контактного тиску на інструмент від кута клина, які представлені на рис. 6.7.




а б

Рис. 6.7 – Залежності інтегральної безрозмірної відносної вертикальної технологічної сили (а) та осередненого безрозмірного контактного тиску на інструмент (б) від кута клина: 1 – з прямолінійною границею напливу металу; 2 – з увігнутою границею напливу металу [343]

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок про те, що при вдавленні клинового інструменту у прокат круглого перерізу, конструкція поля ліній ковзання з увігнутою вільною границею напливу потребує меншої технологічної сили, ніж з прямолінійною, і більш точно описує досліджуваний процес.

### *6.1.2 Моделювання процесу розділення за схемою «вдавлення клинового ножа – консольна ломка» за допомогою програмного комплексу Deform*

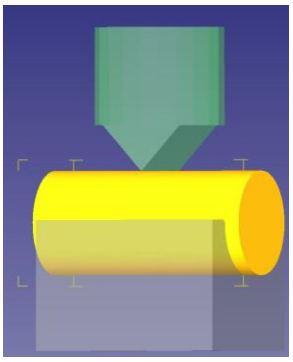
Для перевірки математичної моделі проведено розрахунки з використанням програмного комплексу Deform. Моделювали процес розділення сортового прокату у два етапи. На першому етапі моделювали вдавлення клинового ножа в прокат круглого перерізу за схемою «вдавлення клинового ножа – консольна ломка» (див. рис. 6.1, а). Як показано в роботі [38], максимальну концентрацію пластичної деформації й зниження ударної в'язкості забезпечує надріз трикутної форми, який і брали за основу.

Для моделювання використовували зразки з розмірами: $d = 16\text{мм}, l = 70\text{мм}$. Робочий інструмент – клин мав радіус закруглення у вершині клина $r = 0{,}15$ мм.

Досліджували вплив величини кута клина $\alpha$ (рис. 6.8, а) на величину сили нанесення концентратора напружень на заготовку $F$. Розрахункова схема представлена на рис. 6.8, б.




а



б

Рис. 6.8 – Клин (а) для нанесення концентратора напружень на прокат та розрахункова схема нанесення концентратора напружень (б)

В розділі 1 наведено рекомендації щодо параметрів концентратора напружень, згідно яких: глибина концентратора напружень $\Delta H$ повинна бути не менше $\Delta H \geq (0{,}01 \ldots 0{,}05) \cdot d = 0{,}05 \cdot 16 = 0{,}8$ мм; кут клина – $\alpha \geq 0{,}14$ рад $\cong 23^{\circ}$. З

урахуваннях даних рекомендацій та практичного досвіду забезпечення стійкості і міцності клина, кут клина вибирали із ряду: $25^{\circ}$, $30^{\circ}$, $35^{\circ}$, $40^{\circ}$, $45^{\circ}$, $50^{\circ}$, $55^{\circ}$, $60^{\circ}$, а глибину вдавлення клина – у діапазоні $\Delta H = (0 \dots 3)$ мм.

Матеріали зразків, які використовували у розрахунках та їх аналоги із бази Deform представлені у табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Матеріали зразків для моделювання

| Марка сталі | Сталь 10 | Сталь 20 | Сталь 45 | Сталь 40Х | Сталь 60С2А |
|---|---|---|---|---|---|
| Матеріал із бази Deform | $AISI - 1010$ | $AISI - 1020$ | $AISI - 1045$ | $AISI - 5135H$ | $AISI - 1060$ |

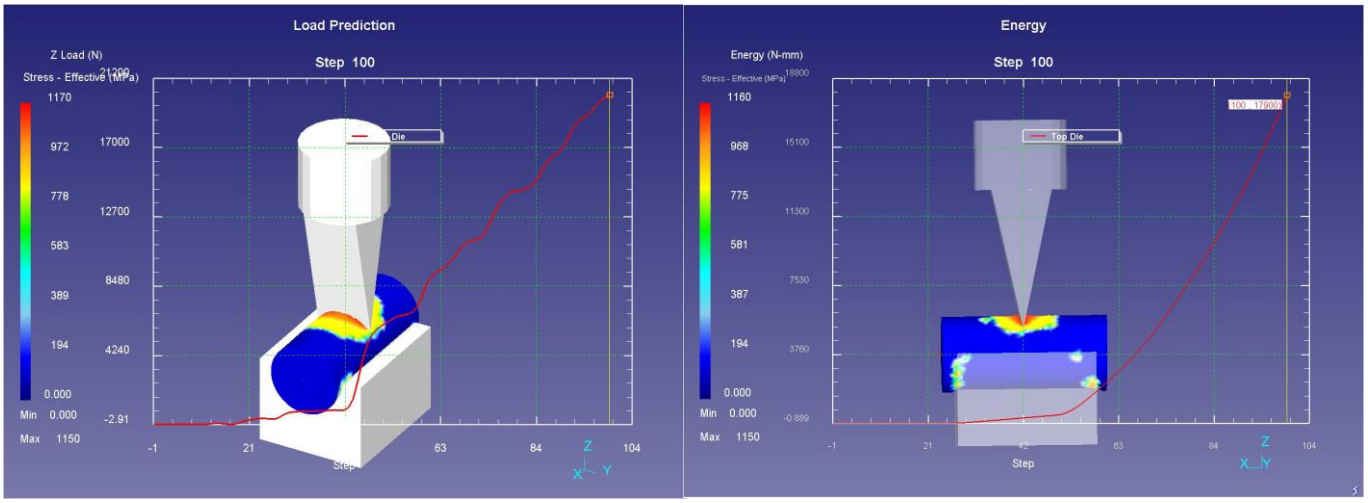
Параметри процесу моделювання представлені у табл. 6.2.

Таблиця 6.2 – Параметри процесу моделювання

| Назва параметру | Значення параметру |
|---|---|
| 1 Властивість матеріалу зразка | «пластичний» |
| 2 Температура | 20°С |
| 3 Кількість елементів розбиття | 32000 |
| 4 Компенсація витрат об'єму, мм$^3$ | 7021,6 |
| 5 Параметри розрахунку: | аналіз Лагранжа |
| ○ кількість кроків розрахунку | 100 |
| ○ приріст кроків, мм/крок | 0,03 |
| ○ хід клина, мм | 3,00 |
| 6 Рух клина | переміщення прямолінійне |
| ○ швидкість, мм/с | статика – 1 / динаміка – 12000 |

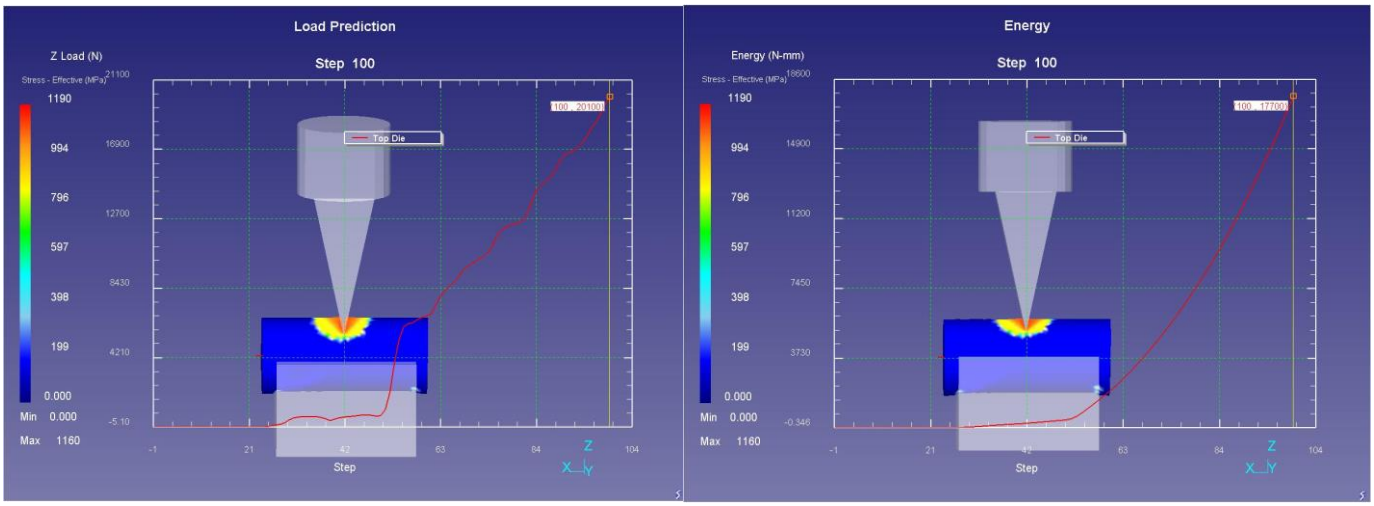
Для даної задачі у програмі Deform обрано вирішувач – $Conjugate\ gradient$ та ітераційний метод – прямий ітераційний; тип розрахунку – $Normalized\ C\&L$.

Результати моделювання при статичному і динамічному навантаженнях представлені на рис. 6.9, 6.10. Аналіз отриманих результатів представлений на рис. 6.11, 6.12.



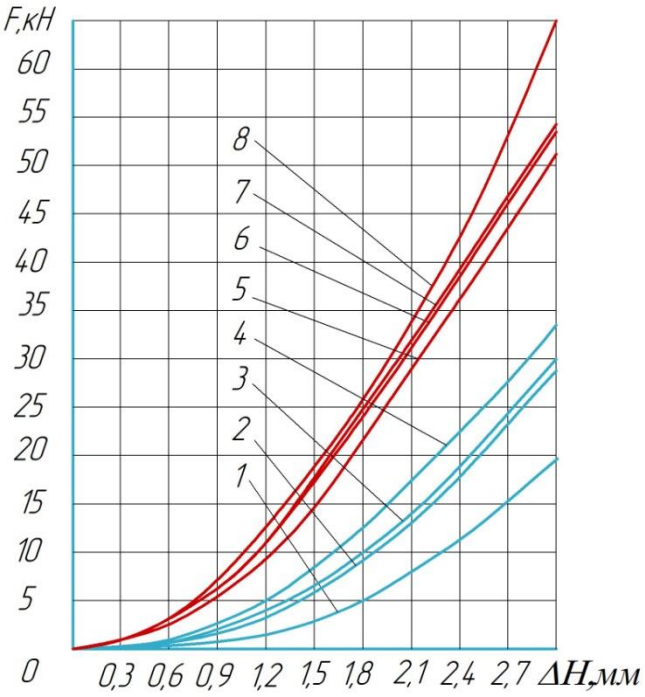

а б

Рис. 6.9 – Залежності сили вдавлення клина (а) і роботи деформування (б) від кроку розрахунку при статичному навантаженні $V = 1$ мм/с (зразок із сталі $AISI - 1020, \alpha = 25^0$)

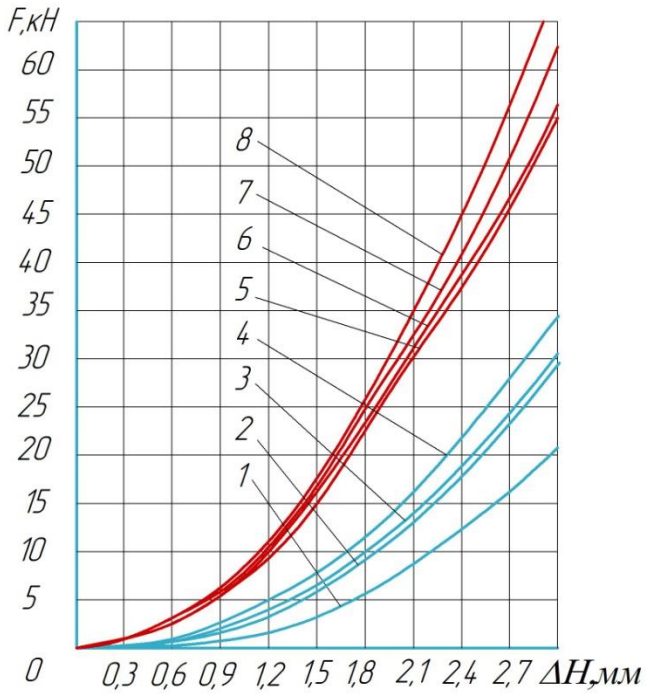



а б

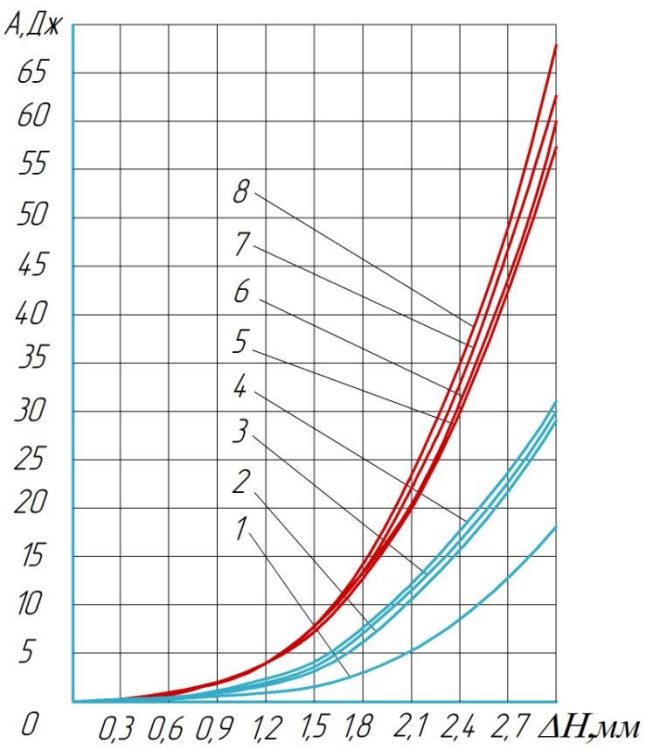
Рис. 6.10 – Залежності сили вдавлення клина (а) і роботи деформування (б) від кроку розрахунку при ударному навантаженні $V = 12000$ мм/с (зразок із сталі $AISI - 1020, \alpha = 25^0$)



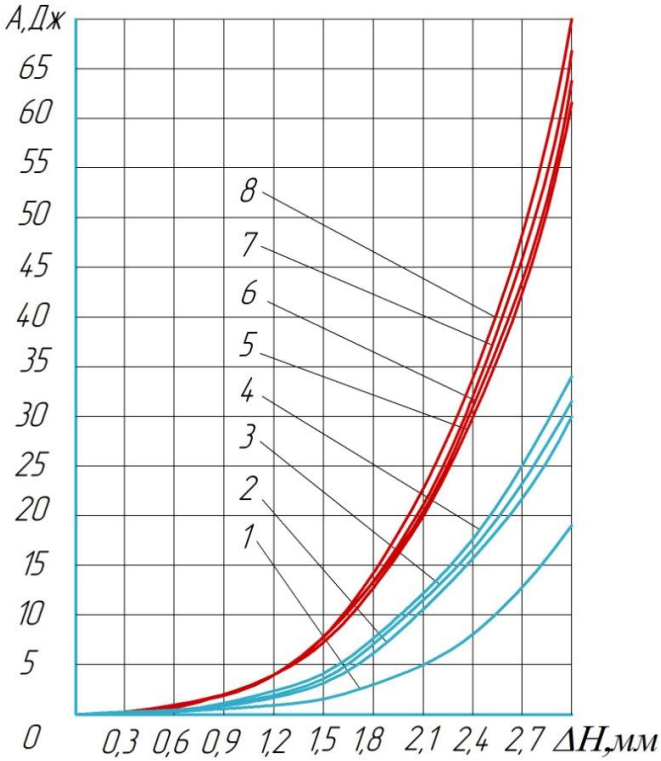

а




б

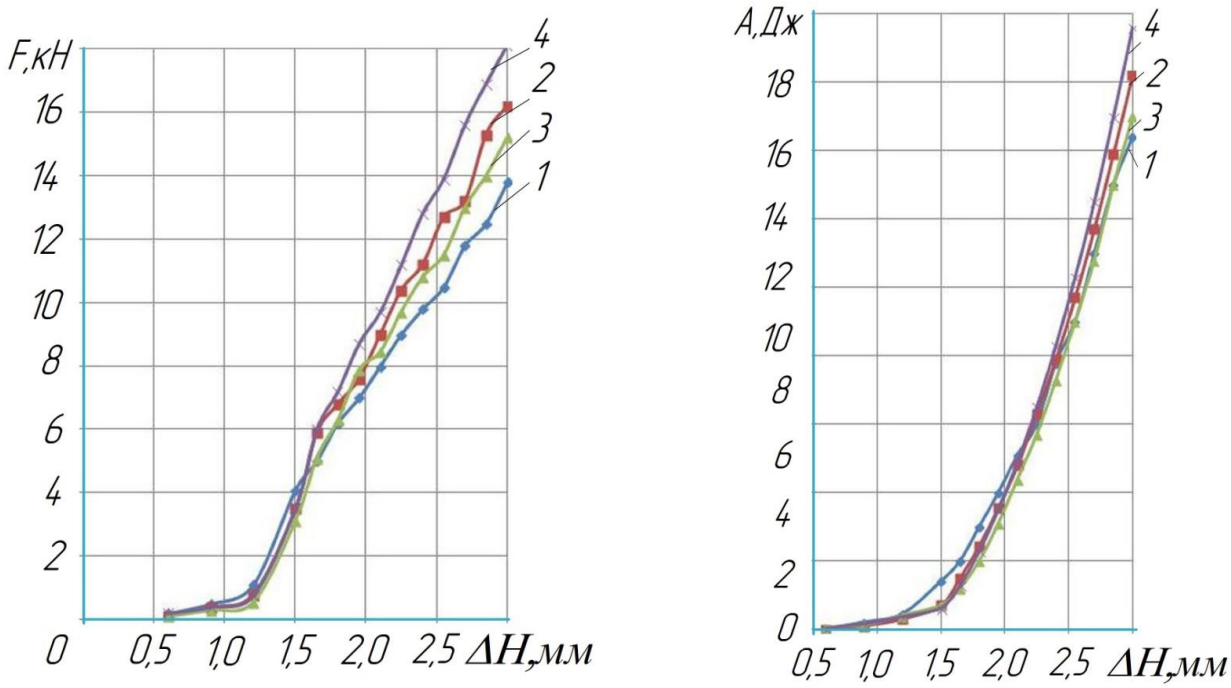



в




г

Рис. 6.11 – Залежності величин сили вдавлення клина і роботи деформування від ходу клина при статичному (а, в) і динамічному (б, г) навантаженнях для сталі $AISI-1020$ при: $1-\alpha=25^0$; $2-\alpha=30^0$; $3-\alpha=35^0$; $4-\alpha=40^0$; $5-\alpha=45^0$; $6-\alpha=50^0$; $7-\alpha=55^0$; $8-\alpha=60^0$




а б

Рис. 6.12 – Залежності сили вдавлення клина (а) і роботи деформування (б) від ходу клина при статичному навантаженні $V = 1\,\text{мм/с}$ $(\alpha = 25^0)$ для сталей: 1 – $AISI - 1010$; 2 – $AISI - 1045$; 3 – $AISI - 5135H$; 4 – $AISI - 1060$

Аналіз залежностей величин сили вдавлення клина і роботи деформування від ходу клина (див. рис. 6.11) при статичному і динамічному навантаженнях (для сталі $AISI - 1020$) показує, що зі збільшенням кута $\alpha$ величини сили і роботи збільшуються. Значне зростання відбувається при значеннях кута $\alpha > 40^\circ$.

Зі зростанням швидкості навантаження з $1\,\text{мм/с}$ до $12\,\text{м/с}$ сила і робота деформування збільшуються. При кутах $\alpha > 40^\circ$ величини приросту сили і роботи деформування більші, ніж при кутах $\alpha < 40^\circ$.

Аналіз залежностей $F = f(\Delta H)$ і $A = f(\Delta H)$ (див. рис. 6.12), побудованих для зразків із сталей, що є представниками класів матеріалів: «пластичних» – $AISI - 1010$; «пружно-пластичних» – $AISI - 1045$, $AISI - 5135H$; «крихких» – $AISI - 1060$, доводить, що зі збільшенням глибини вдавлення ножа збільшуються величини сили і роботи деформування. Зважаючи на те, що рекомендована глибина концентратора напружень для зразка діаметром 16 мм – $\Delta H = (1\ldots3)$ мм, величини

сили і роботи деформування для матеріалів з різними механічними властивостями для цього діапазону збільшуються на незначну величину (приріст менше 20%).

Отримані результати дозволяють зробити висновок про те, що більш точною аппроксимацією вільної границі пластичної зони витисненого метала є увігнута дуга кола радіусом $R_0$ (рис. 6.13).

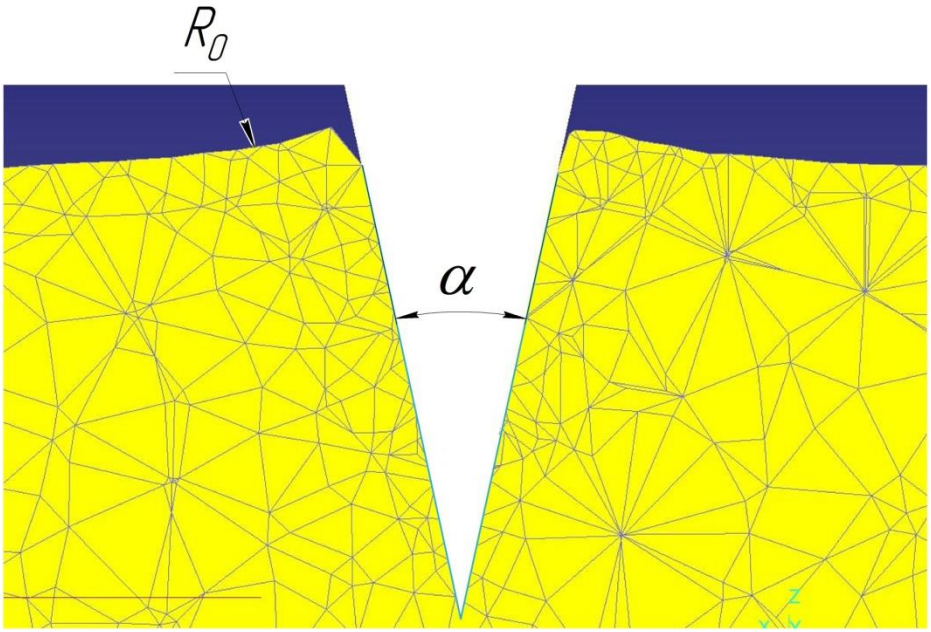



Рис. 6.13 – Результати моделювання процесу нанесення концентратора напружень вдавленням клинового ножа ($\alpha = 25^0$, $V = 1$ мм/с) на зразок із сталі 20 з нанесеною сіткою скінченних елементів (кількість елементів розбиття – 32000)

На другому етапі теоретичного експерименту досліджували процес консольної ломки згином зразка з попередньо нанесеним концентратором напружень (суміщений процес реалізації двох етапів в одному розрахунку) (див. рис. 6.1, а) методом скінченних елементів. Оцінку можливості проведення розділення за один робочий хід проводили порівнянням робіт нанесення концентратору напружень і консольної ломки.

Для даної задачі у програмі Deform обрано вирішувач «Розріджених матриць» та ітераційний метод – Ньютона-Рафсона, тип розрахунку – $Normalized\ C\&L$.

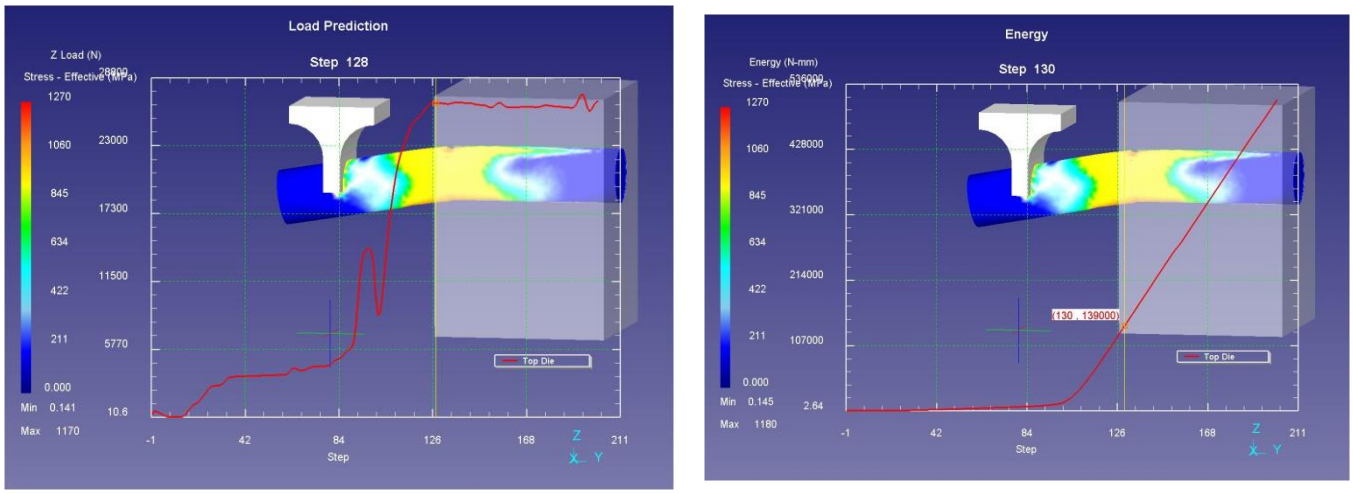
Плече прикладення навантаження – 35 мм.

Параметри процесу моделювання представлені у табл. 6.3.

Таблиця 6.3 – Параметри процесу моделювання

| Назва параметру | Значення параметру |
|---|---|
| 1 Властивість матеріалу зразка | «пружно-пластичний» |
| 2 Температура | 20°C |
| 3 Кількість елементів розбиття | 39029 |
| 4 Параметри розрахунку: | аналіз Лагранжа |
| ○ кількість кроків розрахунку | 100 |
| ○ приріст кроків, мм/крок | 0,2 |
| ○ хід ломника, мм | 20 |
| 5 Рух клина | переміщення прямолінійне |
| ○ швидкість, мм/с | 1 |

Результати моделювання при статичному навантаженні для сталі $AISI-1020$ представлено на рис. 6.14. Аналіз отриманих результатів на рис. 6.15.

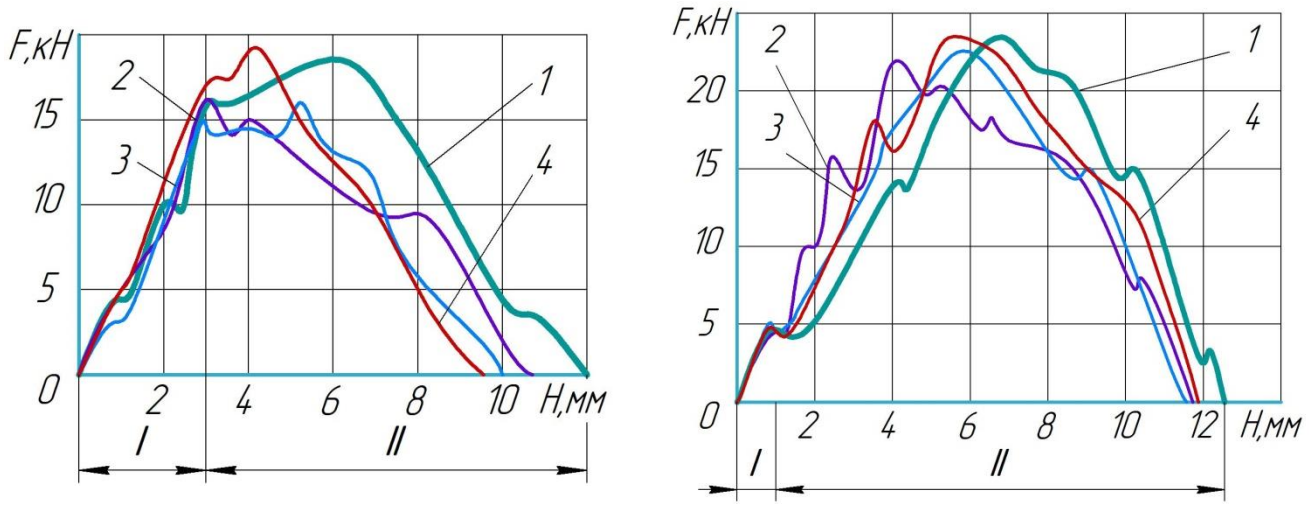



а б

Рис. 6.14 – Залежності сили (а) і роботи деформування (б) від кроку розрахунку при статичному навантаженні (зразок із сталі $AISI-1020$, $\alpha=25^0$) (суміщений процес реалізації двох етапів в одному розрахунку)

Аналіз залежностей $F=f(H)$ (рис. 6.15, а) доводить, що глибину концентратора напружень для зразка діаметром 16 мм потрібно обирати із діапазона $(1\ldots3)$мм, але треба враховувати механічні характеристики матеріалу. Наприклад,

для сталі $AISI-1045$ (2) при глибині концентратора напружень $\Delta H=3$ мм, величина сили нанесення концентратора напружень виявилася більшою за силу ломки зразка. І хоча робота ломки (зона $II$) переважає роботу нанесення концентратора напружень (зона $I$), для цієї сталі доцільно було б вибрати концентратор напружень з глибиною $\Delta H=1{,}5$ мм. На рис. 6.15, б наведені результати розрахунків для зразків із матеріалів: $AISI-1020$; $AISI-1045$; $AISI-5135H$; $AISI-1060$ при глибині концентратора напружень $\Delta H=1{,}5$ мм.




а б

Рис. 6.15 – Залежності $F=f(H)$ при $\Delta H=3$ мм (а) та $\Delta H=1{,}5$ мм (б) при реалізації схеми процесу попереднього нанесення концентратора напружень вдавленням клинового ножа (зона $I$) і консольної ломки зразка (зона $II$) при статичному навантаженні ($\alpha=25^0$): 1 – $AISI-1020$; 2 – $AISI-1045$; 3 – $AISI-5135H$; 4 – $AISI-1060$ (суміщений процес реалізації двох етапів в одному розрахунку)

Для зразків із «пластичних», «пружно-пластичних» та «крихких» матеріалів, при статичному і динамічному навантаженнях, робота нанесення концентратора напружень складає не більше 20% від роботи розділення прокату. Отримані результати дозволяють зробити висновок, що енергії розвантаження преса в умовах різкого скидання навантаження в момент стрімкого зростання закритичної тріщини і

відділення заготовки, буде достатньо для нанесення ефективного концентратора напружень за один робочий хід преса.

### *6.1.3 Експериментальні дослідження процесу розділення за схемою «вдавлення клинового ножа – консольна ломка згином»*

Для оцінки адекватності запропонованих математичних моделей і величини енергосилових параметрів, необхідних для нанесення ефективного концентратора напружень, проведені експериментальні дослідження.

На першому етапі досліджували процес вдавлення в прокат інструмента клинової форми. Для експериментів використовувався прес-молот оригінальної конструкції ДДМА (див. рис. 2.13). Для проведення експерименту розроблено і виготовлено оригінальну оснастку, конструкцію і фотографію якої наведено на рис. 2.18.

В експерименті використовувалися циліндричні зразки діаметром 16 мм і довжиною 70 мм із сталі 20. Кут клина $\alpha = 25^{\circ}$.

В експерименті використовувалися фольгові тензорезистори ФКТК 10- 200С- $I$, включені за мостовою схемою. У якості пристрою, що реєструє, застосовувалася ПЕОМ із установленим спеціалізованим модулем $SDI\text{-}ADC16\text{-}32$, який дозволяє робити виміри по 16-ти диференціальним каналам з гальванічною розв'язкою від електричних кіл комп'ютера.

При проведенні експерименту використовувалися два паралельні канали для реєстрування сили деформування і переміщення інструменту (сигнал знімали з ходографа) з метою побудови залежності «сила $F$ – переміщення $\Delta H$ інструмента». Вхідний сигнал оцифровувався шістнадцятибітним аналого-цифровим перетворювачем із частотою до 100 кГц із можливістю посилення в діапазоні 1…1000. Реєстрація й обробка результатів вимірів проводилася за допомогою розробленого програмного забезпечення.

Вибірка порівняльних даних результатів експериментів і теоретичних розрахунків, виконаних із застосуванням запропонованих математичних моделей та за допомогою Deform, представлена у вигляді кривих $F = f(\Delta H)$ (рис. 6.16).

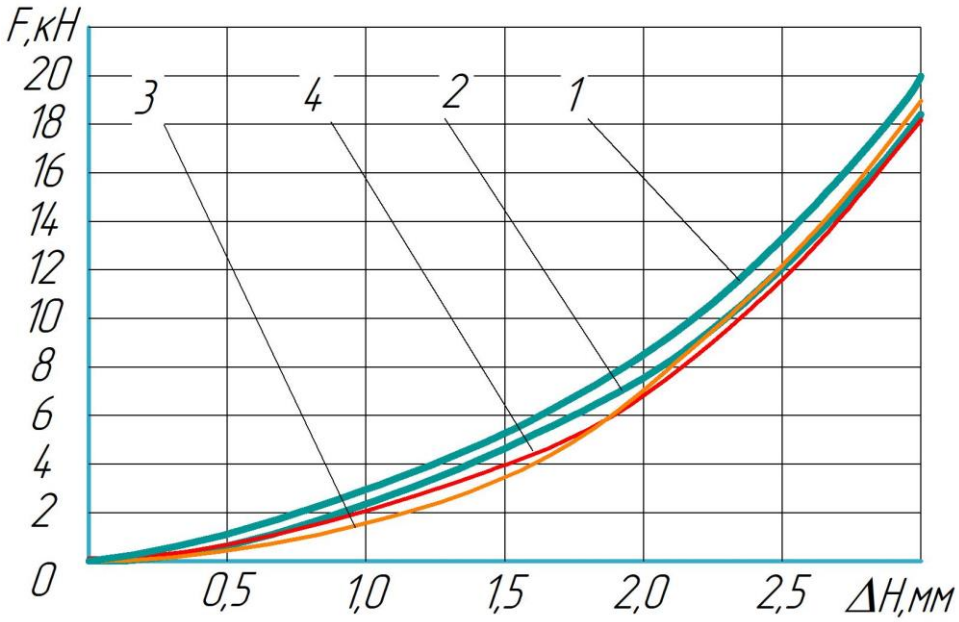



Рис. 6.16 – Графіки зміни сили деформування від переміщення інструмента при вдавленні клина ($\alpha = 25^0$) у зразок зі сталі 20 при статичному навантаженні: 1 – розрахунок за математичною моделлю з прямолінійною границею напливу металу; 2 – розрахунок за математичною моделлю з увігнутою границею напливу металу; 3 – розрахунок в Deform; 4 – експериментальні дані

Розбіжність результатів, отриманих за математичними моделями з прямолінійною і увігнутою границями напливів металу не перевищує 6%, за математичною модделлю з увігнутою границею напливу металу і моделюванням у Deform – до 5%. Розбіжність теоретичних і експериментальних результатів – до 8%.

На другому етапі досліджували процес консольної ломки прокату (див. рис. 6.1, а) з попередньо нанесеним концентратором напружень за рахунок вдавлення клинового інструменту з кутом $\alpha = 25^{\circ}$.

Для експериментів використовувався прес-молот оригінальної конструкції ДДМА (див. рис. 2.13). В експерименті застосовувалася експериментальна оснастка (див. рис. 2.15, в). Плече прикладення навантаження до зразка $l = 35$ мм.

Інформація з тензодатчиків, які розміщено на ломнику і підключено за мостовою схемою через універсальний реєструючий пристрій багатоканального збору інформації $E-440$, передавалася до ПЕОМ, де після обробки, з використанням оригінальної програми, зберігалася в табличному і графічному видах, зручних для подальшого аналізу.

В експерименті використовувалися циліндричні зразки, виготовлені з сортового прокату із різних марок сталей, що знаходяться у «пластичному» – Сталь 20, «пружно-пластичному» – Сталь 45, Сталь 40Х та «крихкому» станах – Сталь 60С2А.

Результати замірів енергосилових параметрів процесу консольної ломки згином зразків з попередньо нанесеним концентратором вдавленням клинового ножа ($\alpha = 25^{\circ}$) на глибину $\Delta H = 1{,}5$ мм представлені на рис. 6.17.

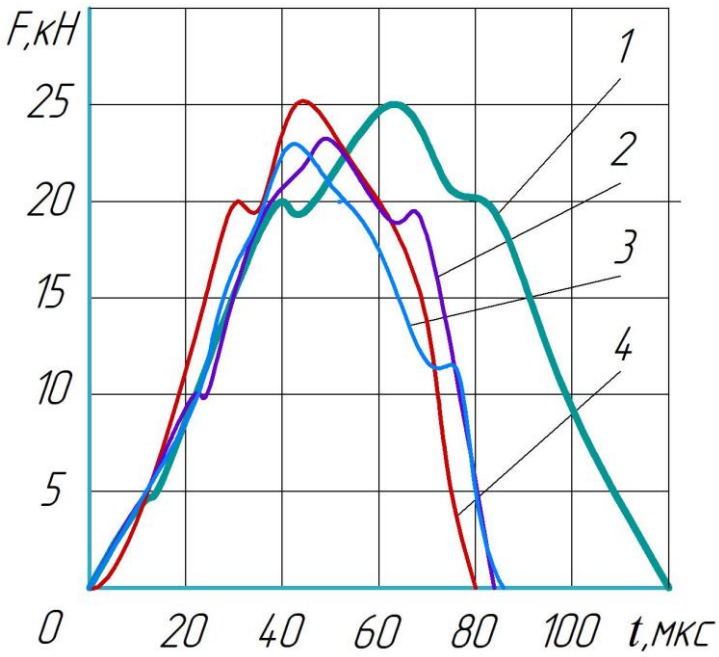


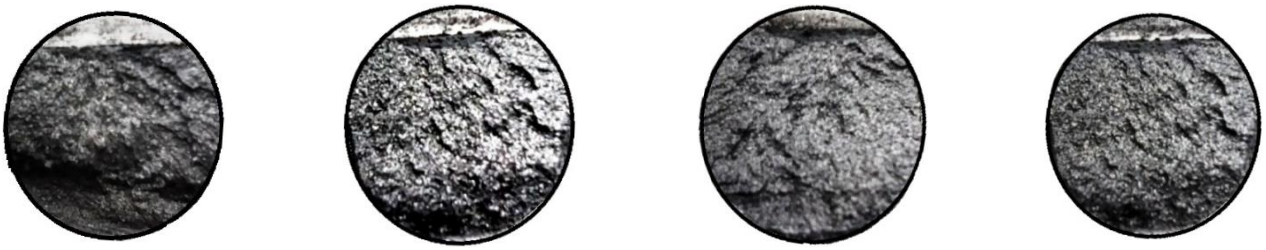

Рис. 6.17 – Залежності $F = f(t)$ при реалізації схеми «вдавлення клинового ножа – консольна ломка» для зразків із матеріалів: 1 – Сталь 20; 2 – Сталь 45; 3 – Сталь 40Х; 4 – Сталь 60С2$А$

Результати експериментальних даних свідчать про те, що максимальна сила консольної ломки зразків має завищені значення для різних сталей у порівнянні з

теоретичними розрахунками (розбіжність до 8%). Це пояснюється затупленням ріжучої кромки інструмента, внаслідок збільшення радіусу закруглення при вершині концентратора напружень $\Delta r$, особливо на зразках із сталей, віднесених до класу матеріалів у «крихкому» стані – Сталь 60С2А.

За даними, наведеними у роботі [98], на гідравлічному пресі з найбільшим робочим зусиллям 4 МН час зникнення технологічного навантаження у виробничих умовах становив менше $4 \cdot 10^{-4}$ с, що відповідає результатам експерименту.

Фотографії отриманих зразків представлені на рис. 6.18.



а б в г

Рис. 6.18 – Фотографії зразків, отриманих при реалізації схеми «вдавлення клинового ножа – консольна ломка» ($\alpha = 25^{\circ}, \Delta H \cong 1{,}5$ мм) для зразків із матеріалів: а – Сталь 20; б – Сталь 45; в – Сталь 40Х; г – Сталь 60С2А

Геометрична точність отриманих заготовок за консольною схемою ломки з однобічним концентратором напружень поступається заготовкам, які отримано за схемою триточкової ломки з концентратором напружень, нанесеним різцем у вигляді канавки трикутного профілю по периметру зразка. Це спростовує літературні дані про те, що концентратор напружень, нанесений по всьому периметру перерізу прокату, не має особливих переваг перед однобічним.

Аналіз результатів теоретичних і експериментальних досліджень процесу консольної ломки прокату з попереднім нанесенням концентратора напружень вдавленням клинового ножа за рахунок використання енергії преса у момент різкого скидання технологічного навантаження дозволяє зробити наступні висновки.

1. Аналізом запропонованого способу розділення за схемою «вдавлення клинового ножа – консольна ломка», в якому концентратор напружень наноситься

клиновим ножем з використанням енергії розвантаження пресу, а остаточне розділення – консольною ломкою згином, із застосуванням методів полів ліній ковзання і методу скінченних елементів, встановлено залежності енергосилових параметрів процесу розділення, співвідношення робіт нанесення концентратора напружень і консольної ломки. Виявлено, що величина роботи вдавлення клинового ножа складає не більше $20\%$ від роботи розділення прокату, тому енергії розвантаження преса в момент зняття технологічного навантаження достатньо для нанесення ефективного концентратора напружень.

2. Виявлено, що зі збільшенням кута $\alpha$, величини сили і роботи нанесення концентратора напружень збільшуються. Значне зростання відбувається при значеннях $\alpha > 40^{\circ}$. Встановлено, що для нанесення ефективного концентратора напружень і забезпечення стійкості інструмента кут $\alpha$ слід вибирати у діапазоні $(25 \dots 40)^{\circ}$, а глибину вдавлення концентратора напружень – $\Delta H = (10\ldots20)\%$ від розміру поперечного перерізу зразка. Зі збільшенням $\Delta H$, величини сили і роботи деформування зростають. Зі збільшенням швидкості навантаження сила і робота нанесення концентратора напружень збільшуються на $(8 \dots 10)\%$.

3. Встановлено, що для розглянутих матеріалів зразків, які є представниками класів матеріалів, згідно запропонованої класифікації із застосуванням синергетичних критеріїв, більш точною є конструкція полів ліній ковзання, в якій прямолінійна ділянка границі пластичної зони витисненого металу замінена увігнутою дугою і потребує меншої технологічної сили. Розбіжність результатів, отриманих за математичними моделями з прямолінійною і увігнутою границями напливу металу не перевищує $6\%$, за математичною моделлю з увігнутою границею напливу металу і моделюванням у Deform – до $5\%$.

4. Адекватність теоретичних розрахунків перевірена експериментальними дослідженнями. Розбіжність результатів – у межах $8\%$. Геометрична точність отриманих заготовок за консольною схемою ломки з однобічним концентратором напружень цілком задовільна, але поступається заготовкам, які отримано за схемою триточкової ломки з концентратором напружень, нанесеним різцем у вигляді канавки трикутного профілю по периметру зразка.

## 6.2 Дослідження процесів розділення сортового прокату за схемами: «частковий зсув – консольна ломка», «частковий зсув – реверсний зсув»

### *6.2.1 Моделювання процесу нанесення концентратора напружень частковим зсувом з використанням програмного комплексу Deform*

Моделювання проводили у два етапи. На першому етапі моделювали процес нанесення концентратора напружень на зразок круглого перерізу за схемою часткового зсуву (див. рис. 6.1, б).

Для моделювання використовували зразки з розмірами: $d = 16$мм, $l = 40$мм. Матеріал прокату: Сталь 10 (аналог сталі із бази Deform – $AISI - 1010$); Сталь 20 ($AISI - 1020$); Сталь 45 ($AISI - 1045$); Сталь 60С2А ($AISI - 1060$).

Досліджували вплив величини швидкості навантаження: $V = 1$ мм/с; $V = 12$ м/с і механічних характеристик матеріалів зразків на енергосилові параметри нанесення концентратора напружень. Розрахункова схема представлена на рис. 6.19.

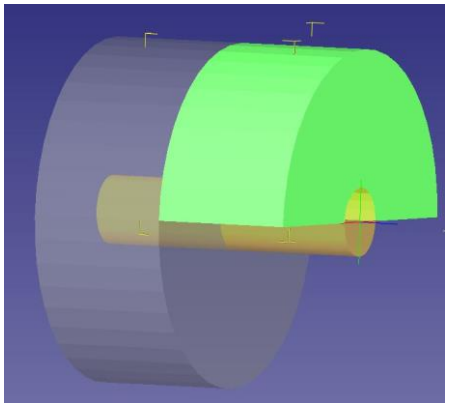


Рис. 6.19 – Розрахункова схема нанесення концентратора напружень за рахунок зсуву частини зразка відносно профілю

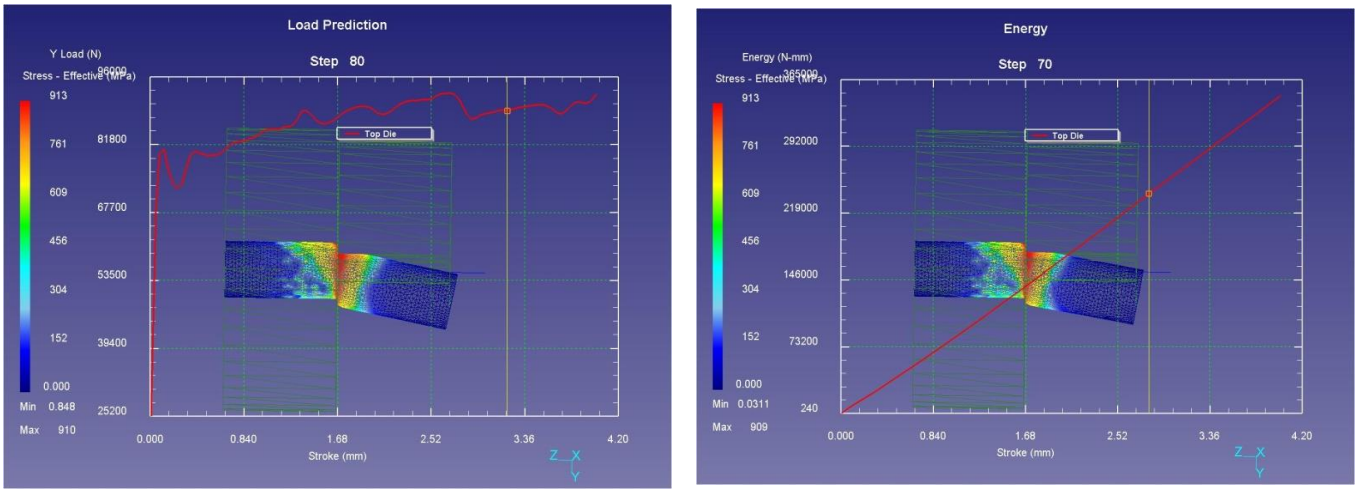
Параметри процесу моделювання представлені у табл. 6.4.

Таблиця 6.4 – Параметри процесу моделювання

| Назва параметру | Значення параметру |
|---|---|
| 1 Властивість матеріалу зразка | «пластичний» |
| 2 Температура | 20°C |
| 3 Кількість елементів розбиття | 40000 |
| 4 Компенсація витрат об'єму, мм$^3$ | 12828,8 |
| 5 Параметри розрахунку: | аналіз Лагранжа |
| ○ кількість кроків розрахунку | 100 |
| ○ приріст кроків, мм/крок | 0,04 |
| ○ хід ножа, мм | 4,0 |
| 6 Рух ножа | переміщення прямолінійне |
| ○ швидкість, мм/с | статика – 1 / динаміка – 12000 |

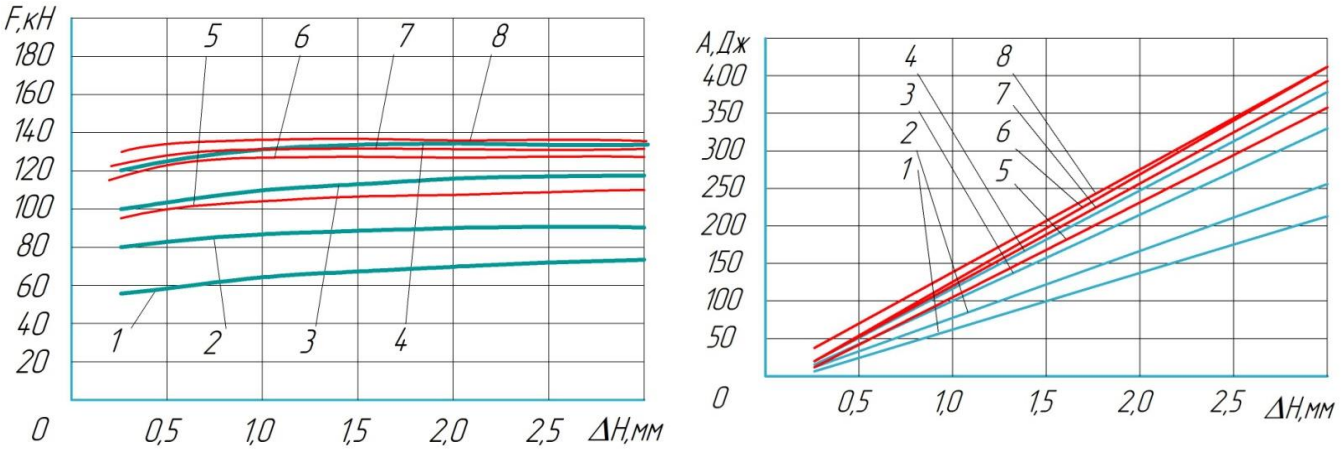
Для даної задачі у програмі Deform обрано вирішувач – *Conjugate gradient* та ітераційний метод – прямий ітераційний; тип розрахунку – *Normalized C&L*.

Результати моделювання представлені на рис. 6.20. Аналіз отриманих результатів на рис. 6.21.




а б

Рис. 6.20 – Залежності сили (а) і роботи деформування (б) від ходу ножа при статичному навантаженні $V = 1$мм/с (зразок із сталі $AISI - 1045$)




а б

Рис. 6.21 – Залежності сили і роботи нанесення концентратора напружень від ходу інструмента: ——— – при $V = 1$ мм/с; ——— – при $V = 12$ м/с; 1, 5 – $AISI - 1010$, 2, 6 – $AISI - 1045$; 3, 7 – $AISI - 1060$; 4, 8 – $AISI - 1020$

Аналіз результатів розрахунків (див. рис. 6.21) показує, що величини сили і роботи нанесення концентратора напружень, зі збільшенням ходу ножа, зростають. Сила зростає у межах $(15 \dots 20)\%$ для розглянутих матеріалів зразків. Таке зростання є незначним, оскільки відбувається зсув усього перерізу зразка відразу після контакту ножа із заготовкою.

Зі збільшенням швидкості навантаження до $V = 12$ м/с величини сили і роботи деформування збільшуються. Сила деформування для сталей: $AISI - 1010$, $AISI - 1045$ збільшується на значну величину – на $(50 \dots 60)\%$. Це пояснюється тим, що при миттєвому збільшенні напруження вище границі пружності, плинність металу наступає із затримкою, що і є причиною підвищення значень динамічних напружень. Для сталей: $AISI - 1060$; $AISI - 1020$ приріст величини сили і роботи нанесення концентратора напружень значно менший.

### *6.2.2 Перевірка результатів моделювання процесу нанесення концентратора напружень частковим зсувом аналітичним методом*

Для перевірки результатів моделювання процесу нанесення концентратора напружень частковим зсувом, отриманих методом скінченних елементів,

застосовували аналітичний метод розрахунку напружень у пластичній зоні матеріала при розділенні способом відрізки зсувом, який запропоновано у роботі [346].

Розрахункова модель пластичної зони при розділенні способом відрізки зсувом представлена на рис. 6.22. Границями пластичної зони є кругові дуги радіусами $r_1, r_2$, що сполучаються, одна з яких проходить через вершину ріжучої кромки інструменту по нормалі до торцевої поверхні інструменту. Пластична зона складається з двох зон, розташованих симетрично щодо прямої, яка проходить через центри кругових дуг під кутом $\varphi_0$.

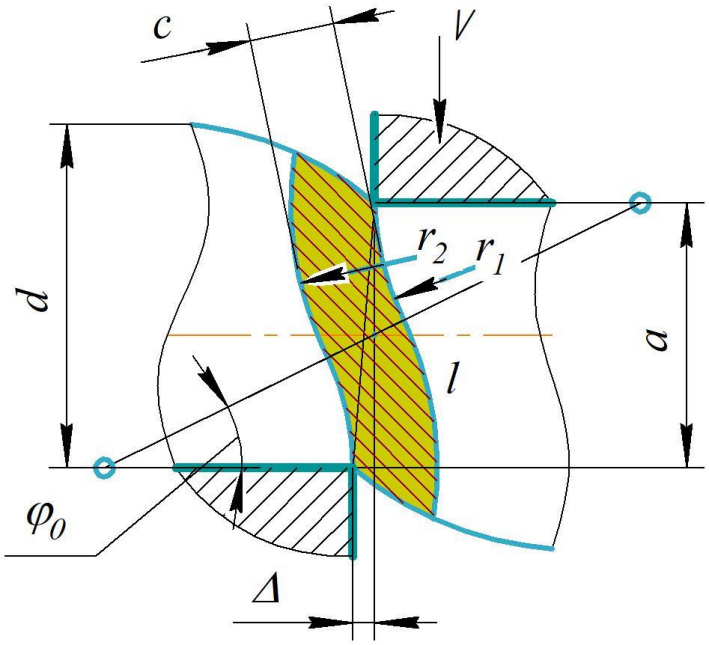



Рис. 6.22 – Розрахункова модель пластичної зони при розділенні способом відрізки зсувом [346]

$\varphi_0$ – кут нахилу лінії центрів кругових дуг до площин контакту ножа:

$$\varphi_0 = \sqrt{4(1+\bar{p})^2 + 1} - 2 \cdot (1+\bar{p}); \qquad (6.44)$$

де $\bar{p} = \sqrt{3} \cdot p_0 \cdot d/(2 \cdot \sigma_s \cdot a)$;

$p_0$ – середній тиск бокового підпору при розділенні;

$d$ – початковий розмір зразка;

$a$ – поточна відстань між ріжучими кромками ножів;

$\sigma_s$ – напруження текучості;

$r_1$, $r_2$ – радіуси кривизни границь пластичної зони (див. рис. 6.22):

$$r_1 = a/(2 \cdot tg\varphi_0) - 0{,}5\Delta; \quad (6.45)$$

$$r_2 = a/sin\varphi_0 - r_1; \quad (6.46)$$

де $\Delta$ – осьовий зазор між ножами.

Довжина розгортки пластичної зони (див. рис. 6.22) дорівнює $l = a \cdot \varphi_0/sin\varphi_0$, а товщина пластичної області – $c \cong r_2 - r_1 = \varphi_0 \cdot a/2$.

Для оцінки розмірів зони руйнування металу в процесі вдавлення ріжучих кромок ножів використаний енергетичний критерій руйнування:

$$A \leq [A], \quad (6.47)$$

де $A$ – питома робота напружень розтягання на інтенсивності накопичених деформацій;

$[A]$ – гранична величина роботи.

Зміцнення матеріалу описується статечною залежністю:

$$\sigma_S = \sigma_0 \cdot e_i^n, \quad (6.48)$$

де $\sigma_0$ та $n$ – постійні.

Тоді

$$[A] = \sigma_0/(n+1) \cdot \left(ln(1/1-\psi)\right)^{1+n}, \quad (6.49)$$

де $\psi$ – повне відносне звуження матеріалу при випробуваннях на розтягання, температурно-швидкісні умови яких подібні умовам відрізки зсувом:

$$A = \int_0^{e_i} (\sigma_1^* + \sigma_2^*)\, de_i, \tag{6.50}$$

де $\sigma_1^* = \begin{cases} \sigma_\rho \text{ при } \sigma_\rho > 0; \\ 0 \text{ при } \sigma_\rho \le 0; \end{cases}$ $\sigma_2^* = \begin{cases} \sigma_z \text{ при } \sigma_z > 0; \\ 0 \text{ при } \sigma_z \le 0; \end{cases}$

$\sigma_\rho$, $\sigma_\varphi$, $\sigma_z$ – напруження, що діють у пластичній зоні, в циліндричних координатах $\rho, \varphi, z$:

$$\left.\begin{aligned} \sigma_\rho &= -2 \cdot \sigma_S/\sqrt{3}\,[1 - \varphi_0 \cdot (r_1^2/(r_2^2 - r_1^2))]; \\ \sigma_\varphi &= -2 \cdot \sigma_S/\sqrt{3} \cdot \varphi_0 \cdot (r_1^2/(r_2^2 - r_1^2)); \\ \sigma_z &= (\sigma_\rho + \sigma_\varphi)/2\,, \end{aligned}\right\} \tag{6.51}$$

$e_i$ – середньоінтегральна інтенсивність накопичених деформацій у пластичній зоні дорівнює:

$$e_i = 2/(\sqrt{3} \cdot \varphi_0) \cdot ln(d/a); \tag{6.52}$$

Розрахунки проведені для зразків $d = 16$ мм із сталі 10 при $a$: 12, 13, 14 мм та $\Delta = 0{,}5$ мм. Середній тиск бокового підпору $p_0 = 120$ МПа. Результати розрахунків занесені до табл. 6.5.

Таблиця 6.5 – Результати розрахунку параметрів процесу розділення способом відрізки зсувом за математичною моделлю [346] (див. рис. 6.22)

| Марка сталі | $a/d$ | $\varphi_0$, рад | $r_1$, мм | $r_2$, мм | $c$, мм | $l$, мм | $A_0$ | $[A_0]$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Сталь 10 | 0,75 | 0,19 | 31,33 | 32,96 | 1,63 | 12,07 | 0,81 | 0,76 |
| | 0,81 | | 33,41 | 35,15 | 1,74 | 13,08 | 0,83 | |
| | 0,88 | | 35,49 | 37,34 | 1,86 | 14,09 | 0,85 | |

На рис. 6.23 показаний розподіл відносної питомої роботи напружень розтягання:

$$A_0 = (n+1) \cdot A/\sigma_0 \tag{6.53}$$

та рівень відносної граничної величини питомої роботи напружень розтягання:

$$[A_0] = (n+1) \cdot [A]/\sigma_0 \tag{6.54}$$

уздовж розгортки пластичної зони у залежності від відносного вдавлення ріжучих кромок ножів у матеріал $a/d$ : 0,75; 0,81; 0,88 за даними табл. 6.5.

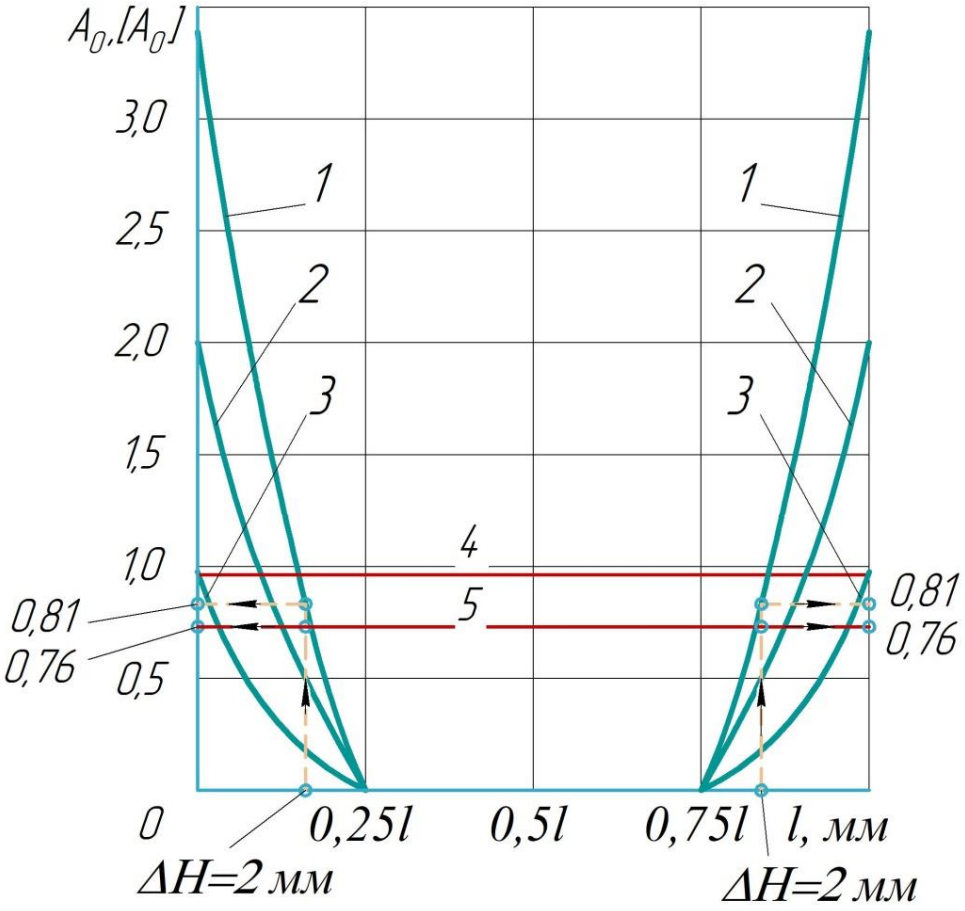



Рис. 6.23 – Розподіл відносної питомої роботи напружень розтягання (▬) і відносної граничної величини питомої роботи напружень розтягання (▬) у пластичній області при відрізці зсувом: $1, 2, 3$ – $a/d = 0{,}75; 0{,}81; 0{,}88$; $4, 5$ – $\psi = 0{,}6; 0{,}5$.

При глибині концентратора напружень з двох сторін ріжучих кромок ножів $\Delta H = 2$ мм, нанесеного на зразок із сталі 10, величини відносної питомої роботи напружень розтягання $A_0$ та відносної граничної величини питомої роботи напружень розтягання $[A_0]$ склали відповідно: $A_0 = 0{,}81$; $[A_0] = 0{,}76$ (див. рис. 6.23). Порівняльний аналіз результатів розрахунків щодо нанесення концентратора напружень ($\Delta H = 2$ мм) методом скінченних елементів та аналітичним методом [346] показує, що розбіжність порівняних величин склала: роботи деформування – до 20% (див. рис. 6.20), інтенсивності напружень (рис. 6.24) – до 20%. Значні величини розбіжностей пояснюються тим, що аналітичний розрахунок допускає певні припущення: деформація матеріалу в пластичній зоні розділення плоска; матеріал має жорсткопластичні властивості та постійну для пластичної області величину напружень текучості $\sigma_s$, яка визначається за кривими зміцнення матеріалу середньоінтегральними інтенсивностями швидкості деформації та накопичених деформацій у пластичній області та інше. Метод скінченних елементів також використовує допущення і спрощуючі екстремальні принципи.

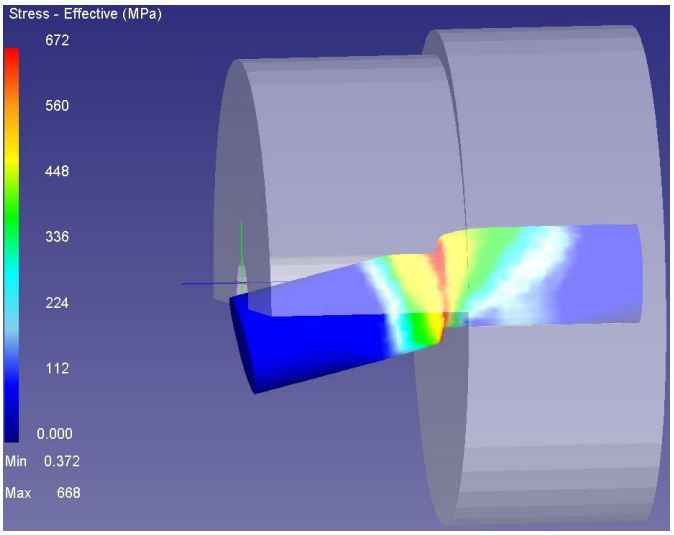



Рис. 6.24 – Результати моделювання процесу нанесення концентратора напружень частковим зсувом на зразок із сталі 10 при статичному навантаженні методом скінченних елементів

### *6.2.3 Моделювання процесу розділення сортового прокату способами «консольної ломки» і «реверсного зсуву» з використанням програмного комплексу Deform*

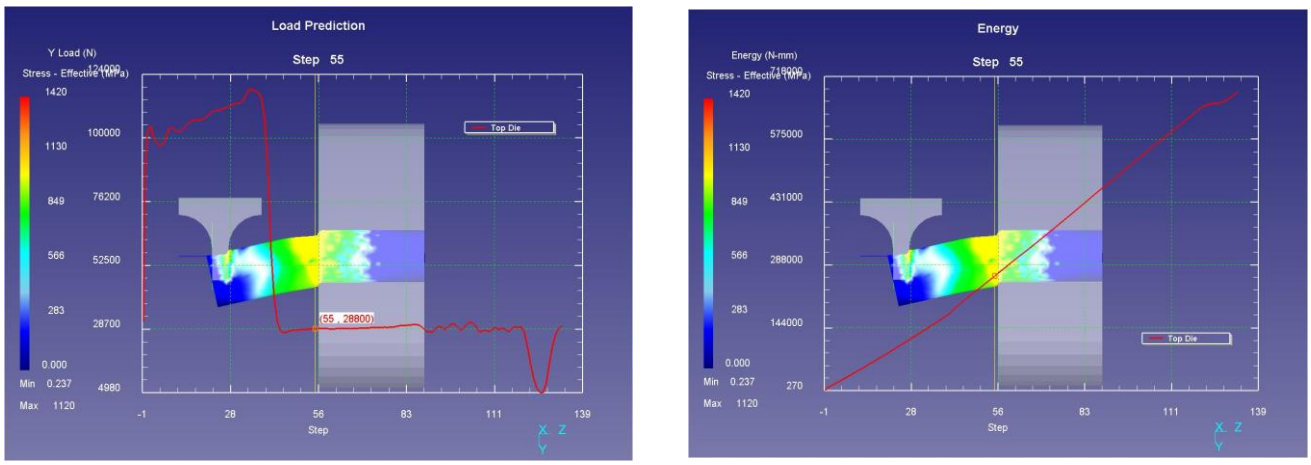
На другому етапі навантаження досліджували два варіанта розділення зразків: «частковий зсув – консольна ломка», «частковий зсув – реверсний зсув». Теоретичні дослідження проводили із застосуванням методу скінченних елементів. Оцінку можливості проведення розділення за один робочий хід проводили порівнянням робіт нанесення концентратору напружень і розділення.

Перший варіант (див. рис. 6.1, б) передбачав розділення зразка за схемою «частковий зсув – консольна ломка» (суміщений процес реалізації двох етапів нанесення концентратора напружень і остаточне розділення в одному розрахунку).

Для даної задачі у програмі Deform обрано вирішувач «Розріджених матриць» та ітераційний метод – Ньютона-Рафсона, тип розрахунку – $Normalized\ C\&L$. Плече прикладення навантаження – 35 мм. Параметри процесу моделювання представлені у табл. 6.6. Результати моделювання представлені на рис. 6.25.

Таблиця 6.6 – Параметри процесу моделювання

| Назва параметру | Значення параметру |
|---|---|
| 1 Властивість матеріалу зразка | «пружно-пластичний» |
| 2 Температура | 20°C |
| 3 Кількість елементів розбиття | 39029 |
| 4 Компенсація витрат об’єму, мм$^3$ | 12816 |
| 4 Параметри розрахунку: | аналіз Лагранжа |
| ○ кількість кроків розрахунку | 100 |
| ○ приріст кроків, мм/крок | 0,2 |
| ○ хід ломника, мм | 20 |
| 5 Рух клина | переміщення прямолінійне |
| ○ швидкість, мм/с | 1 |




а б

Рис. 6.25 – Залежності сили (а) і роботи деформування (б) від кроку розрахунку при статичному навантаженні $V = 1$ мм/с (зразок із сталі $AISI - 1060$) (суміщений процес реалізації двох етапів в одному розрахунку)

Аналіз розрахунків представлений на рис. 6.26.

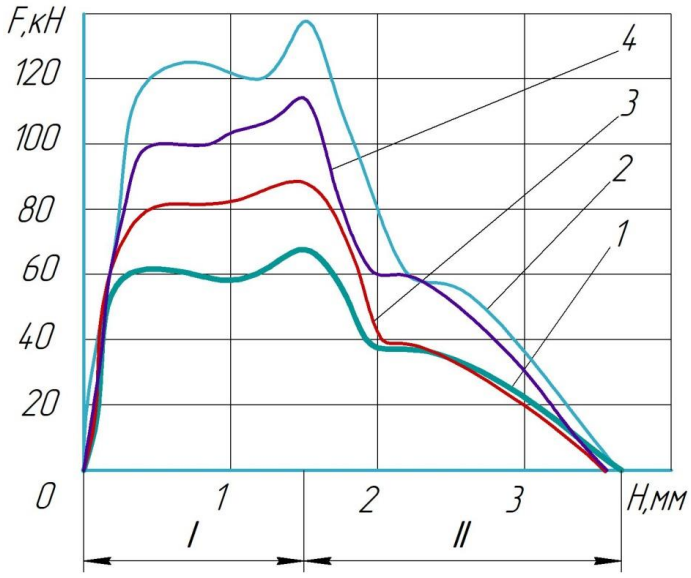



Рис. 6.26 – Залежності $F = f(H)$ $(\Delta H = 1{,}5$ мм$)$ при розділенні за схемою «частковий зсув – консольна ломка»: $I$ – зона попереднього нанесення концентратора напружень за рахунок зсуву частини прокату відносно профілю; $II$ – зона консольної ломки зразка при статичному навантаженні: 1 – $AISI - 1010$; 2 – $AISI - 1020$; 3 – $AISI - 1045$; 4 – $AISI$ – 1060 (суміщений процес реалізації двох етапів в одному розрахунку)

Аналіз проведених досліджень показав, що без додаткового джерела енергії, розділення за даною схемою за один робочий хід здійснити важко, оскільки робота

для нанесення концентратора напружень (зона *I*) перевищує роботу консольної ломки (зона *II*) зразків із сталей з різними механічними характеристиками (див. рис. 6.26). Тобто енергії розвантаження преса буде недостатньо для нанесення ефективного концентратора напружень за один робочий хід.

Другий варіант реалізації схеми «частковий зсув – реверсний зсув» передбачає остаточну відрізку зсувом зразка з попередньо нанесеним концентратором напружень частковим зсувом (див. рис. 6.2). При цьому відрізка проводилася у напрямку протилежному напрямку нанесення концентратора напружень з використанням ефекту Баушингера, який полягає в зниженні границь пропорційності, пружності й текучості матеріалу в результаті зміни знака навантаження. Метал, підданий незначній пластичній деформації навантаженням одного знака (етап нанесення концентратора напружень), виявляє при зміні знака навантаження (етап остаточного розділення) знижений опір початковим пластичним деформаціям. Цей ефект пов'язують із наявністю залишкових напружень у найбільш деформованих зернах металу, які, складаючись із робочими напруженнями при зміні знака навантаження, викликають зниження зазначених вище характеристик зразка. Ефект Баушингера сприяє зниженню енергосилових параметрів процесу розділення.

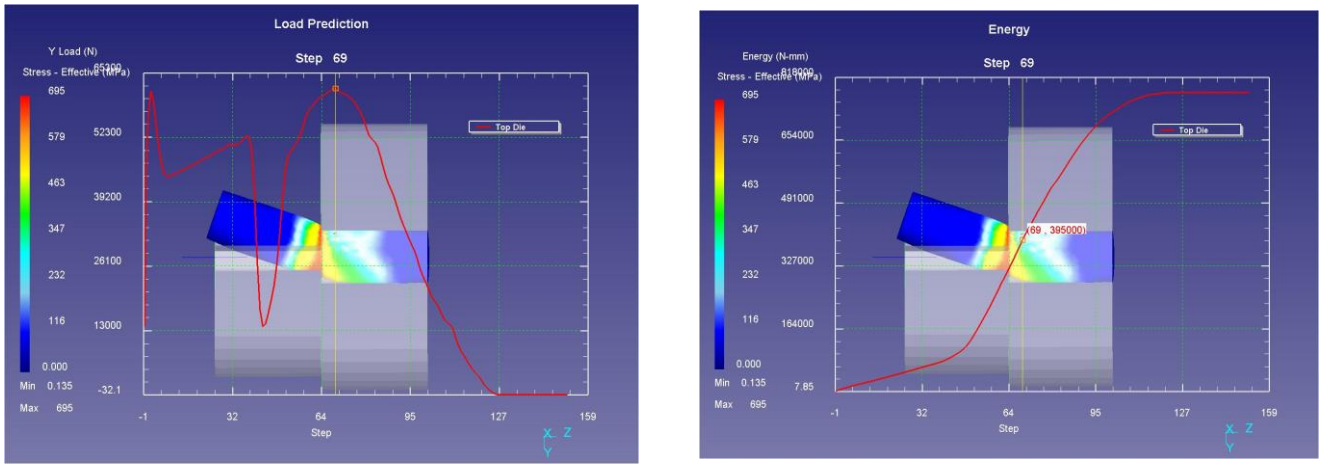
Параметри процесу моделювання представлені у табл. 6.7.

Таблиця 6.7 – Параметри процесу моделювання

| Назва параметру | Значення параметру |
|---|---|
| 1 Властивість матеріалу зразка | «пластичний» |
| 2 Температура | 20°C |
| 3 Кількість елементів розбиття | 20291 |
| 4 Компенсація витрат об’єму, мм$^3$ | 6572 |
| 5 Параметри розрахунку: | аналіз Лагранжа |
| ○ кількість кроків розрахунку | 100 |
| ○ приріст кроків, мм/крок | 0,25 |
| ○ хід ножа, мм | 25 |
| 6 Рух ножа | переміщення прямолінійне |
| ○ швидкість, мм/с | 1 |

Для даної задачі у програмі Deform обрано вирішувач – $Conjugate\ gradient$ та ітераційний метод – прямий ітераційний; тип розрахунку – $Normalized\ C\&L$.

Результати теоретичних експериментів представлені на рис. 6.27. Аналіз отриманих результатів на рис. 6.28.




а б

Рис. 6.27 – Залежності сили (а) і роботи деформування (б) від кроку розрахунку при статичному навантаженні $V = 1$мм/с (зразок із сталі $AISI - 1010$)

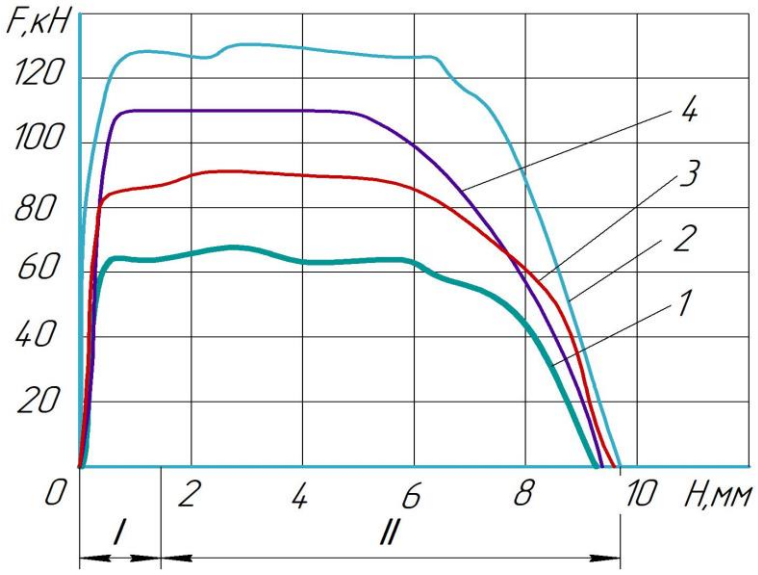



Рис. 6.28 – Залежності $F = f(H)$ при реалізації процесу розділення реверсивною відрізкою зсувом: $I$ – зона нанесення концентратора напружень; $II$ – зона відрізки зразка зсувом у напрямку протилежному напрямку нанесення концентратора напружень при статичному навантаженні: 1 – $AISI - 1010$; 2 – $AISI - 1020$; 3 – $AISI - 1045$; 4 – $AISI$ – 1060

Аналіз отриманих результатів показує, що співвідношення між роботою нанесення концентратора напружень (зона $I$) і відрізки зсувом (зона $II$) дозволяє провести процес розділення за один робочий хід. Отримані результати дозволяють зробити висновок про те, що енергії, накопиченої в машині за рахунок пружної деформації станини й привода, буде достатньо для нанесення ефективного концентратора напружень.

Отримані результати підтверджуються даними аналітичних розрахунків [326] при дослідженні роботи гідравлічного преса П 424 в момент спаду технологічного опору, в якому енергія розвантаження преса використовується для нанесення концентратора напружень з параметрами: $\Delta H = 8$ мм, $r = 0{,}15$ мм на прокат $d = 200$ мм. Встановлено, що робота нанесення концентратора напружень складає до 5% від роботи відрізки зсувом. При глибині концентратора напружень 10% від розміру поперечного перерізу прокату робота нанесення концентратора напружень складає до 20% від роботи розділення, що підтверджує отримані результати.

### *6.2.4 Експериментальні дослідження процесу розділення зразків за схемами «частковий зсув – консольна ломка» та «частковий зсув – реверсивна відрізка»*

Для оцінки результатів моделювання та визначення величин енергосилових параметрів, необхідних для розділення зразків та нанесення ефективного концентратора напружень проведені експериментальні дослідження.

Для проведення експериментів розробили і виготовили оригінальну оснастку (див. рис. 2.19): для нанесення концентратора напружень частковим зсувом і остаточного розділення консольною ломкою (див. рис. 2.19, а), для нанесення концентратора напружень частковим зсувом і остаточного розділення відрізкою зсувом (див. рис. 2.19, б). Для цього використовувався кривошипний прес зусиллям 2,5 МН мод. ДС 250/800 «Пельс».

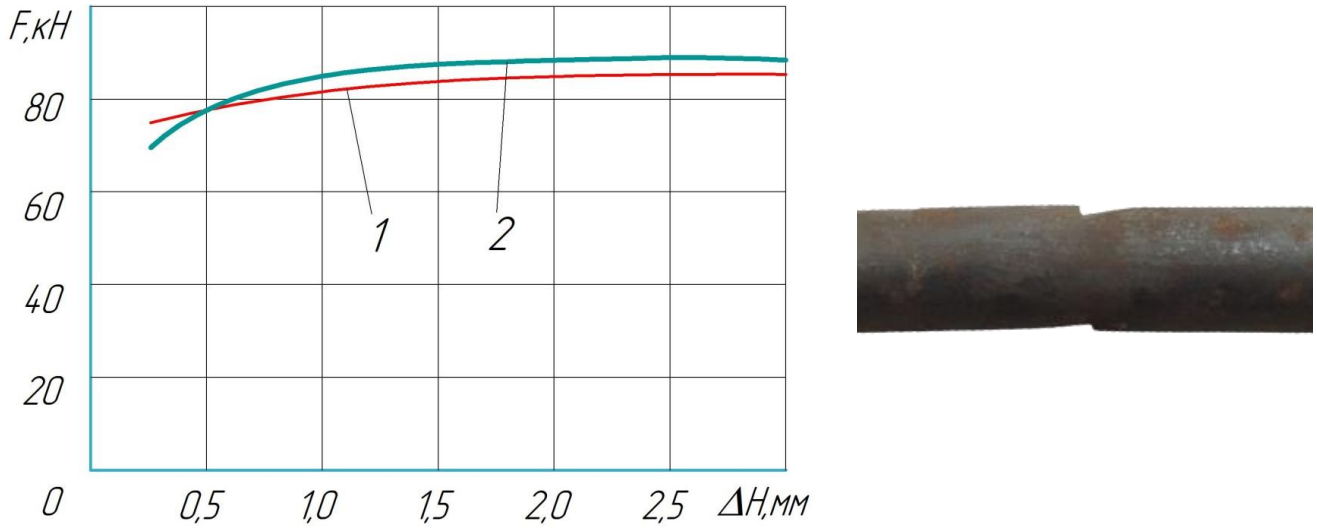
Тензодатчики клеїли на деталі оснастки і підключали за мостовою схемою до ПЕОМ за допомогою універсального багатоканального пристрою Е – 440. Масив

отриманих цифрових даних оброблявся за допомогою спеціально розробленого програмного забезпечення. При проведенні експерименту використовувалися два паралельні канали для реєстрування сили деформування і переміщення інструменту (сигнал знімали з ходографа) з метою побудови залежності «сила $F$ – переміщення $\Delta H$ інструмента».

Перевірку теоретичних розрахунків щодо нанесення концентратора напружень за рахунок зсуву частини зразка відносно профілю проводили на зразках із матеріалу: Сталь 45 з розмірами: $d = 16$ мм, $l = 40$ мм. Результати вимірювань представлені залежністю $F = f(\Delta H)$ (рис. 6.29, а).

Фотографія зразка з нанесеним концентратором напружень представлена на рис. 6.29, б.

Геометрична точність заготовок, розділених за схемою «частковий зсув – консольна ломка» (див. рис. 6.1, б), виявилася невисокою. Тому результати вимірів енергосилових параметрів процесу розділення і геометричної точності отриманих заготовок не приводяться.



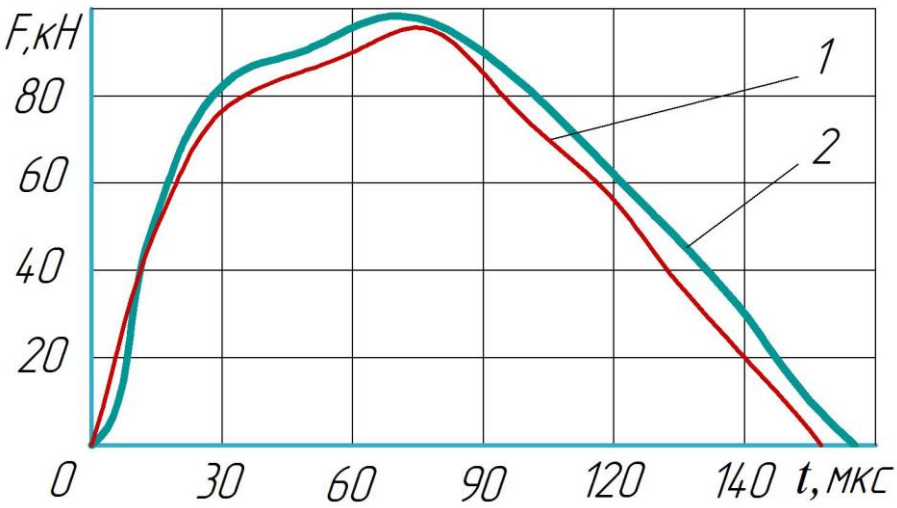

а б

Рис. 6.29 – Залежності $F = f(\Delta H)$ (а) при реалізації процесу попереднього нанесення концентратора напружень за рахунок зсуву частини зразка відносно профілю (Сталь 45) при статичному навантаженні: 1 – розрахунок; 2 – експеримент; фотографія зразка з нанесеним концентратором напружень (б)

На рис. 6.30, а наведена залежність $F = f(t)$, отримана при реалізації процесу розділення зразка із сталі 45 за схемою «частковий зсув – реверсивна відрізка» при статичному навантаженні ($\Delta H = 1{,}5$ мм).

Фотографія відрізаної заготовки із сталі 45 представлена на рис. 6.30, б.

Геометрична точність відрізаних заготовок вимірялася за схемою, наведеною на рис. 1.1. Результати проведених вимірів відносних середніх величин викривлень геометричної форми заготовок, отриманих за схемою «частковий зсув – реверсивний зсув» при статичному навантаженні, представлені в табл. 6.8.






а б

Рис. 6.30 – Залежності $F = f(t)$ (а) при реалізації процесу розділення зразка із сталі 45 за схемою «частковий зсув – реверсивний зсув» при статичному навантаженні: 1 – розрахунок; 2 – експеримент; фотографія розділеної заготовки (б)

Таблиця 6.8 – Параметри геометричної точності відрізаних заготовок (див. рис. 1.1)

| Матеріал заготовки | $l$, мм | $\varphi°$ | | $u = U/d$ | | $s = S/d$ | | $m = M/d$ | | $b = B/d$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\varphi_п$ | $\varphi_з$ | $u_п$ | $u_з$ | $s_п$ | $s_з$ | $m_п$ | $m_з$ | $b_п$ | $b_з$ |
| Сталь 45 | 40 $(2{,}5d)$ | 1,50 | 1,80 | 0,80 | 0,90 | 0,30 | 0,50 | 0,20 | 0,25 | 0,05 | 0,08 |

Розбіжність значень максимальної сили відрізки зсувом $F_{max}$, отриманих в результаті теоретичних і експериментальних розрахунків (див. рис. 6.28, 6.30) не перевищує 8%.

Аналіз результатів теоретичних і експериментальних досліджень дозволяє зробити наступні висновки.

1. Аналізом запропонованого способу розділення за схемою «частковий зсув – консольна ломка», в якому концентратор напружень наноситься зсувом частини прокату відносно профілю з використанням енергії розвантаження пресу, а остаточне розділення – консольною ломкою згином, із застосуванням методу скінченних елементів, встановлено залежності енергосилових параметрів процесу розділення. Виявлено, що величина роботи по нанесенню концентратора напружень складає до 60% від роботи, що витрачається на розділення зразка. А це свідчить про те, що енергії розвантаження преса буде недостатньо для нанесення ефективного концентратора напружень і розділення неможливе без додаткового джерела енергії. При цьому геометрична точність отриманих заготовок виявилася низькою. Тому результати вимірів енергосилових параметрів процесу розділення і геометричної точності отриманих заготовок не приводяться.

2. Аналізом запропонованого способу розділення за схемою «частковий зсув – реверсивний зсув», в якому концентратор напружень наноситься зсувом частини прокату відносно профілю з використанням енергії розвантаження пресу, а остаточне розділення – реверсивним зсувом, із застосуванням методу скінченних елементів, встановлено залежності енергосилових параметрів процесу розділення. Виявлено, що величина роботи нанесення концентратора напружень складає до 20% від роботи розділення. Тобто можна стверджувати, що енергії розвантаження преса буде достатньо для нанесення ефективного концентратора напружень за один робочий хід преса. Геометрична точність отриманих заготовок задовільна.

3. Встановлено, що на етапі нанесення концентратора напружень за рахунок часткового зсуву прокату відносно профілю, величини сили і роботи нанесення концентратора напружень збільшуються. Сила нанесення концентратору напружень

зростає у межах $(15 \dots 20)\%$ для матеріалів з різними механічними характеристиками. Таке зростання є незначним, оскільки відбувається зсув усього перерізу зразка відразу після контакту ножа із заготовкою. Зі збільшенням швидкості навантаження величини сили і роботи деформування також збільшуються. Сила нанесення концентратору напружень для сталей $10, 45$ збільшується на значну величину – на $(50 \dots 60)\%$. Це пояснюється тим, що при миттєвому збільшенні напруження вище границі пружності, плинність металу наступає із затримкою, що і є причиною підвищення значень динамічних напружень. Для сталей: $60С2;\ 20$ приріст величини сили і роботи нанесення концентратора напружень значно менший. Величину глибини концентратора напружень слід вибирати у діапазоні $\Delta H = (10 \dots 20)\%$ від розміру поперечного перерізу зразка з урахуванням механічних властивостей матеріалу зразка.

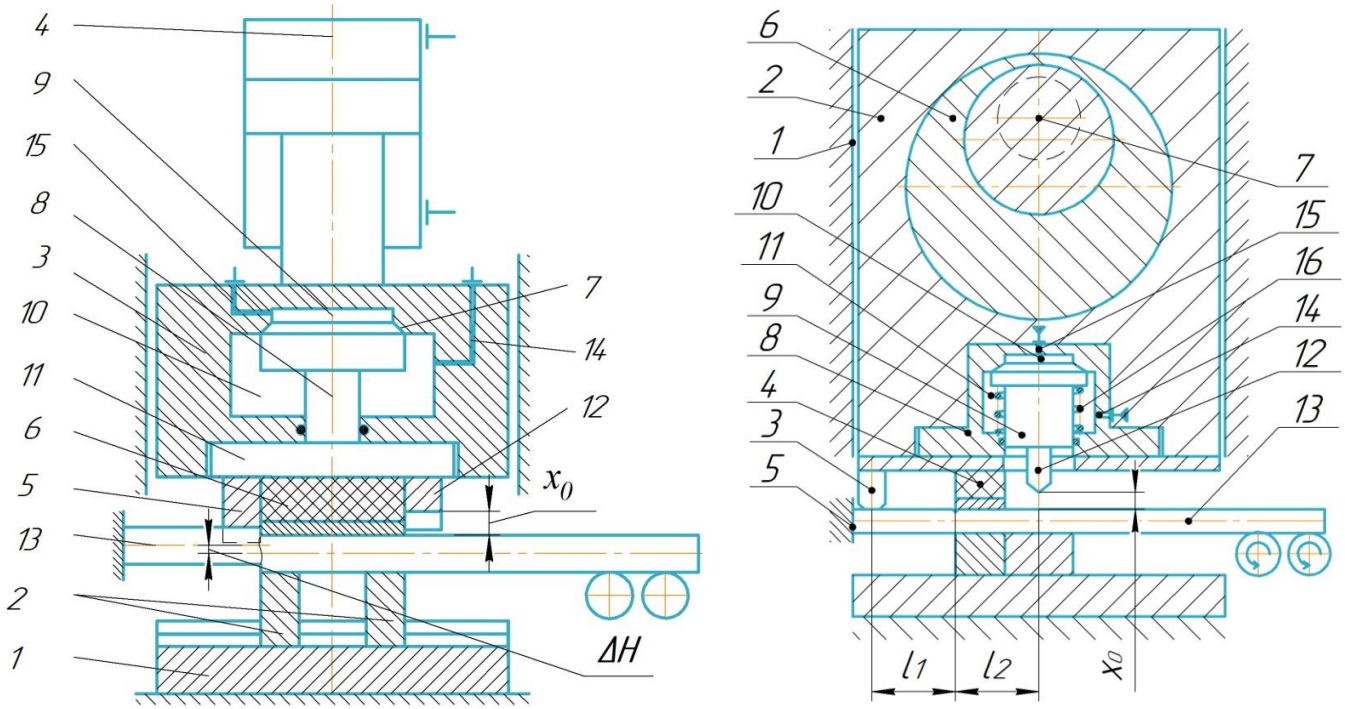
4. Адекватність теоретичних розрахунків підтверджена експериментальними даними (розбіжність до 8%).

## 6.3 Перспективні схеми обладнання з використанням енергії розвантаження преса для нанесення концентратора напружень

Як показали результати моделювання, енергії пружного розвантаження обладнання у момент миттєвого зняття технологічного навантаження може бути не достатньо для нанесення ефективного концентратора напружень. У цьому випадку треба мати додаткове джерело енергії. Правильним рішенням цієї проблеми буде застосування гідропружного циліндра конструкції ДДМА. Конструктивна реалізація таких рішень в установках як з механічним, так і з гідравлічним приводом наведена на рис. 6.31.

Установка для відрізки сортового прокату зсувом з гідравлічним приводом (див. рис. 6.31, а) працює у такий спосіб. Під дією сили з боку робочого гідроциліндра 4, рухома траверса 3 рухається вниз, здійснюючи затиск прокату 13, за допомогою пружного елемента 6, і відрізку зсувом в площині попередньо нанесеного концентратора напружень за допомогою ножа 5. Перед цим в штокову

порожнину високого тиску 10 по каналу 14 подається робоча рідина і створюється тиск. У момент руйнування прокату в площині концентратора напружень відбувається різке скидання технологічної сили. Система «гідравлічний циліндр 4 – рухома траверса 3 з бойком 11 – ножі 5, 12» стає динамічно неврівноваженою. Тому рухома траверса 3 разом з ножем 12 розганяється на ході $x_0$ і наносить на прокат концентратор напружень за рахунок радіального зсуву частини прокату відносно осі заготовки на величину $\Delta H$. Одночасно, в момент руйнування прокату надпоршнева порожнина 9 низького тиску, шляхом переключення розподільного клапана, по каналу 15, з'єднується з порожниною високого тиску 10. Робоча рідина під високим тиском діє на всю площу торця поршня 8, який прискорено рухається вниз, разом з бойком 11 і ножем 12 та додає потрібну енергію для нанесення ефективного концентратора напружень. Нанесення концентратора напружень і відрізка прокату зсувом здійснюються у протилежних напрямках.




а б

Рис. 6.31 – Установки для розділення сортового прокату з використанням пружної енергії деформації станини і привода

На рис. 6.31, б представлена конструкція установки для консольної ломки сортового прокату на базі преса з кривошипно-круговим механізмом [347]. Прокат 13 з попередньо нанесеним концентратором напружень розміщується в механізмі затиску 4 прокату і подається до упору 5. Під дією приводу ексцентриковий вал 7 обертається і витискає круговий шатун 6. При цьому повзун 2 рухається вниз у напрямних 1 разом із закріпленим на ньому ломником 3, здійснюючи затиск за допомогою механізму затиску прокату, і ломку прокату в площині концентратора напружень. При цьому попередньо в штокову порожнину високого тиску 11 по каналу 14 подається робоча рідина і створюється тиск. У момент руйнування прокату в площині концентратора напружень відбувається різке скидання сили розділення. Установка стає динамічно неврівноваженою. Тому повзун 2 разом з, підпружиненим пружиною 16, ножем 12 розганяється на ході $x_0$ і наносить на прокат концентратор напружень. Одночасно в момент руйнування прокату порожнина низького тиску 10, шляхом переключення розподільного клапана, по каналу 15 з'єднується з порожниною високого тиску 11. Робоча рідина під високим тиском діє на всю площу торця ударного поршня 9, який прискорено рухається вниз, разом з ножем 12 і додає енергії для нанесення концентратора напружень.

**Висновки до розділу 6.**

1. Запропоновані і досліджені нові способи розділення сортового прокату комбінованим навантаженням за рахунок активних зусиль деформування пресом та реактивних зусиль пружної деформації технологічної системи, що дозволяє послідовно за один робочий хід виконувати операції «нанесення концентратора напружень – розділення» за схемами: «вдавлення клинового ножа – консольна ломка», «частковий зсув – консольна ломка», «частковий зсув – реверсний зсув».

2. Аналізом запропонованого способу розділення за схемою «вдавлення клинового ножа – консольна ломка», із застосуванням методів полів ліній козання і методу скінченних елементів, встановлено залежності енергосилових параметрів процесу розділення, співвідношення робіт нанесення концентратора напружень і консольної ломки. Виявлено, що величина роботи вдавлення клинового ножа складає не більше 20% від роботи розділення прокату, тому енергії розвантаження преса в момент зняття технологічного навантаження достатньо для нанесення

ефективного концентратора напружень. Встановлено, що для нанесення ефективного концентратора напружень і забезпечення стійкості інструмента, кут $\alpha$ слід вибирати у діапазоні $(25 \dots 40)^{\circ}$, а глибину вдавлення концентратора напружень – $\Delta H = (10 \dots 20)\%$ від розміру поперечного перерізу зразка. Виявлено, що більш точною є побудова полів ліній ковзання з увігнутою границею пластичної зони витисненого металу. Геометрична точність отриманих заготовок за консольною схемою ломки з однобічним концентратором напружень задовільна, але поступається заготовкам, які отримано за схемою триточкової ломки з концентратором напружень, нанесеним по периметру зразка.

3. Аналізом запропонованого способу розділення за схемою «частковий зсув – реверсивний зсув», із застосуванням методу скінченних елементів, встановлено залежності енергосилових параметрів процесу розділення. Отримані результати задовільно корелюються із результатами аналітичного розрахунку напружень при відрізці зсувом. Виявлено, що робота нанесення концентратора напружень складає не більше 20% від роботи, що витрачається на розділення зразка. Це дозволяє стверджувати, що енергії розвантаження преса буде достатньо для нанесення ефективного концентратора напружень за один робочий хід преса. Геометрична точність отриманих заготовок задовільна.

4. Аналізом запропонованого способу розділення за схемою «частковий зсув – консольна ломка», із застосуванням методу скінченних елементів, встановлено залежності енергосилових параметрів процесу розділення. Виявлено, що робота нанесення концентратора напружень складає не менше 60% від роботи, що витрачається на розділення зразка. Тому даний спосіб можна реалізувати лише при наявності додаткового джерела енергії, оскільки енергії розвантаження преса буде недостатньо для нанесення ефективного концентратора напружень. Геометрична точність заготовок, розділених за цією схемою виявилася низькою.

5. Встановлено, що на етапі нанесення концентратора напружень за схемами: «частковий зсув – консольна ломка», «частковий зсув – реверсний зсув», величини сили і роботи нанесення концентратора напружень, зі збільшенням ходу ножа, зростають. Сила деформування зростає у межах $(15 \dots 20)\%$ для матеріалів з різними механічними характеристиками. Таке зростання є незначним, оскільки відбувається зсув усього перерізу зразка відразу після контакту ножа із заготовкою.

Зі збільшенням швидкості навантаження, величини сили і роботи деформування також збільшуються. Величину глибини концентратора напружень слід вибирати у діапазоні $\Delta H = (10\ldots20)\%$ від розміру поперечного перерізу зразка з урахуванням механічних властивостей матеріалу зразка.

6. Адекватність теоретичних розрахунків перевірена експериментальними дослідженнями. Розбіжність результатів теоретичних і експериментальних досліджень не перевищує 8%.

7. Розроблено і запатентовано конструкції обладнання для реалізації запропонованих способів розділення сортового прокату з використанням шкідливої енергії розвантаження преса, що дозволяє збільшити коефіцієнти корисної дії і використання преса за зусиллям, продуктивність процесів розділення та зменшити негативні наслідки від розвантаження преса в момент стрімкого зростання закритичної тріщини і відділення заготовки.

*Результати досліджень опубліковані в роботах [327,329 – 333, 340, 341, 343].*

# РОЗДІЛ 7
# ДОСЛІДЖЕННЯ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ШТАМПІВ З ДИФЕРЕНЦІЙОВАНИМ КОМБІНОВАНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ ДЛЯ РОЗДІЛЕННЯ СОРТОВОГО ПРОКАТУ.

## 7.1 Класифікація штампів з диференційованим затиском прокату

Із усього устаткування для відрізки сортового прокату зсувом, у якому реалізована схема з активним поперечним затиском, найбільш перспективним представляється штампи із затискною силою, пропорційною силі відрізки, відомі за назвою «штампи з диференційованим затиском» [3].

Незважаючи на наявність інформації про конструктивні реалізації устаткування з диференційованим затиском, подібне устаткування не знайшло широкого застосування на виробництві. При очевидних перевагах таких штампів, загальним і істотним для них недоліком є надмірна складність конструкцій і трудомісткість обслуговування. Крім того, для таких штампів характерні підвищені витрати енергії на подолання тертя, яке у свою чергу приводить до інтенсивного зношування контактних поверхонь [3, 348]. Через надмірні габаритні розміри штампу, обладнання для нього приходиться вибирати не за розрахованою силою розділення, а за розмірами штампового простору.

Розроблена класифікація штампів з диференційованим затиском прокату (рис. 7.1) для аналізу сучасного стану даного питання та створення можливих конструкцій штампів з використанням комбінації ознак класифікації [38, 349].

У конструкціях відрізних штампів може бути реалізований диференційований затиск або відрізаємої заготовки (2.1), або самого прокату (2.2). У той же час, деякі іноземні фірми випускають обладнання з комбінованим затиском: активним з постійним зусиллям, що прикладається до прокату й пасивним, що прикладається до відрізаємої заготовки [350, 351].

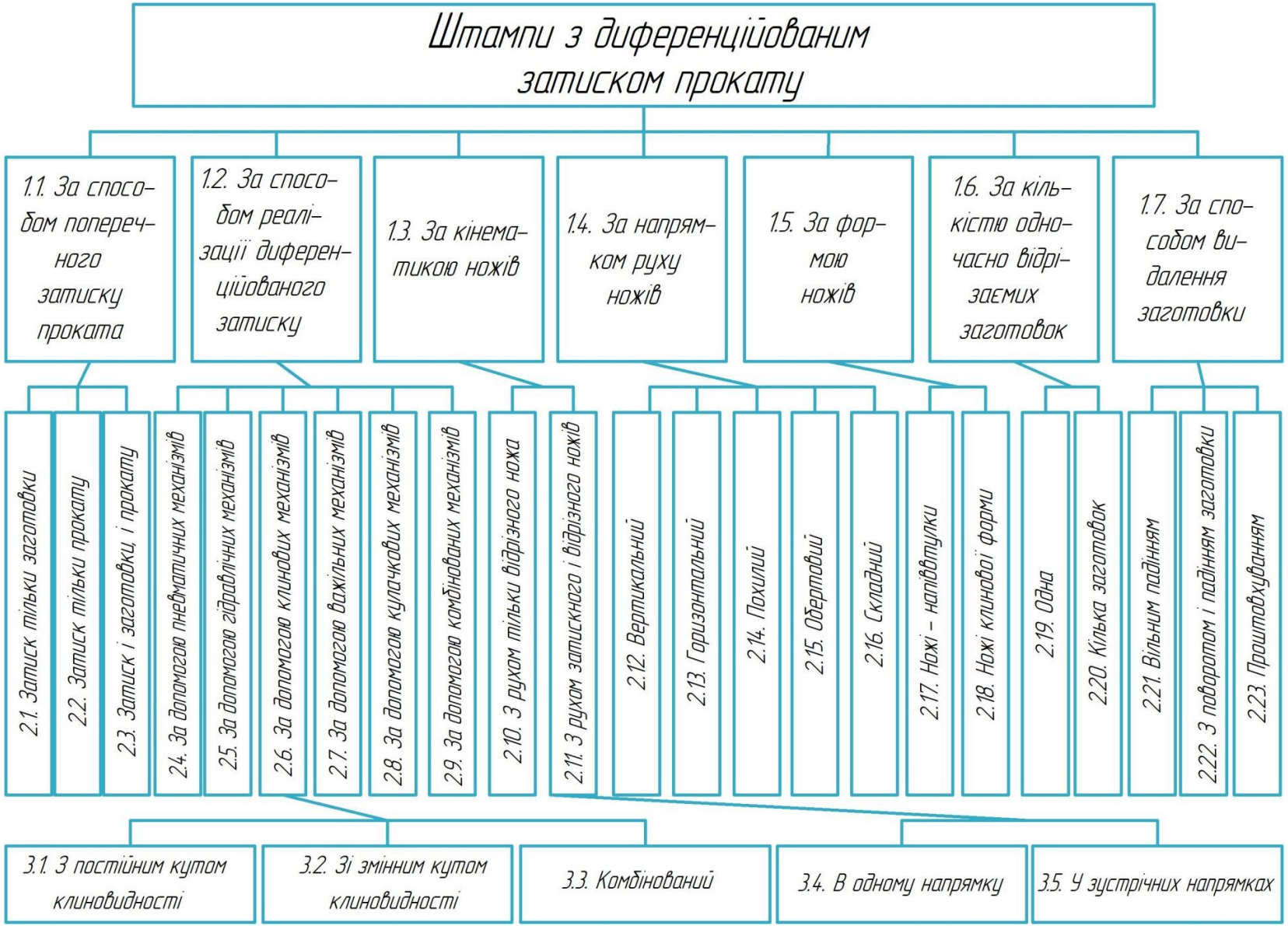



Рис. 7.1 – Класифікація конструкцій штампів з диференційованим затиском прокату

Найбільше поширення у вітчизняній і світовій практиці одержали штампи з диференційованим затиском прокату по обидві сторони від площини різу (2.3) [3, 352].

За конструктивним виконанням й технологічними можливостями вітчизняні й закордонні конструкції обладнання принципово мало відрізняються одні від одних. Дослідження та узагальнення досвіду експлуатації штампів з диференційованим затиском прокату показують, що необхідне співвідношення сили затиску до сили відрізки зсувом $F_з/F_р$ залежить від механічних властивостей матеріалу прокату й зростає зі зменшенням величини $(\sigma_в - \sigma_т)/\sigma_в$. Чим більше величина $F_з/F_р$, тим вище геометрична точність заготовок і менше ймовірність утворення торцевих тріщин. При $F_з/F_р > 1{,}5$ можна чекати високої геометричної точності заготовок із високоміцних спеціальних сталей і сплавів, як дрібних, так і великих перерізів, при відрізці зсувом у холодному стані [3].

За способом реалізації диференційованого затиску (1.2) активний поперечний затиск прокату в ножах силою, пропорційною силі відрізки забезпечується за допомогою пневматичних (2.4), гідравлічних (2.5), клинових (2.6), важільних (2.7), кулачкових (2.8) та комбінованих механізмів (2.9) – комбінації важелів, ексцентриків, клинів тощо.

Відомі відрізні штампи з диференційованим затиском прокату, у яких активний змінний поперечний затиск прокату й відрізка відбуваються за допомогою поворотних важелів (2.7), які несуть ножі. Співвідношенням плечей важелів можна зменшити потрібну силу преса. Штампи можуть різнитися способом передачі навантаження від повзуна преса поворотним важелям. Недоліками штампів з поворотними важелями є їхня невисока жорсткість, значні навантаження на осі обертання важелів і значні габаритні розміри. Рух ножів по дузі (2.15) у таких штампах вимагає ускладнення конструкцій пристроїв подачі прокату в робочу зону.

Більш перспективною є конструкція штампу, у якій реалізована комбінація клинових механізмів (2.6) з постійними (3.1) й змінними (3.2) кутами нахилу. Наприклад, на етапі затиску необхідно мати більший кут нахилу для зменшення ходу затиску. На етапі відрізки – менший кут для збільшення сил затиску й відрізки.

Крім того, у штампі необхідно передбачити можливість забезпечення зміни кута клина залежно від механічних властивостей матеріалу прокату. Однак штампи такої конструкції не знайшли застосування на виробництві через підвищену складність.

Конструкція відрізного штампу, у якому диференційований затиск здійснюється за допомогою клинових механізмів (2.6) має підвищену жорсткість і забезпечує менші габаритні розміри штампу у порівнянні з важільними (2.7) і комбінованими (2.9) механізмами.

За кінематикою ножів (1.3) в штампах можливий рух тільки відрізного ножа (2.10) або затискного і відрізного ножів (2.11).

За напрямком руху ножів (1.4) штампи з диференційованим затиском прокату можуть бути розділені на три групи: з поступальним вертикальним (2.12), горизонтальним (2.13), похилим (2.14) рухами ножів; обертовим (2.15) і складним (2.16) рухами ножів. Найбільше поширення одержали конструкції з поступальним переміщенням ножів. Штампи з обертовим рухом (2.15) ножів застосовуються рідко, а зі складним рухом (2.16) мають поки лише експериментальне виконання. Різноманітність відрізних штампів з поступальним переміщенням ножів в основному пов'язана із застосуванням різних механізмів затиску.

Штампи, у яких поперечний змінний затиск й відрізка прокату проводяться у вертикальному напрямку (2.12) мають переваги у порівнянні зі штампами, у яких ножі рухаються горизонтально (2.13). Оскільки, при цьому зменшуються втрати на контактне тертя, а також зменшується зношування контактних поверхонь робочих частин через високі питомі сили [353].

У штампах, в яких ножі рухаються в зустрічному напрямку (3.5), відбувається зсув осі прокату в процесі затиску й відрізки, що приводить до ускладнення конструкції пристрою, який подає прокат у штампову зону і в цілому негативно позначається на геометричній точності заготовок [3]. Тому кращим є рух ножів в одному напрямку (3.4).

За формою ножів (1.5) найбільш поширені штампи з формою ножів у вигляді півтулок (2.17). Хоча з точки зору забезпечення жорсткості штампу і виграшу у силі затиску і відрізки більш доцільним є застосування ножів-клинів (2.18).

За кількістю одночасно відрізаємих заготовок (1.6) у штампах можлива відрізка, як однієї (2.19), так і кількох заготовок (2.20). Крім того, можливе здійснення однострумкового різання прокату або одночасного розділення кількох штанг у широкому діапазоні змін поперечних перерізів вихідної заготовки.

За способом видалення заготовки (1.7) у штампах найбільш зручними є способи: вільним падінням (2.21) «на провал», проштовхуванням заготовки (2.23), враховуючи ширину відрізного ножа.

На основі аналізу розробленої класифікації конструкцій штампів з диференційованим затиском можна зробити висновки [354].

1. Найбільш перспективною є схема штампу з диференційованим затиском по обидві сторони від площини різання.

2. У конструкції штампу доцільне застосування клинових механізмів для затиску й відрізки прокату, як таких, що мають високу жорсткість.

3. Розділення сортового прокату в штампах доцільно робити у вертикальній площині для спрощення роботи допоміжних пристроїв.

4. Промисловість потребує розробки конкретних рекомендацій для впровадження процесу відрізки сортового прокату з диференційованим затиском і уточнення вихідних даних для вдосконалювання оснащення й устаткування.

З урахуванням зроблених висновків, на кафедрі основ проектування машин ДДМА розроблені, досліджені й впроваджені у виробництво різні конструкції штампів з диференційованим затиском для відрізки прокату діаметром до 50 мм [355, 356].

## 7.2 Аналіз базової конструкції штампу з диференційованим затиском прокату

Розглянемо базову конструкцію запропонованого штампу, яка представлена на рис. 7.2 [357].

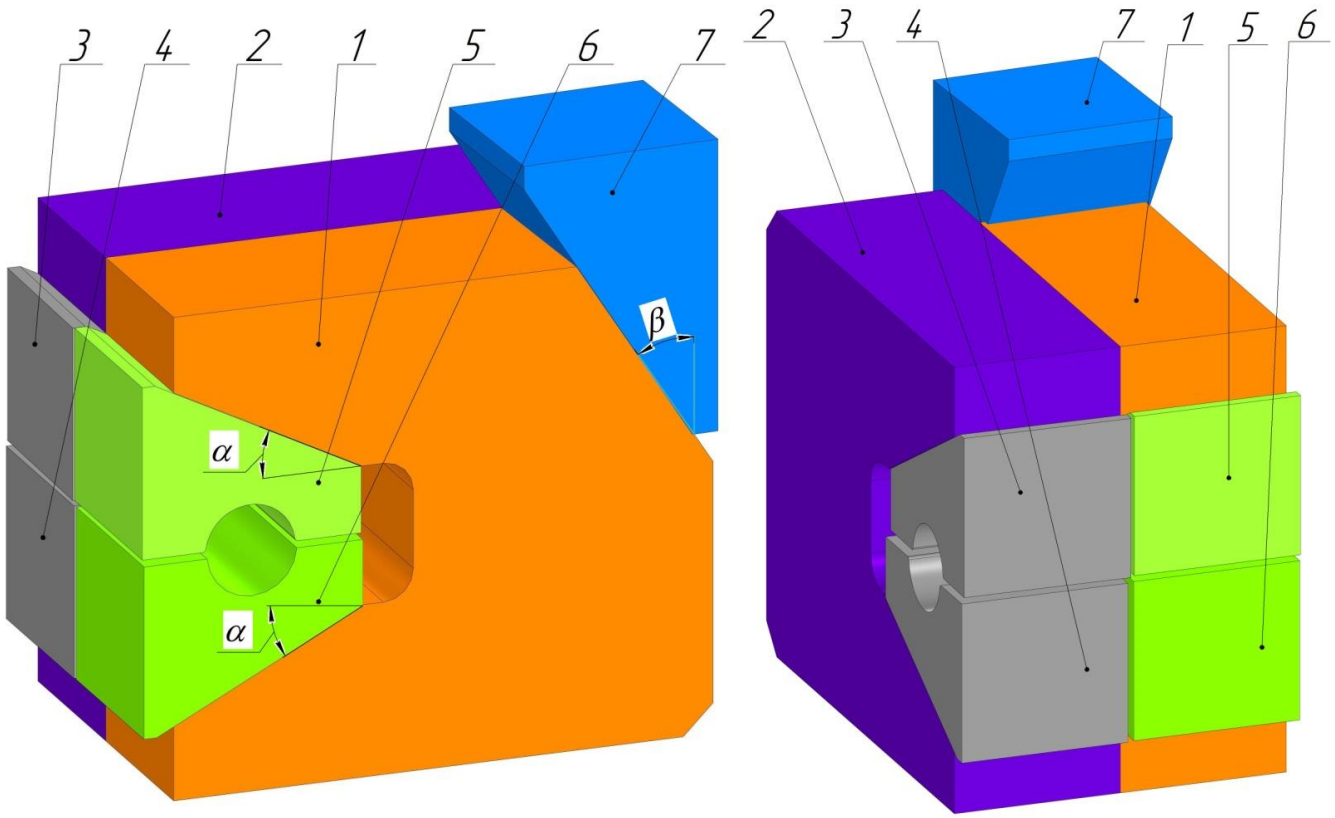



Рис. 7.2 – Базова конструкція штампу ДДМА з диференційованим затиском прокату

Основними деталями штампу (див. рис. 7.2) є: ведуча 1 і ведена 2 повзушки з приводом від натискного клина 7 та з комплектами роз’ємних затискних 3, 4 і відрізних 5, 6 ножових вкладишів. Ведуча повзушка 1 взаємодіє по клиновій поверхні з натискним клином 7 і підпружинена за допомогою буфера, а ведена 2 установлена в корпусі в напрямних, які забезпечують її переміщення тільки у горизонтальному напрямку. При цьому повзушки 1, 2 зв'язані між собою механічним зв’язком, який забезпечує спільне горизонтальне переміщення повзушок 1, 2 у напрямку ножових вкладишів 3, 4, 5, 6 і вертикальне переміщення ведучої повзушки 1 відносно веденої 2. Із зростанням сили з боку привода, збільшується сила поперечного затиску прокату. Коли вертикальна складова сили на клині 7 перевищить силу попереднього стискання буфера, ведуча повзушка 1 починає рухатися вертикально, здійснюючи остаточну відрізку заготовки.

Конструкції штампів відрізняються: способом передачі руху від ведучої повзушки до веденої (ознака 1, рис. 7.3); формою силових деталей та корпусу штампу (ознака 2, рис. 7.4); способом регулювання осьового зазору між ножовими вкладишами та компенсації переточки ножів, компенсації похибок виготовлення деталей штампу (ознака 3, рис. 7.5); конструкцією буфера; конструкцією переднього упору.

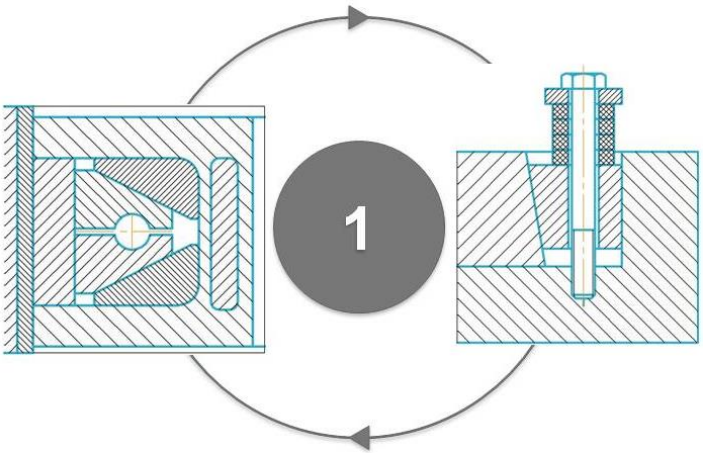



Рис. 7.3 – Конструктивні рішення за ознакою 1

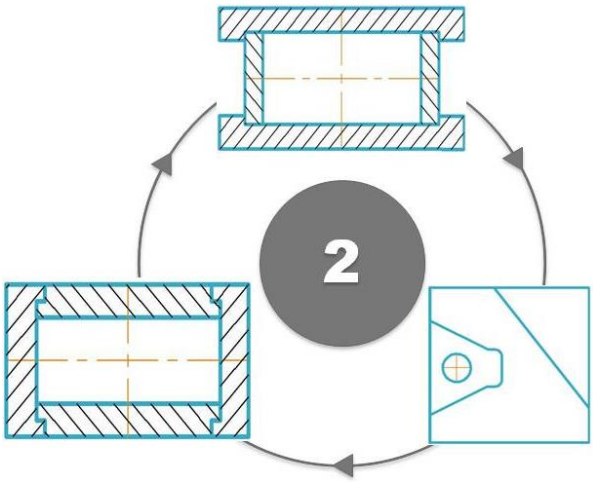



Рис. 7.4 – Конструктивні рішення за ознакою 2

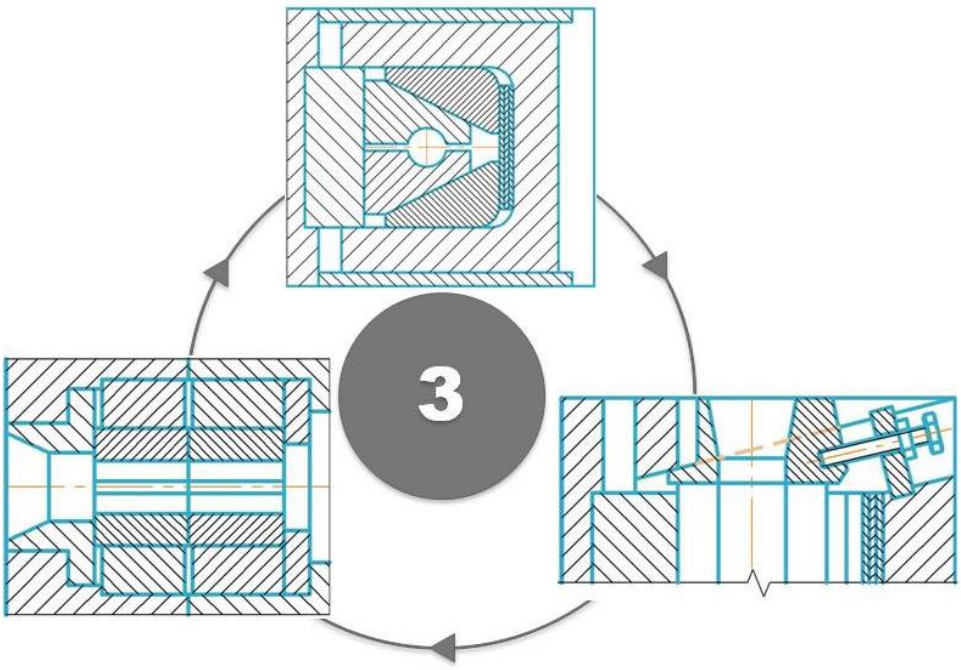



Рис. 7.5 – Конструктивні рішення за ознакою 3

Механічний зв’язок ведучої 1 і веденої 2 повзушок може здійснюватися як за допомогою шпонки, так і клина (див. рис. 7.3). Виконання корпуса штампу у вигляді двох опорних і двох поперечних плит (див. рис. 7.4), з'єднаних за допомогою шпильок таким чином, що поперечні плити установлені по краях у прямокутних глухих вибірках опорних плит, дозволяє значно підвищити жорсткість штампу й компенсувати виникаючі при відрізці прокату розпірні сили й крутні моменти. Виконання повзушок у вигляді прямокутних плит замкненої форми із глухою вибіркою під ножові вкладиші, забезпечує високу жорсткість і міцність повзушок в умовах дії циклічних напружень. Тим самим підвищується геометрична точність розділюваних заготовок і надійність роботи штампу в цілому.

Розташування ножових вкладишів між клином і засувкою забезпечує можливість переточування й заміни ножів без розбирання штампу (див. рис. 7.5). Компенсація похибок виготовлення деталей штампу здійснюється за допомогою прокладок.

За своїми техніко-економічними показниками запропоновані штампи з диференційованим затиском прокату відповідають сучасним зразкам аналогічного штампового оснащення.

Розділення у вертикальній площині забезпечує незмінне положення осі прокату. Виключається передача сили на затиск через прокат. Величина сили затиску прокату регулюється за рахунок зміни сили попередньої затяжки буфера.

У порівнянні з відомими конструкціями, у запропонованому штампі поперечні розміри й маса знижуються в середньому на 25 %, а висота – на 10 %.

Одна із конструкцій штампу з диференційованим затиском прокату представлена на рис. 7.6.

Фотографії різних конструкцій штампів, розроблених і впроваджених ДДМА, представлені на рис. 7.7.

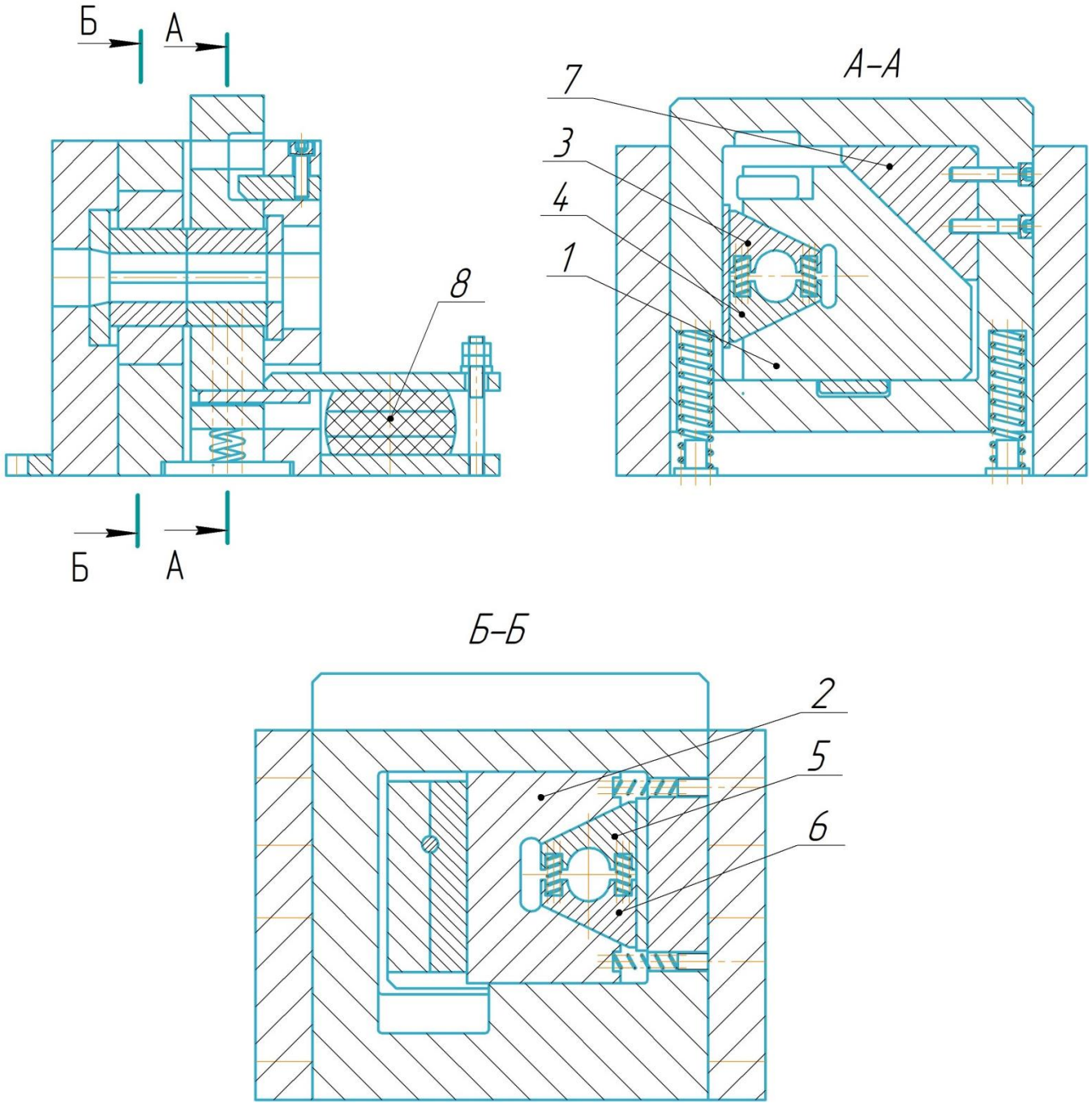
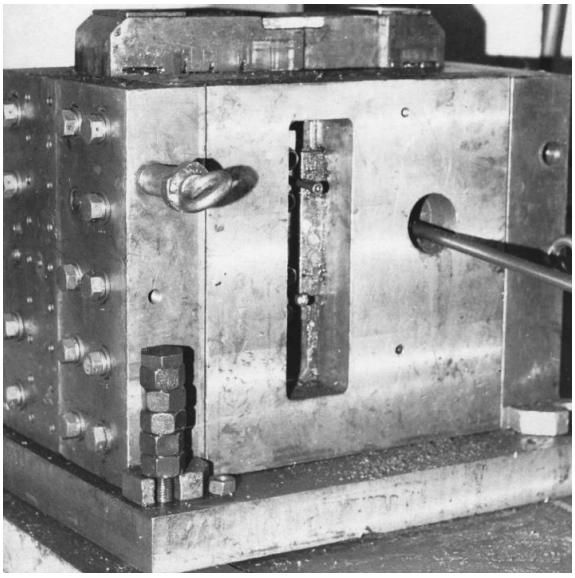
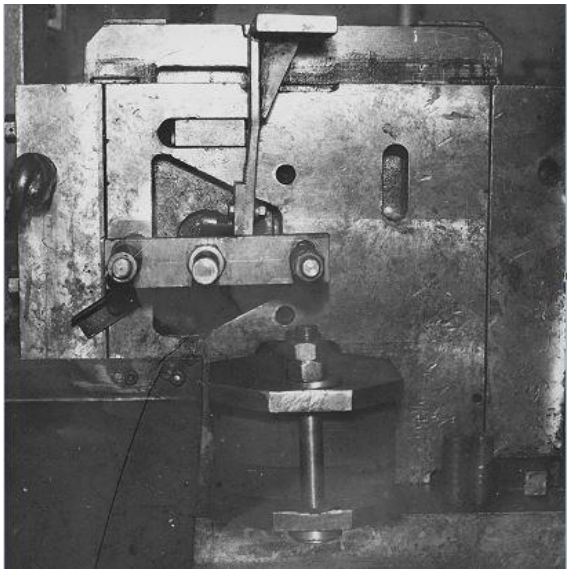
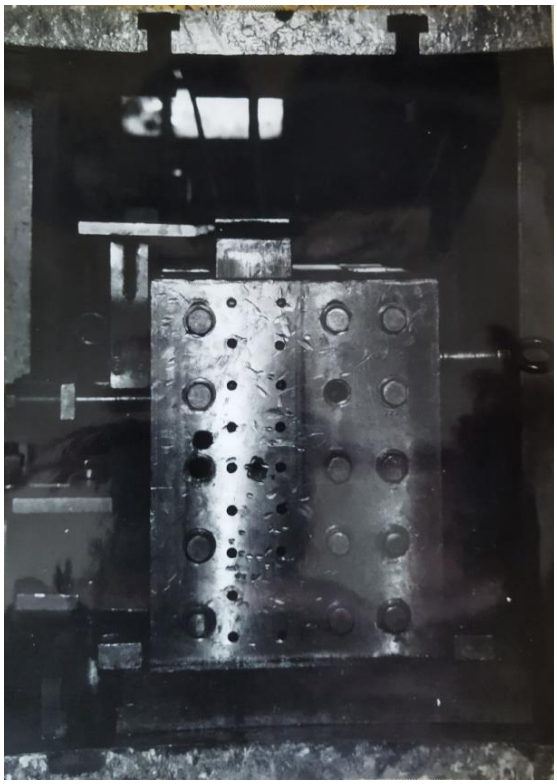



Рис. 7.6 – Конструкція штампу з диференційованим затиском прокату діаметром до 50 мм (конструкції ДДМА)







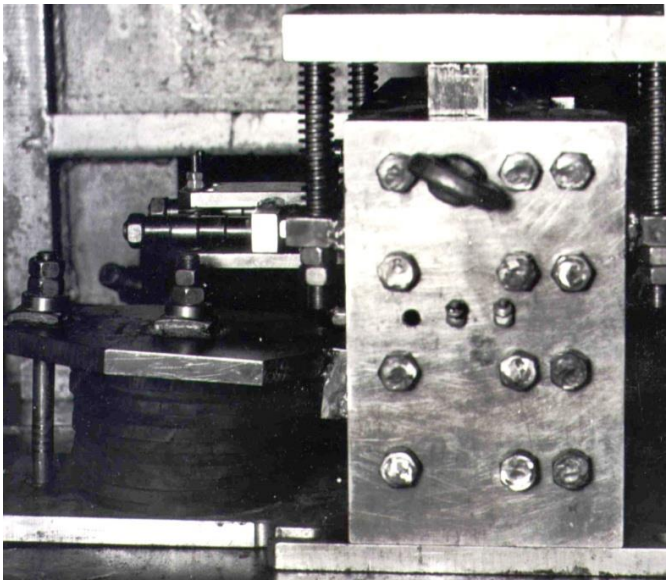


Рис. 7.7 – Фотографії штампів з диференційованим затиском прокату різних конструкцій діаметром до 50 мм (конструкції ДДМА)

## 7.3 Теоретичні дослідження штампу з диференційованим затиском прокату конструкції ДДМА

У роботі [354] проведено силовий аналіз конструкції штампу з диференційованим затиском прокату запропонованої конструкції. Аналіз показав, що основними параметрами, які визначають ефективність застосування штампу, є величини кутів $\alpha$, $\beta$ (див. рис. 7.2). В дисертаційній роботі додатково досліджено вплив величин кутів $\alpha$, $\beta$ та коефіцієнтів тертя контактних поверхонь на енергосилові параметри процесу розділення.

Розглянемо передачу руху від натискного клина 7 до ведучої повзушки 1 (див. рис. 7.2) та величину кута $\beta$. Схема навантаження представлена на рис. 7.8.

Із умови рівноваги клина 7 маємо:

$$\begin{gathered} \Sigma F_x = 0;\ N_{17} \cdot cos\beta - F_{m17} \cdot sin\beta - N_{07} = 0; \\ \Sigma F_y = 0;\ N_{17} \cdot sin\beta + F_{m17} \cdot cos\beta + F_{m07} - F_{\text{р}} = 0, \end{gathered} \tag{7.1}$$

де $N_{17}$ – нормальна реакція повзушки 1 на клин 7;

$F_{m17}$ – сила тертя у кінематичній парі «повзушка 1 – клин 7»;

$N_{07}$ – нормальна реакція стійки 0 на клин 7;

$F_{m07}$ – сила тертя у кінематичній парі «клин 7 – стійка 0».

Із урахуванням того, що $F_i = f_i \cdot N_i$ рівняння (7.1) можна записати у вигляді:

$$\begin{gathered} N_{07} = N_{17} \cdot cos\beta - f_{17} \cdot N_{17} \cdot sin\beta; \\ N_{17} \cdot sin\beta + f_{17} \cdot N_{17} \cdot cos\beta - f_{07} \cdot N_{07} - F_{\text{р}} = 0, \end{gathered} \tag{7.2}$$

де $f_{17}$ – коефіцієнт тертя в кінематичній парі «повзушка 1 – клин 7»;

$f_{07}$ – коефіцієнт тертя в кінематичній парі «клин 7 – стійка 0».

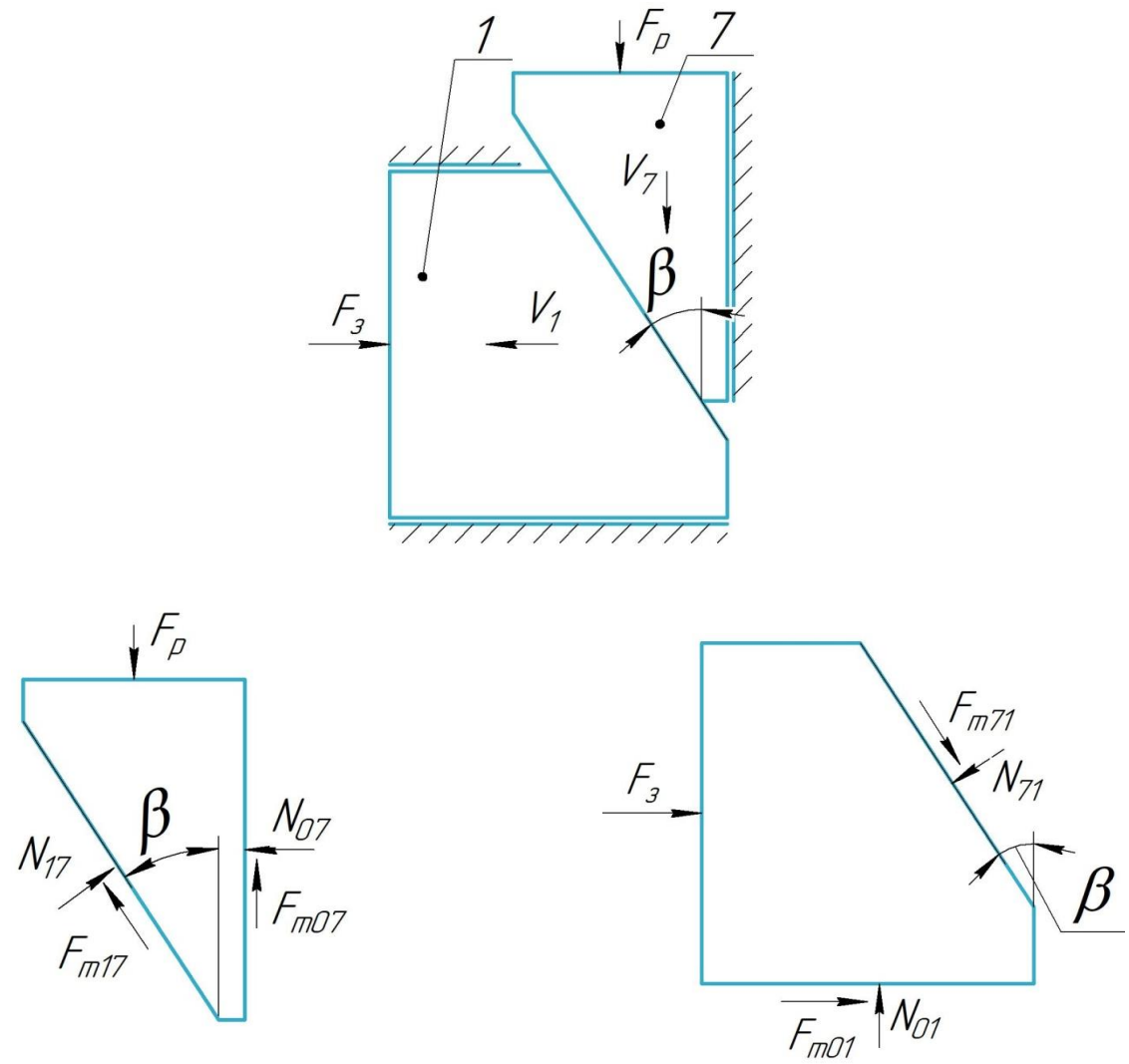



Рис. 7.8 – Розрахункова схема передачі сили на затиск і відрізку від клина 7 до повзушки 1

Із рівняння (7.2):

$$N_{17} = F_{\text{р}}/\big((1 - f_{07} \cdot f_{17}) \cdot sin\beta + (f_{17} + f_{07}) \cdot cos\beta\big). \qquad (7.3)$$

Із умови рівноваги повзушки 1 маємо:

$$\Sigma F_x = 0;\ F_{\text{з}} + F_{m01} + F_{71} \cdot sin\beta - N_{71} \cdot cos\beta = 0;$$
$$\Sigma F_y = 0;\ N_{01} - F_{71} \cdot cos\beta - N_{71} \cdot sin\beta = 0. \qquad (7.4)$$

Звідки:

$$F_з + f_{01} \cdot N_{01} + f_{71} \cdot N_{71} \cdot sin\beta - N_{71} \cdot cos\beta = 0;$$
$$N_{01} - f_{71} \cdot N_{71} \cdot cos\beta - N_{71} \cdot sin\beta = 0, \quad (7.5)$$

де $N_{71}$ – нормальна реакція клина 7 на повзушку 1;

$F_{m71}$ – сила тертя у кінематичній парі «клин 7 – повзушка 1»;

$N_{01}$ – нормальна реакція стійки 0 на повзушку 1;

$F_{m01}$ – сила тертя у кінематичній парі «стійка 0 – повзушка 1»;

$f_{01}$ – коефіцієнт тертя у кінематичній парі «стійка 0 – повзушка 1»;

$f_{71}$ – коефіцієнт тертя в кінематичній парі «клин 7 – повзушка 1»;

Звідки:

$$N_{71} = F_з/\big((f_{01} \cdot f_{71} - 1) \cdot cos\beta + (f_{01} + f_{71}) \cdot sin\beta\big). \quad (7.6)$$

Якщо прирівняти рівняння (7.3), (7.6) та з урахуванням того, що $N_{71} = N_{17}$, $f_{71} = f_{17}$ знайдемо відношення $F_з/F_p$:

$$F_р/\big((1 - f_{07} \cdot f_{17}) \cdot sin\beta + (f_{17} + f_{07}) \cdot cos\beta\big) =$$
$$= F_з/\big((f_{01} \cdot f_{71} - 1) \cdot cos\beta + (f_{01} + f_{71}) \cdot sin\beta\big); \quad (7.7)$$
$$F_з/F_p = (1 - f_{07} \cdot f_{17} - (f_{01} + f_{71}) \cdot tg\beta)/\big((1 - f_{07} \cdot f_{17}) \cdot tg\beta + f_{07} + f_{17}\big). \quad (7.8)$$

На рис. 7.9 представлені графіки зміни відношення сил $F_з/F_p$ у залежності від кута $\beta$ при різних умовах тертя на контактних поверхнях. Значення коефіцієнтів тертя вибирали із експериментальних даних, отриманих у процесі експлуатації штампів з диференційованим затиском прокату (конструкції ДДМА). При використанні пластичного мастила «Літол – 24» приймали: $f_{71} = 0{,}15$; $f_{07} = 0{,}15$; $f_{01}$=0,1. При використанні дисульфіду молібдену, який втирали у контактні поверхні: $f_{71} = 0{,}05$; $f_{07} = 0{,}15$; $f_{01}$=0,1.

Матеріал контактних поверхонь «сталь – сталь».

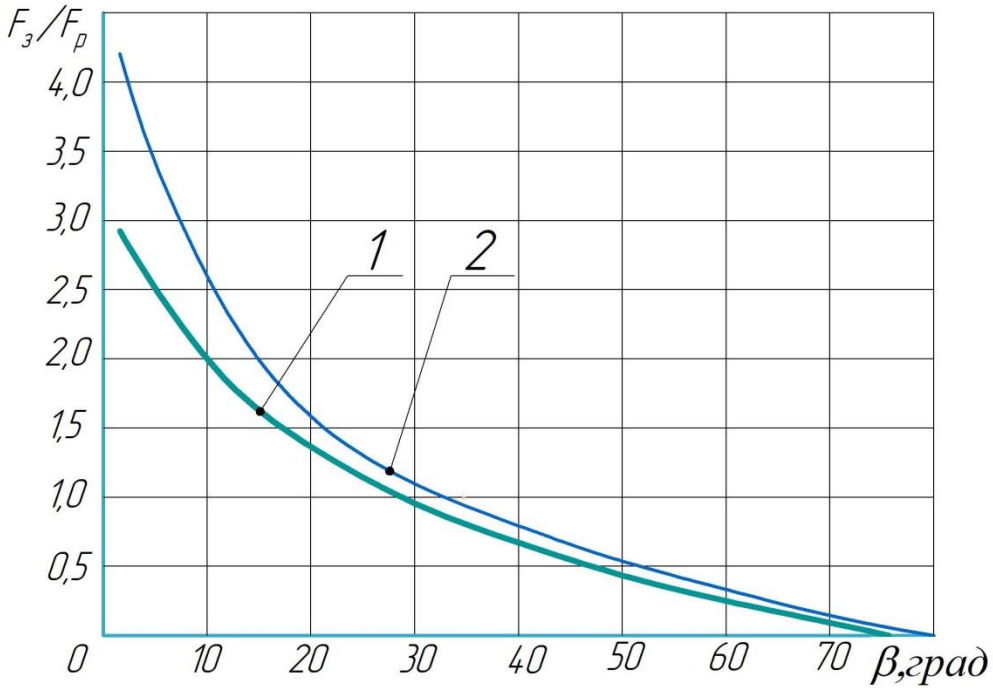



Рис. 7.9 – Графіки зміни відношення сил $F_з/F_p$ у залежності від кута $\beta$: 1 – при $f_{71} = 0{,}15$; $f_{07} = 0{,}15$; $f_{01}$=0,1; 2 – при $f_{71} = 0{,}05$; $f_{07} = 0{,}15$; $f_{01}$=0,1

Якщо розрахувати потужність рухомих сил як: $F_р \cdot V_7$ та $F_з \cdot V_1$, то коефіцієнт корисної дії (ККД) клинового механізму «клин 7 – повзушка 1» визначимо як:

$$\eta_{71} = F_з \cdot V_1/F_p \cdot V_7. \tag{7.9}$$

Зважаючи на те, що $V_1/V_7 = tg\beta$ маємо:

$$\eta_{71} = F_з/F_p \cdot tg\beta. \tag{7.10}$$

$$\eta_{71} = (1 - f_{07} \cdot f_{17} - (f_{01} + f_{71}) \cdot tg\beta)/\big((1 - f_{07} \cdot f_{17}) \cdot tg\beta + f_{07} + f_{17}\big) \cdot tg\beta. \tag{7.11}$$

На рис. 7.10 представлені графіки ККД у залежності від кута $\beta$ при різних умовах тертя.

Аналіз графіків 1, 2 (див. рис. 7.9, 7.10) доводить, що відношення сил затиску і відрізки прокату суттєво залежить від сил тертя на контактних поверхнях.

Поліпшення умов змащування на контактних поверхнях дозволить зменшити потрібну силу відрізки та підвищити ККД штампу.

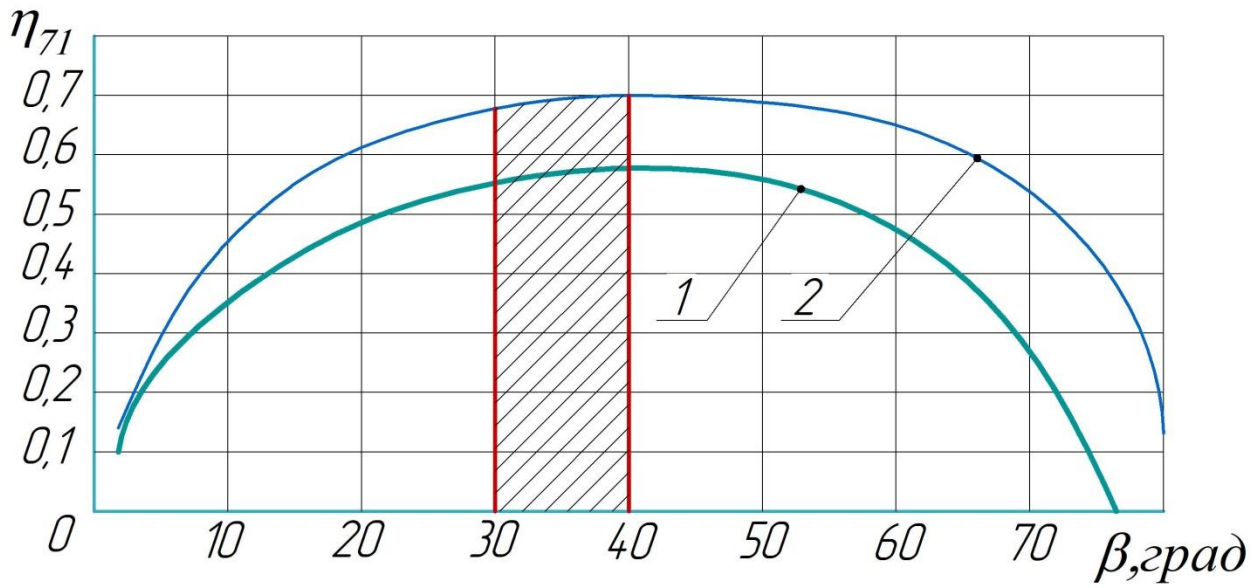



Рис. 7.10 – Графіки залежності ККД від кута $\beta$: 1 – при $f_{71} = 0{,}15$; $f_{07} = 0{,}15$; $f_{01}$=0,1; 2 – при $f_{71} = 0{,}05$; $f_{07} = 0{,}15$; $f_{01}$=0,1

На підставі виконаних розрахунків можна дати рекомендації по вибору значень кутів $\alpha$ і $\beta$. Для практичного використання рекомендується вибирати кут $\beta$ у діапазоні $(30 \ldots 40)^{\circ}$. Це раціональний діапазон кута для передачі зусилля, при якому забезпечується високий ККД, а відношення $F_з/F_p$ наближається до 1.

Отримані результати можуть бути застосовані і для аналізу передачі руху від ведучої 1 та веденої 2 повзушок до ножових вкладишів 3, 4, 5, 6 (див. рис. 7.2). Рекомендується вибирати значення кута $\alpha$ у діапазоні $(27 \ldots 30)^{\circ}$. При цьому відношення сил затиску і відрізки прокату $F_з/F_p$ знаходиться у діапазоні (1,4…2,0), що відповідає рекомендаціям до процесів розділення з використанням штампів з диференційованим затиском прокату [3]. За рахунок вибору раціональних значень кутів клинових механізмів штампу та регулювання сили попереднього затиску буфера відношення сил затиску і відрізки прокату $F_з/F_p$ можна змінювати з урахуванням механічних властивостей матеріалу.

При цьому необхідно забезпечити виконання умови $\beta > \alpha$, яка є умовою працездатності штампу.

Для дослідження базової конструкції штампу ДДМА проведено моделювання відрізки заготовок зсувом за допомогою програмного комплексу Deform. Матеріал заготовки Ст. 0. Розміри заготовки: діаметр 28 мм, довжина 76 мм.

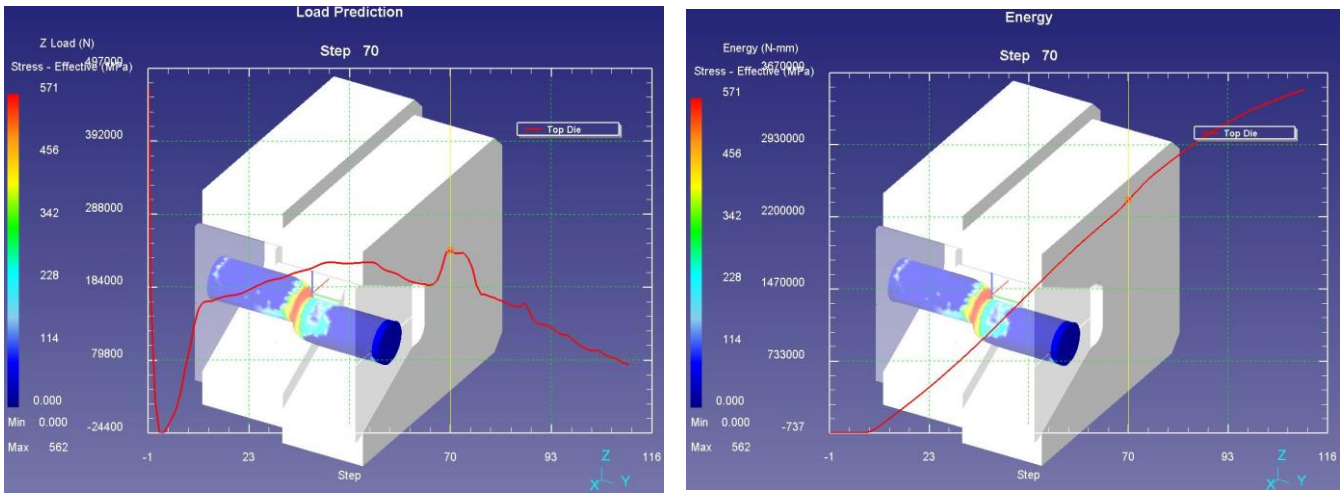
Параметри процесу моделювання представлені у табл. 7.1.

На першому етапі моделювали затиск прокату у парах затискних ножових вкладишів 3, 4 та відрізних 5, 6. На другому етапі – остаточну відрізку. Переміщення ведучої 1 і веденої 2 повзушок, ножових вкладишів 3, 4, 5, 6 задавали з використанням залежностей, отриманих в роботі [354] та при значеннях: $\alpha = 27^{\circ}; \beta = 33^{\circ}$.

Таблиця 7.1 – Параметри процесу моделювання

| Назва параметру | Значення параметру |
|---|---|
| 1 Властивість матеріалу зразка | «пластичний» |
| 2 Температура | 20°С |
| 3 Кількість елементів розбиття | 40000 |
| 4 Компенсація витрат об’єму, мм$^3$ | 84557,6 |
| 5 Параметри розрахунку: | аналіз Лагранжа |
| ○ кількість кроків розрахунку | 100 |
| ○ приріст кроків, мм/крок | 0,2 |
| ○ хід ножа, мм | 20 |
| 6 Рух ножа | переміщення прямолінійне |
| ○ швидкість, мм/с | 1,0 |

Результати моделювання представлені на рис. 7.11.




а б

Рис. 7.11 – Залежності сили (а) і роботи (б) відрізки від кроку

### 7.4 Експериментальні дослідження штампу з диференційованим затиском прокату (конструкції ДДМА)

Для підтвердження результатів теоретичних розрахунків проведено експериментальні дослідження по відрізці прокату у штампі запропонованої конструкції. Для цього використовувався кривошипний прес зусиллям 2,5 МН мод. ДС 250/800 «Пельс» (рис. 7.12).

Тензодатчики клеїли на мездозу, яку розміщували між верхньою плитою штампу та повзуном преса і підключали за мостовою схемою до ПЕОМ за допомогою універсального багатоканального пристрою Е – 440. Масив отриманих цифрових даних оброблявся за допомогою спеціально розробленого програмного забезпечення. При проведенні експерименту використовувалися два паралельні канали для реєстрування сили деформування і переміщення інструменту (сигнал знімали з ходографа) з метою побудови залежності «сила $F$ – переміщення $H$ інструмента».

Експериментальні зразки виготовляли із сортового прокату із матеріалів Ст. 0, Сталь 40Х і розділяли способом відрізки зсувом на заготовки з розмірами: діаметр 28 мм, довжини (20, 34, 76) мм. Вибір матеріалу зразків із сталі Ст. 0 зроблений свідомо, оскільки отримання геометрично точних заготовок із сталей, що відносяться до класу «пластичних» і особливо сталі Ст. 0, неможливе при

застосуванні більш простих схем відрізки зсувом. Саме штампи з диференційованим затиском прокату і можуть вирішити це завдання. Тому вимір енергосилових параметрів при розділенні проводився саме для цієї марки сталі.

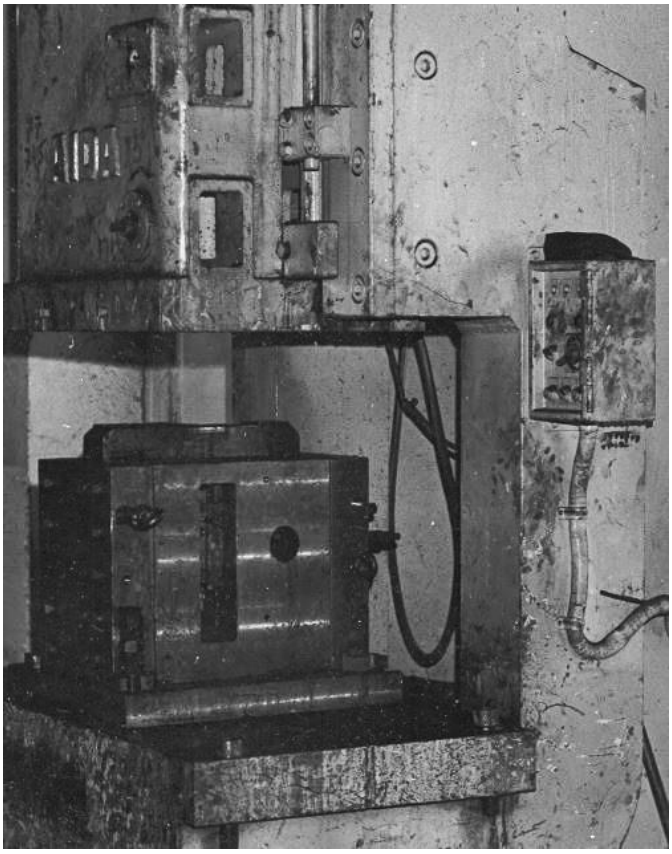


Рис. 7.12 – Фотографія кривошипного пресу зусиллям 2,5 МН мод. ДС 250/ 800 «Пельс» і штампу із диференційованим затиском прокату конструкції ДДМА

Для змащування контактних поверхонь використовували мастила: «Літол – 24» та дисульфід молібдену. Залежності сили відрізки від ходу повзуна $F = f(H)$, отримані для різних умов змащення контактних поверхонь штампу, представлені на рис. 7.13 [356].

Аналіз графіків $F = f(H)$ (див. рис. 7.13) показує, що експериментально визначене максимальне значення сили відрізки перевищує теоретичні результати на величину до 8%. Це пов’язано зі складністю врахування умов тертя на контактних поверхнях штампу, похибками виготовлення і монтажу.

Приймальні результати випробувань показали, що штампи нової конструкції працездатні й надійні в експлуатації.

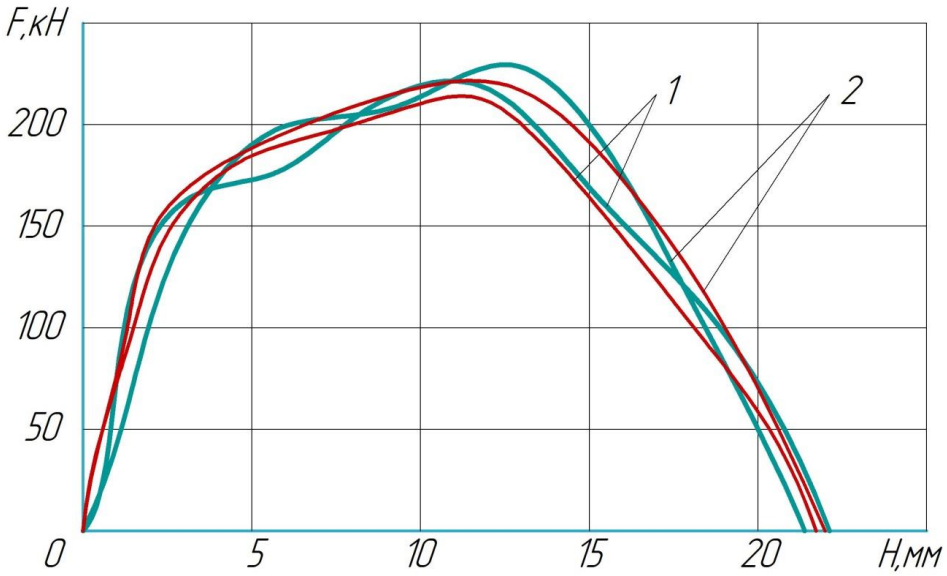



Рис. 7.13 – Залежності сили відрізки від ходу повзуна $F = f(H)$ при розділенні прокату із сталі Ст. 0 в штампі з диференційованим затиском прокату конструкції ДДМА [354]: 1 – розрахунок; 2 – експеримент; ——— – мастило «Літол – 24» $f_{71} = 0{,}15$; ——— – дисульфід молібдену $f_{71} = 0{,}05$

Фотографії відрізаних заготовок представлені на рис. 7.14.



а б

Рис. 7.14 – Фотографії відрізаних зразків із сталей: Ст. 0 (а), Сталь 40Х (б)

Для контролю поверхневих дефектів торцевих поверхонь відрізаних заготовок застосовували методи магнітно-порошкової та фарбо-капілярної дефектоскопії

(ДСТУ EN 10228-2:2001). Результатами вимірювань, які представлені протоколами контролю поверхневих дефектів (Додаток Б), встановлено відсутність релевантних індикацій (торцевих тріщин). Фотографії торців зразків, отриманих у процесі контролю поверхневих дефектів, представлені на рис. 7.15.



а б

Рис. 7.15 – Фотографії торців зразків із сталей: Ст. 0, Сталь 40Х, зроблені за результатами магнітно-порошкової (а) та фарбо-капілярної дефектоскопій (б)

Результати вимірів відносних середніх величин викривлень геометричної форми заготовок із сталей Ст. 0, Сталь 40Х, отриманих відрізкою зсувом у штампі нової конструкції та на сортових ножицях серії Н 18 (вимірювання проведено за схемою (рис. 1.1)), представлені в табл. 7.2.

Аналіз отриманих результатів вимірів (див. табл. 7.2) показує, що показники геометричної точності заготовок, відрізаних у штампах ДДМА, перевищують показники, отримані із використанням аналогічного сучасного обладнання.

Таблиця 7.2 – Параметри геометричної точності відрізаних заготовок (див. рис. 1.1)

| Обладнання та оснастка для відрізки зсувом | Матеріал заготовки | $l$, мм | $\varphi°$ | | $u = U/d$ | | $s = S/d$ | | $m = M/d$ | | $b = B/d$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $\varphi_{п}$ | $\varphi_{з}$ | $u_{п}$ | $u_{з}$ | $s_{п}$ | $s_{з}$ | $m_{п}$ | $m_{з}$ | $b_{п}$ | $b_{з}$ |
| Штампи з диференційованим затиском (конструкції ДДМА) | Ст. 0 | 76(2,7 $d$ ) | 0,50 | 0,60 | 0,30 | 0,40 | 0,10 | 0,15 | 0,07 | 0,08 | 0 | 0 |
| | | 34(1,2 $d$ ) | 0,70 | 0.90 | 0,40 | 0,50 | 0,20 | 0,25 | 0,09 | 0,10 | 0,05 | 0,07 |
| | | 20(0,7 $d$ ) | 1,00 | 1,30 | 0,50 | 0,60 | 0,25 | 0,30 | 0,10 | 0,11 | 0,07 | 0,10 |
| | Сталь 40Х | 76(2,7 $d$ ) | 0,50 | 0,55 | 0,35 | 0,35 | 0,10 | 0,15 | 0,04 | 0,05 | 0 | 0 |
| | | 34(1,2 $d$ ) | 0,60 | 0,70 | 0,40 | 0,45 | 0,12 | 0,15 | 0,06 | 0,07 | 0,04 | 0,06 |
| | | 20(0,7 $d$ ) | 1,00 | 1,35 | 0,30 | 0,40 | 0,15 | 0,20 | 0,09 | 0,10 | 0,05 | 0,08 |
| Сортові ножиці серії Н18 | Сталь 15 | 56(2 $d$ ) | 1,20 | 1,30 | 0,50 | 0,60 | 0,20 | 0,30 | 0,10 | 0,15 | 0,10 | 0,10 |
| | Сталь 40Х | 56(2 $d$ ) | 0,60 | 0,65 | 0,40 | 0,50 | 0,15 | 0,20 | 0,08 | 0,09 | 0 | 0 |

На основі теоретичного аналізу, проведених експериментальних досліджень і досвіду експлуатації штампів з диференційованим затиском прокату, були перевірені відомі й сформульовані нові рекомендації до проектування подібних штампів [353].

1. Штампи для відрізки зсувом з диференційованим затиском прокату можна застосовувати для розділення сортового прокату із мало –, середньовуглецевих і легованих сталей. Найбільш ефективним буде застосування штампів для розділення матеріалів, які можуть знаходиться у «пластичному» стані, що відповідає значенням: «критерія розповсюдження тріщин» до $0{,}7 \cdot 10^5 (\text{МДж/м}^3)^2$, «критерія крихкості» до $0{,}15 \cdot 10^8 (\text{МДж/м}^3)^3$ і величинам граничних деформацій – $\varepsilon_1^{lim} > 0{,}48$, $\varepsilon_2^{lim} > 0{,}32$. Середньовуглецеві та леговані сталі можуть бути розділені у штампах більш простих конструкцій.

2. Легке введення прокату у ножі, з урахуванням відхилення розмірів перерізу, кривизни, іржи, може бути забезпечено за рахунок того, що ножі виконані роз'ємними з підпружиненням.

3. Для відрізки прокату потрібного типорозміру необхідно забезпечити просту та швидку переналадку штампу з метою заміни ножів, змінних деталей і регулювання осьового зазору.

4. Необхідно забезпечити взаємозамінність ножів з можливістю переточки та просте регулювання положення ножів після переточки.

5. Забезпечити зносостійкість контактних поверхонь рухомих деталей, що знаходяться під навантаженням, за рахунок застосування матеріалів антифрикційних пар, термообробки та примусового рясного змащення.

6. Штампи повинні мати високу жорсткість. Жорсткість штампів бажано забезпечити за рахунок застосування клинових механізмів, що виключає пружні деформації, крутні моменти. Це дозволить виключити порушення співвісності ножів, порушення величин осьового і поперечного зазорів. Підвищення жорсткості штампу впливає на геометричну точність таким же чином, як і зменшення осьового зазору штампу.

7. Кути передачі зусилля на затиск і відрізку слід вибирати в діапазоні: $\alpha = (27 \dots 30)^{\circ}$; $\beta = (30 \dots 40)^{\circ}$. При цьому необхідно забезпечити виконання умови $\beta > \alpha$, яка є умовою працездатності штампу.

8. Для виключення відскоку прокату від переднього упора при подачі, упор треба конструювати таким, щоб він гасив цю енергію пружного відскоку. При цьому треба забезпечити міцність і жорсткість упору в умовах ударного навантаження.

9. Необхідно забезпечити достатню площу контактних поверхонь затискних і відрізних ножових вкладишів для надійного поперечного затиску прокату без зминання.

10. Штамп повинен бути придатним до використання на універсальному пресовому обладнанні.

11. Штамп повинен забезпечувати надійне видалення відрізаної заготовки.

## 7.5 Класифікація передніх упорів до штампів з диференційованим затиском прокату

Економічність експлуатації штампу суттєво залежить від механізації допоміжних операцій, зокрема від конструкції упору. Надійне й швидке видалення відрізаних заготовок із штампу має важливе значення для забезпечення стабільної безвідмовної його роботи [3].

Для аналізу конструктивних варіантів передніх упорів до штампів з диференційним затиском прокату, розроблено відповідну класифікацію (рис. 7.16).

Конструкції штампів з диференційованим затиском прокату (конструкції ДДМА) характеризуються тим, що відрізана заготовка глибоко розміщується у тілі штампу. Тому робота переднього упору ускладнена і потребує нових конструктивних рішень.

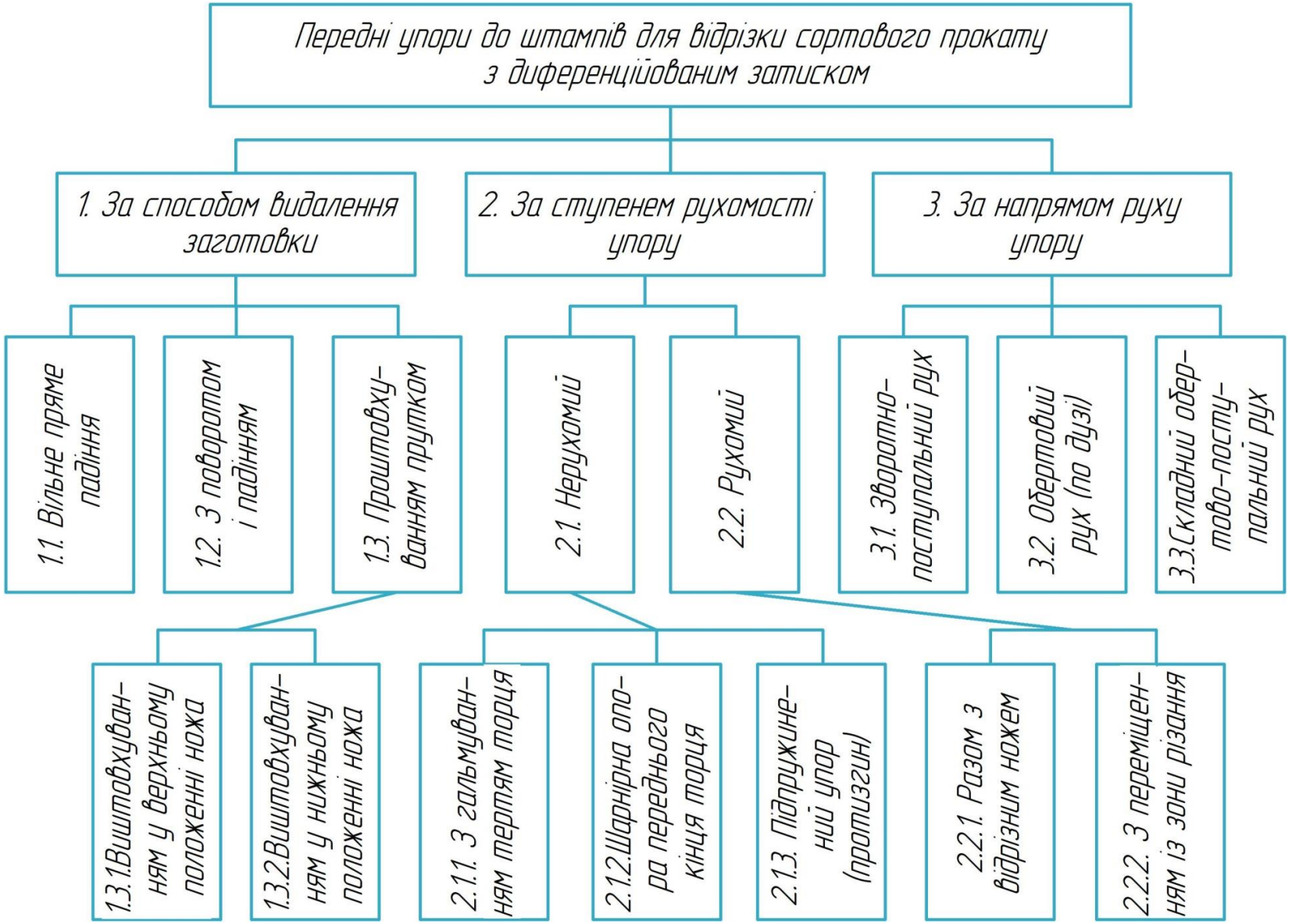



Рис. 7.16 – Класифікація конструктивних варіантів передніх упорів до штампів з диференційованим затиском прокату

Для видалення заготовки з відрізних штампів (1) використовують такі способи: вільне пряме падіння (1.1) під дією сили ваги; з поворотом і падінням (1.2); проштовхування прутком (1.3) під дією прикладеного активного зусилля. Вільне пряме падіння (1.1) заготовки в штампах з диференційованим затиском прокату можливо реалізувати тільки для відрізки довгих заготовок довжиною не менше сумарної товщини стінки корпусу та відрізного ножа. Або в такій конструкції штампу, яка має відкритий рухомий відрізний ніж-піввтулку, що звужує технологічні можливості обладнання, в якому можливо реалізувати диференційований затиск тільки прутка (по один бік від площини розділення).

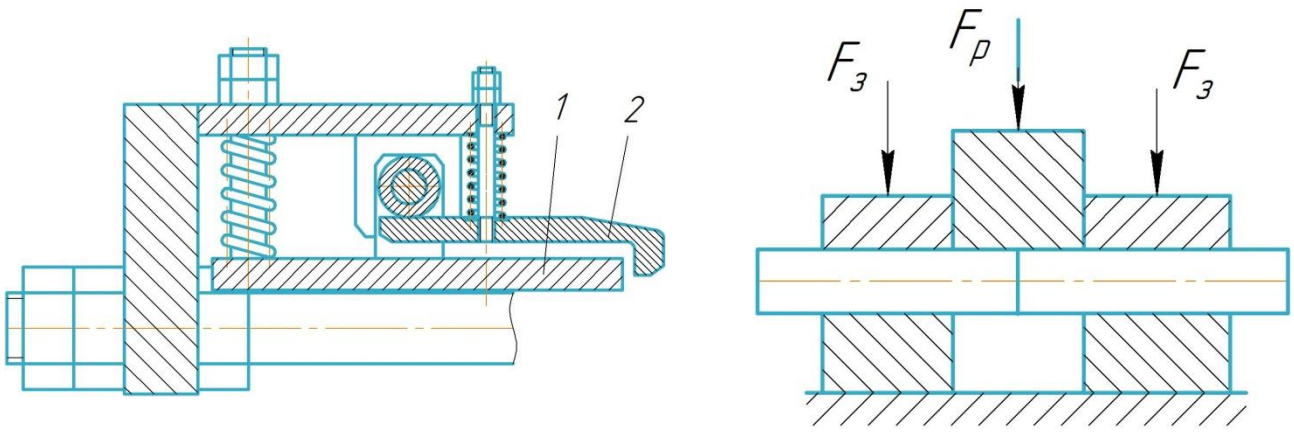
В одній із конструкцій штампу ДДМА ця проблема вирішується за рахунок застосування «фальш-заготовки». Таке рішення не є раціональним, оскільки вимагає додаткової операції – вставки «фальш-заготовки», що зменшує продуктивність процесу та приводить до похибок довжини відрізаних заготовок.

Упор при реалізації варіантів (1.1, 1.2), як правило, виконують нерухомим (2.1) в таких конструктивних схемах: з гальмуванням тертям торця (2.1.1), з шарнірною опорою переднього кінця торця (2.1.2), з протизгином (2.1.3). Але всі вони доцільні для відрізки саме довгих заготовок, у яких $l \geq 2 \cdot d$.

На рис. 7.17, а показано конструкцію запровадженого на виробництві упору 1 з поворотом і падінням заготовки під дією сили пружини перекидача 2. На рис. 7.17, б показаний варіант упору прокату за рахунок гальмування тертям торця (2.1.1, див. рис. 7.16).

Видалення заготовки може відбуватися, як у верхньому положенні відрізного ножа (1.3.1), так і у нижньому його положенні (1.3.2). Більш простим у конструктивній реалізації є варіант (1.3.1). Упори з видаленням заготовки проштовхуванням у нижньому положенні ножа (1.3.2) застосовують переважно у тих випадках, коли виштовхування уперед неможливе, а реалізовано саме назад.

За ступенем рухомості упор може бути виконаний рухомим (2.2). Штампи з рухомими упорами (2.2), які жорстко пов’язані з відрізним ножем і не відводяться для видалення заготовок, застосовуються рідко, так як придатні для відрізки тільки довгих заготовок.




а б

Рис. 7.17 – Конструкції передніх упорів

За напрямом руху самого упору (3) при переміщенні із зони різання можливі такі варіанти: зворотно-поступальний рух (3.1), обертовий рух (3.2), складний обертово-поступальний (плоский) рух (3.3).

Найбільш універсальним для штампів з диференційним затиском прокату є спосіб видалення заготовки проштовхуванням прутком (1.3) з переміщенням упору із зони різання (2.2.2), який і одержав найбільше поширення [3].

Однак застосування напрямку руху упору (3) обмежене внаслідок необхідності відводу переднього упору в момент виштовхування. Оскільки при відрізці недовгих ($0{,}8 \cdot d < l \leq 2 \cdot d$) і коротких ($l \leq 0{,}8 \cdot d$) заготовок, сама заготовка розміщується в робочій порожнині відрізного ножа, то для видалення відрізаної заготовки проштовхуванням (1.3), упор повинен залишити робочу зону штампу, а після видалення – повернутися у вихідне положення.

Для вирішення поставлених проблем, на кафедрі основ проектування машин ДДМА запропонована конструкція переднього упору (рис. 7.18), в якій затиск прокату 7, що здійснюється клином 1 під дією сили від гідроциліндра 2 у затискних ножах піввтулках 3, 4, синхронізовано з роботою упору 6, що подається до робочої зони штампу за допомогою системи важелів 5. При цьому упор 6 здійснює зворотно-поступальний рух (3.1, див. рис. 7.16) і повертається у вихідне положення після відрізки заготовки.

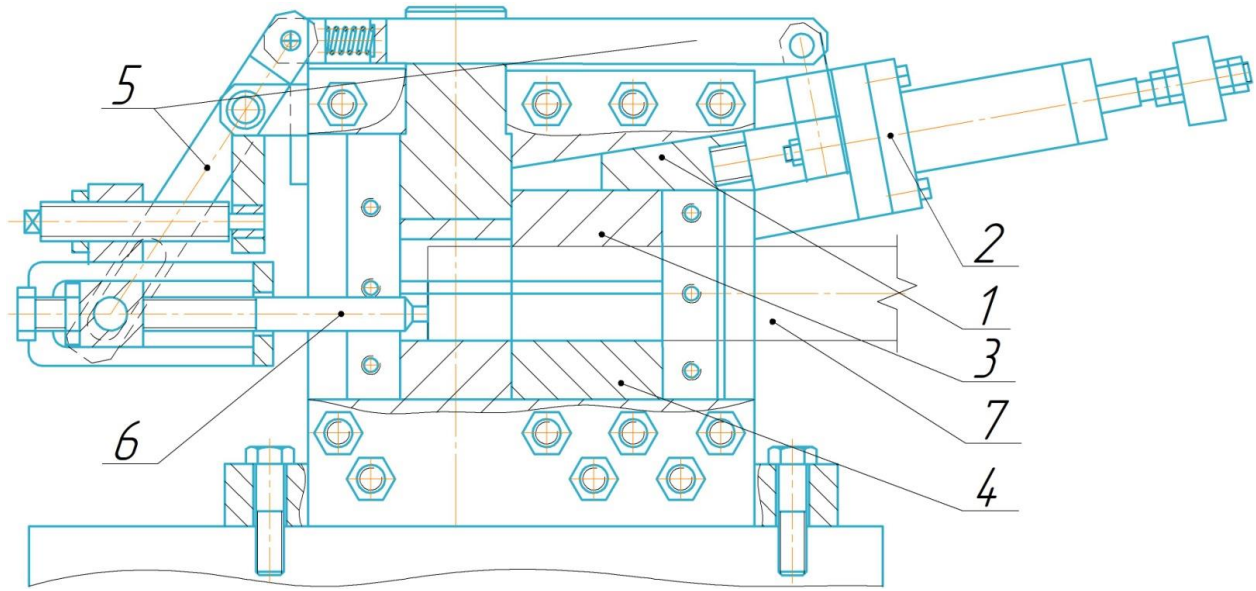



Рис. 7.18 – Конструкція переднього упору

Розроблено механізм рухомого упору (2.2) до штампу (рис. 7.19) [358], який здійснює складний обертово-поступальний (плоский) рух (3.3, див. рис. 7.16) і працює в такий спосіб. Під дією сили преса клини 3 рухаються вниз і переміщують рухому раму 2, разом з гільзою і упором 1, горизонтально вперед до внутрішньої порожнини ножових вкладишів. При цьому прокат, долаючи силу подачі рольганга, також рухається поступально уперед на задану величину, забезпечуючи відрізку заготовок заданої довжини. При подальшому русі повзуна преса вниз, відбувається затиск і відрізка прокату. Оскільки передбачається, що упор у крайньому положенні розташовується в порожнині ножових вкладишів (2.2.1), то при відрізці прокату, упор 1 здійснює обертовий рух навколо своєї осі. Після відділення заготовки, під дією сил пружин, механізм упору до штампу повертається у вихідне положення. Під дією сили з боку рольганга, пруток проштовхує відрізану заготовку (1.3) і вона падає в тару. Запропонована конструкція механізму упору дозволяє розширити технологічні можливості та підвищити геометричну точність відрізаних заготовок. Роботу упору синхронізовано з процесом відрізки заготовки (2.2.1), що дозволяє відрізати заготовки будь-якої довжини, у тому числі, короткі заготовки. Оскільки упор переміщується проти напряму подачі прутка з боку рольгангу, виключається

відскок прокату від упору, що забезпечує високу точність відрізаних заготовок за довжиною.

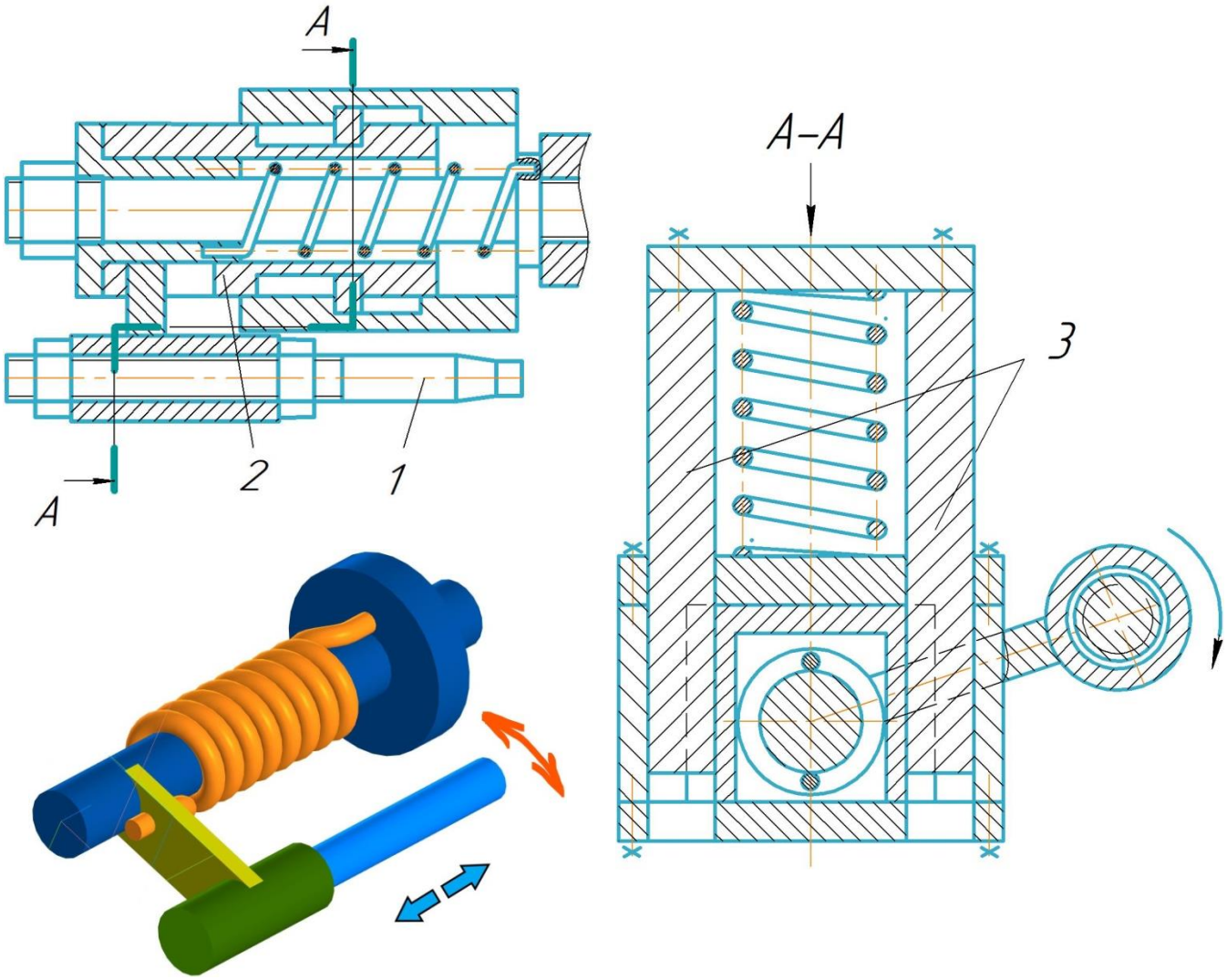


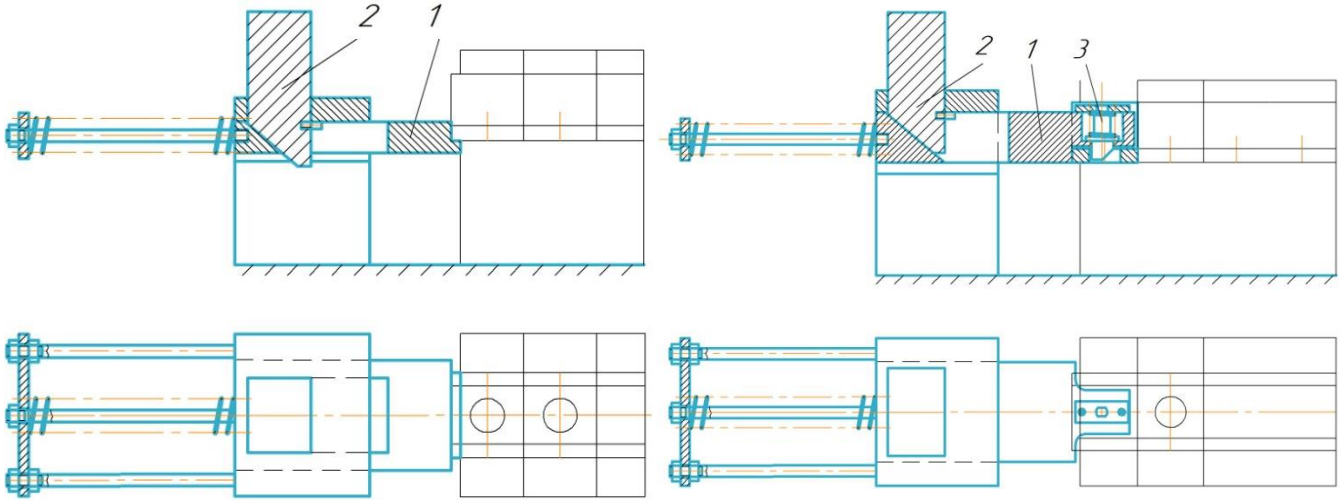

Рис. 7.19 – Конструкція переднього упору

Застосування у конструкціях передніх упорів клинового механізму забезпечує надійність і жорсткість упору.

Запропонована конструкція упору (рис. 7.20, а), в якій реалізовано його горизонтальний зворотно-поступальний рух (3.1, див. рис. 7.16). Сортовий прокат подається у робочу порожнину ножів штампу. При робочому ході преса, повзун (не показаний) рухається вниз і діє на клин 2, вихідне положення якого фіксується за допомогою гвинта. Під дією сили повзуна, клин 2 рухається вертикально у напрямних корпусу і забезпечує горизонтальний зворотно-поступальний рух плити-упора 1 в сторону від заготовки, звільняючи перед нею простір (2.2.2) [359]. Це

дозволяє, у момент повернення повзуна преса у вихідне положення, проштовхнути відрізану заготовку штангою сортового прокату (1.3) із робочої порожнини ножів штампу. Відрізана заготовка під дією сили тяжіння падає в тару. Цикл роботи упору до штампу поновлюється.

Наступна конструкція упору (рис. 7.20, б) підходить для відрізки заготовок, форма яких дозволяє зачепити заготовку. Сортовий прокат подається у робочу порожнину ножів штампу до упору в плиту 1. При цьому прокат, під дією зусилля подачі, взаємодіє з клиновою поверхнею уловлювача 3, який спочатку витискається угору, а потім, під дією сили пружини, займає місце в заготовці. Клин 2 рухається вертикально і забезпечує горизонтальне переміщення (3.1, див. рис. 7.16) плити-упора 1, яка, за рахунок уловлювача 3, що знаходиться в отворі заготовки, видаляє відрізану заготовку із робочої порожнини штампу (2.2.2) [360].



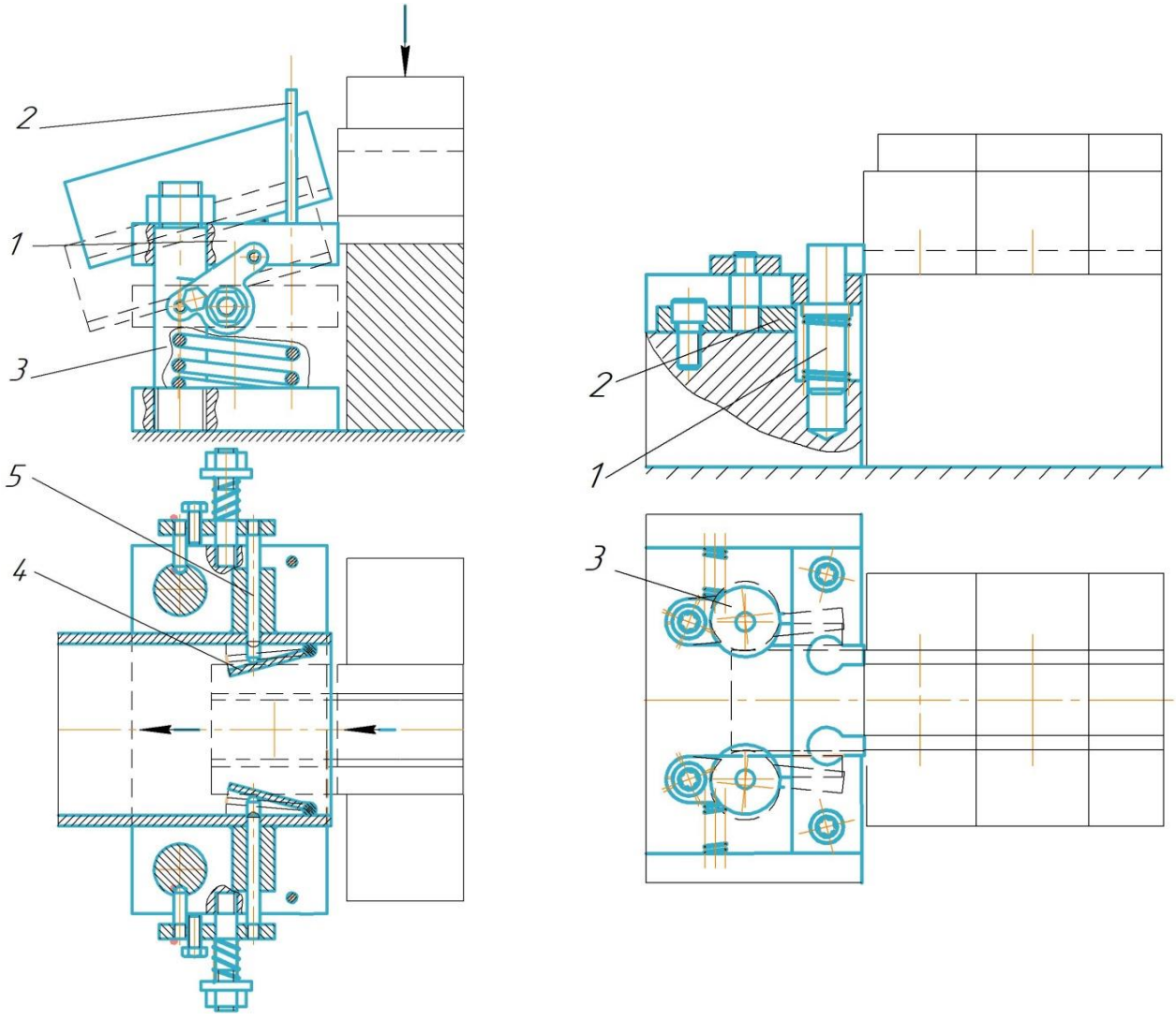

а б

Рис. 7.20 – Конструкції передніх упорів із застосуванням клинового механізму

Конструкція упору (рис. 7.21, а) забезпечує вертикальний поступальний рух (3.1, див. рис. 7.16) самого упору для вивільнення простору з метою видалення відрізаної заготовки з робочої зони штампу. При цьому сигнал на «спрацювання» упору йде від штанги, якою проштовхується відрізана заготовка (1.3) [361].

Сортовий прокат подається у робочу порожнину ножів штампу до упору в плиту 1 (див. рис. 7.21, а). Під дією сили приводу повзун здійснює розділення

прокату. Одночасно при цьому повзун через проставки переміщує плиту 1 по напрямним колонкам до нижнього крайнього положення, в якому плита 1 фіксується. Фіксація здійснюється за рахунок того, що стрижні 2 займають положення у відповідних отворах колонок 3 під дією сил з боку пружин. Після відрізки заготовки, повзун і деталі штампу повертаються у вихідне положення на холостому ході преса.




а б

Рис. 7.21 – Конструкції передніх упорів

Відрізана заготовка проштовхується силою подачі прокату і взаємодіє зі стулками 4, які обертаються навколо осей і натискають на стрижні 5. Стрижні 5 віджимаються від колонок 3 і під дією пружин, разом з плитою 1, повертаються у

вихідне положення. Одночасно заготовка по нахиленому лотку попадає до тари. Цикл роботи упору до штампу поновлюється.

Найбільш перспективною конструкцією переднього упору є конструкція наведена на рис. 7.21, б. Вона більш проста при реалізації, що надає їй риси надійності. Сортовий прокат подається у робочу порожнину ножів штампу до упору в стрижні 1. Під дією сили приводу повзун здійснює розділення прокату. Одночасно при цьому повзун через проставки переміщує стрижні 1, разом з напрямним елементом, до нижнього крайнього положення, в якому стрижні 1 фіксуються. Фіксація здійснюється за рахунок того, що упорні важелі 2, під дією пружин, займають положення у відповідних пазах стрижнів 1. Після відрізки заготовки, повзун і деталі штампу повертаються у вихідне положення на холостому ході преса. Відрізана заготовка проштовхується силою подачі прокату і взаємодіє з роликами 3, які, разом з упорними важелями 2, повертаються навколо осей. Таким чином, упорні важелі 2 віджимаються із пазів, і стрижні 1, під дією сили пружин, повертаються у вихідне положення. Одночасно заготовка попадає до тари [362].

**Висновки до розділу 7.**

1. Аналізом класифікацій конструкцій штампів з диференційованим затиском прокату та передніх упорів до них, виявлені конструктивні ознаки, які дозволили створити нові конструкції штампів з диференційованим затиском сортового прокату з високими техніко-економічними характеристиками. У порівнянні з відомими конструкціями, поперечні розміри й маса штампів знижуються в середньому на 25 %, а висота – на 10 %. В цих штампах у процесі розділення в вертикальній площині забезпечується незмінне положення осі прокату, виключається передача сили на затиск через прокат. Штампи мають високу жорсткість. Відрізані на них заготовки мають високу геометричну точність. Результатами вимірювань, із застосуванням методів магнітно-порошкової та фарбо-капілярної дефектоскопії, встановлено відсутність торцевих тріщин на заготовках.

2. Встановлені залежності для розрахунків силових параметрів процесу розділення сортового прокату комбінованим навантаженням у штампах з

диференційованим затиском прокату, які відрізняються врахуванням впливу величин кутів клинових механізмів штампів та контактного тертя при відрізці, що дозволяє призначити оптимальні параметри механізмів штампів, які забезпечують підвищення геометричної точності отриманих заготовок. Доведено, що відношення сил затиску і відрізки прокату та коефіцієнт корисної дії суттєво залежать від сил тертя на контактних поверхнях. Дано рекомендації щодо вибору раціональних геометричних параметрів штампу: кут передачі зусилля на затиск і відрізку прокату слід вибирати у діапазоні $(30 \ldots 40)^{\circ}$, а кут передачі зусилля на затиск ножових вкладишів у діапазоні $(27 \ldots 30)^{\circ}$.

3. На основі теоретичного аналізу, проведених експериментальних досліджень і досвіду експлуатації штампів з диференційованим затиском прокату, були перевірені відомі й сформульовані нові рекомендації до проектування подібних штампів.

4. Адекватність теоретичних розрахунків підтверджено результатами експерименту. Максимальні значення сили відрізки, отримані при експерименті, перевищують теоретичні результати на 8%. Це пов’язано зі складністю врахування умов тертя на контактних поверхнях штампу, а також з похибками виготовлення і монтажу.

5. Розроблено і запатентовано конструкції штампів з диференційованим затиском прокату і передніх упорів до них.

*Результати досліджень опубліковані в роботах [348 – 362].*

# ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-технічна проблема підвищення ефективності процесів розділення сортового і трубного прокату на базі розвитку наукових основ, застосування нових технологічних способів і засобів комбінованого навантаження та розробки методик проектування технологічних процесів, обладнання та оснастки.

1. Проведено аналіз, виявлено сучасні тенденції та шляхи розвитку безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату, обладнання і оснастки для їх реалізації. Визначено основні напрямки вдосконалення даної галузі обробки тиском, які полягають: у створенні нових і підвищенні можливостей відомих способів розділення сортового і трубного прокату та обладнання для їх реалізації, оцінки технологічних режимів та закономірностей формоутворення, моделювання технологічних режимів, розробки методик розрахунку і проектування технологічних процесів з урахуванням особливостей зовнішнього силового і кінематичного впливу.

2. Розроблена класифікація безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату, засобами комбінаторики виконаний синтез перспективних способів комбінованого навантаження, які дозволяють підвищити ефективність роботи обладнання та геометричну точність отриманих заготовок. Запропонована класифікації компактних виконавчих механізмів пресів і обґрунтована доцільність використання перспективних механізмів: клиношарнірних, кривошипно-кругових, кривошипно-кулісних та їх комбінацій, які забезпечують найбільш сприятливий силовий і кінематичний режим навантаження при виконанні операцій безвідходного розділення сортового і трубного прокату, що дозволяє зменшити величину енергосилових параметрів розділення та шкідливі наслідки розвантаження преса після зняття технологічного навантаження.

3. Запропоновано та науково обґрунтовано метод вибору способу безвідходного розділення сортового прокату із матеріалів з різними механічними характеристиками з використанням синергетичних критеріїв руйнування та граничних деформацій. Оцінкою інформативності синергетичних критеріїв

руйнування, виконаного методами кластерного аналізу, установлено, що критерій поширення тріщини і критерій крихкості є базовими інформативними ознаками. При додаванні до них будь-якого з решти критеріїв, вони утворюють найбільш інформативні множини мінімальної потужності, що забезпечують, із заданою вірогідністю, класифікацію матеріалів по їхній чутливості до руйнування. Розроблено експериментальний метод визначення чутливості зразків до руйнування за величинами повздовжньої і поперечної граничних деформацій, що доповнює запропоновану класифікацію матеріалів.

4. Отримали подальший розвиток закономірності та залежності технологічних параметрів процесу розділення сортового прокату комбінованим статико-динамічним навантаженням способом триточкової холодної ломки згином із застосуванням методів скінченних різниць та скінченних елементів, які враховують вплив попереднього статичного навантаження і жорсткості системи «прес-молот – оснастка – зразок» на хвильовий силовий режим розділення, що забезпечує плавний режим навантаження, недопущення порушення симетричності прикладення навантаження відносно концентратора напружень і отримання заготовок підвищеної геометричної точності. Встановлено, що комбіноване статико-динамічне навантаження дозволяє зменшити високочастотні коливання зразка та не допустити порушення контакту зразка з опорами. Більша частина енергії витрачається на зародження й в'язке підростання тріщини, тоді як енергія крихкого руйнування складає не більше (10…25)% від сумарної енергії розділення. Збільшення величини динамічної максимальної сили ломки, у порівнянні зі статичною, для досліджених матеріалів склало не більше 8%, за виключенням зразків із сталі 40Х (клас «пружно-пластичних» сталей) – більше 30%. Рекомендована величина статичної сили при комбінованому навантаженні – не менше 25% від сили ломки і збільшується зі зростанням жорсткості контакту рухомих деталей прес-молота, оснастки і зразка. Розбіжність результатів теоретичних і експериментальних досліджень знаходиться у межах 5%.

5. Із застосуванням аналітичних методів та методу скінченних елементів розроблені залежності для розрахунку технологічних параметрів процесу розділення

сортового і фасонного прокату на пресах з клиношарнірними механізмами нової конструкції, які забезпечують комбіноване навантаження і оптимальний графік зміни деформуючих зусиль, що дозволяє зменшити енергосилові параметри процесу розділення, шкідливі наслідки розвантаження пресу в кінці робочого ходу і підвищити жорсткість преса. Аналізом розробленої класифікації клиношарнірних механізмів виявлені клиношарнірні механізми з увігнутим клином, які забезпечують графік зміни сили на повзуні, максимально наближений до типового графіку розділення прокату та зменшення зони активної деформації преса у процесі технологічного навантаження, що дозволяє збільшити жорсткість преса. Розроблені математичні моделі розрахунку геометричних, кінематичних і силових параметрів обладнання з клиношарнірним механізмом з увігнутим клином, які дозволяють забезпечити найбільш сприятливий силовий режим навантаження, у тому числі за рахунок оптимальної траєкторії інструмента при застосуванні додаткового клина з постійним кутом нахилу до $10^{\circ}$ для регулювання нахилу увігнутого клина. Порівняльний аналіз розрахункових параметрів ряду пресів запропонованої конструкції, отриманих із застосуванням математичних моделей та паспортних даних типових сортових ножиців показав, що коефіцієнт використання пресів нової конструкції за зусиллям збільшується від (0,3…0,4) до (0,7…0,8), підвищується коефіцієнт корисної дії преса. Розбіжність результатів розрахунків, проведених аналітичними і графоаналітичними методами ТММ, а також результатів теоретичних і експериментальних досліджень не перевищує 8%.

6. Розроблені математичні моделі розрахунку геометричних, кінематичних і силових параметрів обладнання з клиношарнірним механізмом з увігнутим клином з поворотним ножем для розділення фасонного прокату комбінованим навантаженням, який забезпечує складний плоский рух інструмента, що є сполученим процесом відрізки зсувом і кручення і має високу жорсткість. Встановлено, що для забезпечення найбільш сприятливого силового і кінематичного режиму навантаження величина параметру, що визначає положення центру обертання шарніру механізму, повинна складати половину радіуса увігнутого клина. Енергосилові параметри процесу розділення несуттєво залежать від орієнтації

прокату при його подачі у зону розділення і зменшуються на 20% у порівнянні з відомими конструкціями аналогічного обладнання. Розбіжність результатів теоретичних і експериментальних досліджень не перевищує 8%.

7. Розроблені залежності для розрахунків геометричних і силових параметрів процесу розділення трубного прокату комбінованим навантаженням з використанням кривошипно-кругового механізму, який відрізняються урахуванням високої жорсткості інструмента та його складного плоского руху у вигляді сполучення зсуву та кручення, що дозволяє зменшити енергосилові параметри процесу розділення та збільшити коефіцієнт використання пресів за зусиллям. Зі збільшенням величини ексцентриситету момент відрізки збільшується, кут повороту інструменту зменшується. Для забезпечення геометричної точності отриманих заготовок величину ексцентриситету рекомендується приймати в діапазоні $(0{,}5 \ldots 1{,}5)$ товщини труби. Розбіжність результатів теоретичних і експериментальних досліджень знаходиться у межах 8%.

8. Методами полів ліній ковзання і скінченних елементів встановлені залежності для розрахунків енергосилових параметрів та закономірності процесу розділення сортового прокату комбінованим навантаженням за рахунок активних зусиль деформування пресом та реактивних зусиль пружної деформації технологічної системи, що дозволяє послідовно за один робочий хід виконувати операції «нанесення концентратора напружень – розділення» за схемами: «вдавлення клинового ножа – консольна ломка», «частковий зсув – консольна ломка», «частковий зсув – реверсний зсув». Для схеми «вдавлення клинового ножа – консольна ломка» встановлено, що величина роботи вдавлення клинового ножа складає не більше 20% від роботи розділення прокату, тому енергії розвантаження преса в момент зняття технологічного навантаження достатньо для нанесення ефективного концентратора напружень. Виявлено, що кут клинового ножа слід вибирати у діапазоні $(25 \ldots 40)^{\circ}$, а глибину вдавлення концентратора напружень – $(10\ldots20)\%$ від розміру поперечного перерізу зразка. Варіант розділення прокату за схемою «частковий зсув – консольна ломка» виявився неефективним, оскільки потребує додаткового джерела енергії. Для відрізки за схемою «частковий зсув –

реверсний зсув» порівнянням робіт нанесення концентратора напружень і розділення встановлено, що енергії розвантаження преса достатньо для реалізації даного способу. Сила і робота нанесення концентратора зі зростанням ходу ножа збільшуються. Сила нанесення концентратора напружень зростає на (15…20)%, оскільки відбувається зсув відразу усього перерізу прокату після контакту з ножем. Розбіжність результатів теоретичних і експериментальних досліджень не перевищує 8%.

9. Отримали подальший розвиток залежності для розрахунків силових параметрів процесу розділення сортового прокату комбінованим навантаженням у штампах з диференційованим затиском прокату, які відрізняються врахуванням впливу величин кутів клинових механізмів штампу та контактного тертя при відрізці, що дозволяє призначити оптимальні параметри механізмів штампів, які забезпечують підвищення геометричної точності отриманих заготовок. Аналізом класифікацій конструкцій таких штампів та передніх упорів до них, виявлені конструктивні ознаки, які дозволили створити нові конструкції штампів з диференційованим затиском сортового прокату з високими техніко-економічними характеристиками. Установлено, що відношення сил затиску і відрізки прокату та коефіцієнт корисної дії суттєво залежать від сил тертя на контактних поверхнях та геометричних параметрів штампів. Виявлені оптимальні значення кутів клинів передачі зусилля: на затиск – $(27 \ldots 30)^{\circ}$, на затиск і відрізку прокату – $(30 \ldots 40)^{\circ}$. Адекватність теоретичних розрахунків підтверджена результатами експерименту. Розбіжність результатів теоретичних і експериментальних досліджень до 8%.

10. Запропоновані нові способи розділення сортового і фасонного прокату та нові конструкції обладнання і оснастки для їх реалізації: прес-молоти статико-динамічного навантаження; преси з клиношарнірним механізмом з увігнутим клином та з поворотним ножем; преси з кривошипно-круговим та кривошипно-кулісним механізмами, що забезпечують зменшення енергосилових параметрів, наслідків розвантаження пресів, збільшення коефіцієнту корисної дії та використання пресів за зусиллям; штампи з диференційованим затиском прокату. Новизна способів і запропонованих конструкцій захищена патентами України.

11. Методики вибору, розрахунку та проектування процесів розділення за новими способами: комбінованою статико-динамічною ломкою та розділенням з використанням енергії розвантаження преса в момент зняття технологічного навантаження; методика розрахунків геометричних, кінематичних і силових параметрів клиношарнірних механізмів запропонованих конструкцій; рекомендації щодо вибору величин технологічних параметрів при розділенні сортового і фасонного прокату з використанням запропонованих компактних виконавчих механізмів та штампів з диференційованим затиском прокату, підготовлені до впровадження, процеси та оснастка для розділення апробовані і впроваджені у виробництво. Результати досліджень використовуються в навчальному процесі на кафедрі обробки металів тиском (ОМТ) у вигляді лекційного матеріалу, а також при виконанні проектних та практичних робіт студентами та магістрантами спеціальності 136 «Металургія» і підготовки аспірантів за спеціальностями 132 «Матеріалознавство» та 131 «Прикладна механіка» (Додаток В).

# СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

. Кислый П. Е., Коваленко В. Ф., Чижик-Полейко В. Ф. О точности заготовок из сортового проката, получаемых резкой на современном кузнечно-прессовом оборудовании. *Исследование и освоение новых технологических процессов объемной и листовой штамповки*. Воронеж: ЭНИКМАШ. 1980. С. 101–116.

2. Соловцов С. С., Лисунец Н. Л. Состояние и перспективы развития производства точных заготовок из сортового проката. *Перспективы производства точных заготовок и деталей методами объемного деформирования : Сборник научных трудов*. МДНТП. 1990. С. 76–81.

3. Соловцов С. С. Безотходная разрезка сортового проката в штампах. Москва : Машиностроение. 1985. 176 с.

4. An H. P., Li L., Wang L. Research on designing project of transmission system about machine for cutting metal cannulation. *Coal Technology*. 2009. 12. pp. 17–19.

5. Соловцов С. С. , Кругликов В. С. , Лисунец Н. Л. Унификация прутков при изготовлении заготовок отрезкой в штампах. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1990. 2. С. 14–16.

6. Jiang Y., Pi J., Xiao J., Zhang Y., Jiang T., Yang G., Shen Z. A novel method for effecting flexible guided wave propagation in elliptical vibration cutting. *Precision Engineering*. 2012. 72. pp. 437–447, https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.06.006.

7. Жуков Г. Г. Механизация и автоматизация заготовительных операций на машиностроительных заводах. М. – Л.: Машиностроение. 1966. 112 с.

8. Аристов В. М., Сахаров Г. С., Степанов В. Н., Иванов И. И. Основы технологии кузнечно-штамповочного производства. Москва : Металлургия. 1971. С. 27–39.

9. Мансуров М. А. Технология горячей штамповки. Москва : Машиностроение. 1971. С. 24–29.

10. Охрименко Я. М. Технология кузнечно-штамповочного производства. Москва : Машиностроение. 1966. С. 27–59.

11. Брюханов А. Н. Ковка и объемная штамповка. Учебное пособие для машиностроительных вузов. Изд. 2-е перераб. и доп. Москва : Машиностроение. 1975. 408 с.

12. Qian Y. P., Huang X., Zhou X. Z. Development of a tube cutting head for thin-walled stainless steel. *Machine tool and hydraulics*. 2014. 16. pp. 18–19.

13. Gang Wang, Shifan Qiao, Guang Wang, Huan Jiang. Cutting depth of pile materials subjected to the abrasive waterjet and its prediction model. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2022. 124. 104473, https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104473.

14. Chen S. L., Lin M. H., Hsieh S. F., Chiou S. Y. The characteristics of cutting pipe mechanism with multi-electrodes in EDM. *Journal of materials processing technology*. 2007. 203(1–3). pp. 461–464, https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.10.059.

15. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Жуков М. Б., Бегунов А. А., Ланкин П. Ю. Выбор параметров экспериментальных устройств для резки металла водяной струей с примесью частиц абразива. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: Збірник наукових праць*. Краматорськ. 2003. С. 460–470.

16. Веселовский С. И. Разрезка материалов. Москва : Машиностроение. 1973. 360 с.

17. Высоцкий Е. Н. Управление разрушением при изгибе: монография. Донецк «Вайбер». 2006. 256 с.

18. Korade D. N., Dandge V. M., Ramana K. V., Jagtap K. R. Effect of heat treatments on fatigue failure and fracture toughness of various tool steels, a review. *International Journal of Current Engineering and Technology*. 2016. 4. pp. 296–302.

19. Лисин А. Г. Определение напряжений на режущей кромке штампа методом линий скольжения. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1987. 8. С. 16–18.

20. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением. Москва : Металлургия. 1986. 698 с.

21. Гун Г. Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. Учебник для вузов. Москва : Металлургия. 1980. 456 с.

22. Роганов Л.Л., Карнаух С.Г., Чоста Н.В. Разделение сортового проката больших поперечных сечений способом отрезки сдвигом. *Обработка материалов давлением: Сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА. 2010. 1(22). С. 137–141.

23. Andrade P. R., Araujo S. A., Cherri A. C., Lemos F. K. The integrated lot sizing and cutting stock problem in an automotive spring factory. *Applied Mathematical Modelling*. 2021. 91. pp. 1023–1036, https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.10.033.

24. Lisunets N. L. Usage of physical and mathematical simulation for improvement of the processes of metal shear cutting. *Cis iron and steel review*. 2019. 17. pp. 34–38. https://doi.org/10.17580/cisisr.2019.01.06.

25. Lisunets N. L. Improving the efficiency of the processes of billets manufacture from rolled metal via shift cutting based on simulation. *Chernye metally*. 2018. 6. pp. 31–35.

26. Jhavar S., Paul C. P., Jain N. K. Causes of failure and repairing options for dies and molds. *Engineering failure analysis*. 2013. 34. pp. 519–535.

27. Kahrobaee S., Kashefi M. Electromagnetic nondestructive evaluation of tempering process in AISI D2 tool steel. *Journal of magnetism and magnetic materials*. 2015. 382. pp. 359–365.

28. Ayashi T., Sakurai S., Shibanuma K., Sakasai A. Development of remote pipe cutting tool for divertor cassettes in JT-60SA. *Fusion engineering and design*. 2014. 89(9–10). pp. 2299–2303, https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2014.04.026.

29. Wang J., Ibaraki S., Matsubara A. A cutting sequence optimization algorithm to reduce the workpiece deformation in thin-wall machining. *Precision engineering*. 2017. 50. pp. 506–514, https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.07.006.

30. Соловцов С. С. Производство точных заготовок отрезкой и вырубкой. *Кузнечно-штамповочное производство*. 2005. 9. С. 22–24.

31. Мещерин В. Т., Соловцов С. С. , Тимонин А. И. Параметры точной резки сортового проката в штампах при высоких скоростях деформирования. *Автомобильная промышленность*. 1973. 7. С. 27–29.

32. Соловцов С. С. Состояние и перспективы развития разделительных процессов обработки металлов давлением. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1981. 8. С. 34–36.

33. Чеченев Н. А., Кудрин А. Б., Полухин П. И. Методы исследования процессов обработки металлов давлением. Москва : Металлургия. 1977. 311 с.

34. Друянов Б. А., Непершин Р. И. Теория технологической пластичности. Москва : Машиностроение. 1990. 272 с.

35. Огородников В. А., Киселев В. К., Сивак И. О. Энергия. Деформация. Разрушение. Винница : Универсум. 2005. 204 с.

36. Целиков А. И. Теория и расчеты усилий в прокатных станах. Москва : Металлургиздат. 1962. 492 с.

37. Ромашов А. А., Черкашев А. С. Отрезка коротких и точных заготовок в штампах. *Электронная техника. Серия 7.* 1989. 1 (152). С. 34–36.

38. Карнаух С. Г. Совершенствование безотходных способов разделения сортового проката и оборудования для получения заготовок высокого качества : монография. Краматорск: ДГМА. 2010. 196 с., ISBN 978–966–379–463–1.

39. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г. Современные подходы к реализации способа холодной ломки изгибом проката на мерные заготовки. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. ДДМА*. Краматорськ – Слов'янськ. 2003. С. 313–322.

40. Соловцов С. С. Совершенствование производства заготовок из сортового проката в штампах. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1993. 4. С. 18–22.

41. Финкель В. М., Головин Ю. И., Родюков Г. Б. Холодная ломка проката. Москва : Металлургия. 1982. 192 с.

42. А. с. 1180186 СССР, B 23 D 21/00. Способ ломки проката. Тимощенко В. А., Кириловский В. В. 4400097/25-27; заявл. 31.03.1988; опубл. 30.06.1990. Бюл. №35.

43. Финкель В. М. Физика разрушения. Москва : Металлургия. 1970. 376 с.

44. Финкель В. М. Портрет трещины. Москва : Металлургия. 1981. 160 с.

45. А. с. 321314 СССР, B 21F 27/00. Способ получения штучных заготовок из

прутка. Лапин В. В. 333029/25-27; заявл. 26.05.1969; опубл. 19.11.1971. Бюл. 35.

46. Zhe Zhang, Dong Liu, Zhenfei Li, Yangyang Zhang, Runqiang Zhang, Yanhui Yang, Yuhua Pang, Jianguo Wang. Study on the shear-torsion deformation of rotary tube piercing process for nickel base superalloy. *Journal of materials processing technology*. 2021. 295. pp. 117–153, https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117153.

47. Норицын И. А., Кислый П. Е. Определение механических характеристик стали при испытании на кручение. *Заводская лаборатория*. 1960. 8. С. 999–1006.

48. А. с. 1292946 СССР, B23B31/00. Устройство для разделения проката ломкой. Тимощенко В. А., Кириловский В. В. 3935813; заявл. 28.02.1987; опубл. 22.07.1985. Бюл. 11.

49. А. с. 1177005 СССР, B21 D31/00. Способ ломки проката. Тимощенко В. А., Кириловский В. В. 3546334/25-27; заявл. 29.11.1982; опубл. 07.09.1985. Бюл. 33.

50. А. с. 578167 СССР. Способ ломки проката. Финкель В. М., Ю. И. Головин, Слетков А. А. 2319802/25-02; заявл. 06.02.1976; опубл. 30.10.1977. Бюл. 40.

51. А. с. 499065 СССР, B23D 27/00. Гидроимпульсное устройство для холодной ломки проката. Финкель В. М., Родюков Г. Б. 2023649/22-2; заявл. 15.05.1974; опубл. 15.01.1976. Бюл. 2.

52. Королев А. В., Чистяков А. М., Болкунов В. В. Новые прогрессивные технологии машиностроительного производства. *Энергосберегающие технологии безотходного разделения изделий на основе локального направления разлома. Часть 6*. Саратов : СГТУ. 1998. 124 с.

53. Коваленко В. Ф. Анализ схем холодной резки сортового проката сдвигом. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1968. 5. С. 18–21.

54. Соловцов С. С. Совершенствование резки прутков на заготовки. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1989. 9. С. 3–7.

55. Михаленко В. П., Антонов Ю. В. Распределение контактных напряжений при резке материалов в штампах. *Вестник машиностроения*. 1975. 6. С. 79–82.

56. А. с. 1465195 СССР, B23D23/00. Устройство для резки проката. Ломсадзе З. Д., Костава А. А., Сулухия Д. М. 4279681/31-27; заявл. 08.07.1987; опубл. 15.09.1989. Бюл. №10.

57. Карнаух С. Г. Дослідження процесу розділення труб способом відрізки ексцентричним закручуванням. *Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка. технологія та інженерна освіта»*. Київ. 2017. С. 111–113.

58. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г. Перспективные направления развития технологии и оборудования для разделения сортового проката на мерные заготовки. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: Збірник наукових праць*. Краматорськ. 2002. С. 201–205.

59. Трусковский В. И., Закиров Р. А. Развитие и совершенствование способов и механических схем резки. *Наука и технологии. Серия: Технологии и машины обработки давлением: Избранные труды Российской школы*. Москва : РАН. 2005. С. 129–134.

60. Закиров Р. А., Трусковский В. И., Шеркунов В. Г. Математическое моделирование НДС проката в очаге деформации при резке плоскими клиновыми ножами. *Сборник научных трудов 1-ой Российской научно-технической конференции «Кузнецы Урала 2005»*. Екатеринбург. 2005. С. 153–156.

61. Трусковский В. И. Математическая модель напряженного деформированного состояния в очаге деформации при резке плоскими клиновыми ножами. *Абразивный инструмент и металлообработка: Сборник научных трудов*. Челябинск: ЦНТИ. 2001. С. 103–106.

62. Соловцов С. С., Лисунец Н. Л., Атанасов А. М. Эффективный технологический процесс изготовления коротких заготовок из алюминиевого проката. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1992. 5. С. 10–12.

63. Соловцов С. С. Актуальные задачи совершенствования и развития разделительных процессов обработки металлов давлением. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1985. 1. С. 9–12.

64. Соловцов С. С., Козьмин А. А. Комплексные процессы разделения сортового проката на заготовки. *Материалы семинара «Интенсивная технология обработки металлов давлением»*. Москва : МДНТП. 1987. С. 19–125.

65. Пат. 32102 Україна, B21 K 21/00. Спосіб розділення сортового прокату.

Алієв І. С., Алієва Л. І., Жбанков Я. Є., Косенко М. В. u200711369; заявл. 15.10.2007; опубл. 12.05.2008. Бюл. №9.

66. Roganov L. L., Karnaukh S. G., Karnaukh D. S., Shevchenko E. P. Process research of pipes sectioning with flat knife. *12th International conference «Research and development in mechanical industry» RaDMI.* 2012. 2. pp. 862–865.

67. Roganov L. L., Karnaukh S. G., Karnaukh D. S. Modelling of process of reception of measured cut-to-length sections from rolled section steel of circular section according to the scheme of incompletely closed parting cut. *12th International conference «Research and development in mechanical industry» RaDMI.* 2012. 2. pp. 787–790.

68. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Кравченко Р. А., Шоленинов В. Е. Ресурсосберегающее оборудование для заготовительного производства приборостроения. *Тезисы докл. междунар. конф. «Современные материалы, технологии. оборудование и инструмент в машиностроении»*. Киев. 2000. С. 63–64.

69. Карнаух С. Г. Совершенствование безотходных способов разделения сортового проката на мерные заготовки. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: Збірник наукових праць*. Краматорськ. 1997. 3. С. 106–118.

70. Стеблюк В. И., Савченко Д. Н., Холявик О. В. Новая конструкция устройства для резки труб сдвигом и кручением. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ» : Сб. науч. тр. Темат. вып. : Новые решения в современных технологиях*. Харьков : НТУ «ХПИ». 2009. 31. С. 39–42.

71. Стеблюк В. И., Савченко Д. Н., Розов Ю. Г. Методы совершенствования способов резки труб на короткие заготовки. *Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування : збірник наукових праць*. 2009. 57. С. 153–156.

72. Тимощенко В. А., Эрлих А. И., Пульбере А. И. Резка сортового проката и труб на заготовки. Кишинев: Штиница. 1986. 112 с.

73. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. Разработка новых конструкций оборудования и оснастки для разделения труб на мерные заготовки. Сообщение 2. *Обработка материалов давлением: Сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА. 2013. №2 (35). С.147–153.

74. Тимощенко В. А. Комплексные исследования и совершенствование разделительных процессов обработки металлов давлением (обобщение опыта работы Кишиневского политехнического института). *Кузнечно-штамповочное производство*. 1992. 5. С. 12–15.

75. Тимощенко В. А., Ермилов В. В., Эрлих А. И. Исследование деформирования заготовки при резке сортового проката сдвигом. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1977. 12. С. 26–28.

76. Давыденков Н. Н. Динамические испытания металлов. Москва : ОНТИ НКГП СССР. 1936. 236 с.

77. Тимощенко В. А., Кириловский В. В. Новые схемы ломки проката. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1990. 9. С. 9–11.

78. Нейбер Г. Концентрация напряжений. Москва : Гостехизат. 1947. 69 с.

79. Петерсон Р. Коэффициенты концентраций напряжений. Москва : Мир. 1977. 302 с.

80. Карнаухов А. А. Методика расчета упругопластических напряжений и деформаций в зонах концентрации. *Проблемы прочности*. 1988. 11. С. 90–95.

81. Роганов Л. Л., Исаев А. В. Сдвиговая отрезка заготовок ножами с клиновыми выступами. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1989. 4. С. 15–19.

82. Кобельке В. Ф., Гришаев В. В., Высоцкий Е. Н. Накатка концентраторов напряжений на круглый прокат клиновидными роликами. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1989. 10. С. 10–12.

83. Погодин-Алексеев Г. И. Динамическая прочность и хрупкость металлов. Москва : Машиностроение. 1966. 244 с.

84. Кононенко В. Г., Валеня И. Ю. Технологические особенности высокоскоростной резки сортового проката сдвигом. *Высокоскоростная обработка материалов давлением.* Харьков. 1982. 8. С. 3–16.

85. Кононенко В. Г. Высокоскоростное деформирование и разрушение металлов. Харьков: Вища школа. 1980. 231 с.

86. Ионов В. Н., Селиванов В. В. Динамика разрушения деформируемого тела. Москва : Машиностроение. 1987. 272 с.

87. Борисевич В. К., Драгобецкий В. В. Анализ разделительных прооцессов листовой штамповки. *Кузнечно-штамповочное производство*. 2009. 12. С. 9–12.

88. Вакулин А. В., Солнцев Ю. П., Скобкин В. В. Влияние скорости приложения нагрузки и температуры на трещиностойкость конструкционных сталей. *Проблемы прочности*. 1992. 7. С. 30–33.

89. Новиков Н. В. О влиянии скорости нагружения и температуры на трещиностойкость твердых сплавов. *Проблемы прочности*. 1980. 9. С. 61–64.

90. Havinga J., Mandal P. K., Boogaard T. V. Exploiting data in smart factories: real-time state estimation and model improvement in metal forming mass production. *International journal of materials research*. 2019. 13. pp. 663–673, https://doi.org/10.1007/s12289-019-01495-2.2.

91. Chehab A. G., El Naggar M. H. Design of efficient base isolation for hammers and presses. *Soil dynamics and earthquake engineering*. 2003. 23. pp. 127–141, https://doi.org/10.1016/S0267-7261(02)00157-4.

92. Tian Y., Zou H., Guo W. An integrated knowledge representation model for the computer-aided conceptual design of mechanisms. *International journal of advanced manufacturing technology*. 2006. 28. pp. 435–444, https://doi.org/10.1007/s00170-004-2399-6.

93. Songa J. L., Li Y. T., Liua Z. Q., Fua J. H., Ting K. L. Numerical simulation and experiments of precision bar cutting based on high speed and restrained state. *Materials science and engineering*. 2009. 499. pp. 225–229, https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.09.098.

94. Noda N., Takase Y. Stress concentration formula useful for all notch shape in a round bar (comparison between torsion, tension and bending). *International journal of fatigue*. 2006. 28(2). pp. 151–163, https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2005.04.015.

95. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. Москва : Наука. 1979. 744 с.

96. Joun M. S., Jeong S. W., Park Y. T., & Hong S. M. (2021). Experimental and numerical study on shearing of a rod to produce long billets for cold forging. *Journal of manufacturing processes*. 2021. 62. pp. 797–805,

https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.12.062.

97. Ceretti E., Taupin E., Altan T. Simulation of metal flow and fracture applications in orthogonal cutting, blanking and cold extrusion. *CIRP annals – manufacturing technology*. 1997. 46. pp. 187–190, https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60805-1.

98. Беляев Ю. В., Киселев Н. Н., Когановский Ф. И. Процессы. происходящие в гидравлических прессах при мгновенном исчезновении технологической нагрузки. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1969. 10. С. 12–14.

99. Живов Л. И. Кузнечно-штамповочное оборудование : учебник для вузов. Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2006. 560 с.

100. Вяткин В. П., Опаренко В. Ф. Влияние жесткости кривошипных горячештамповочных прессов на энергетику их работы. склонность к перегрузкам и заклиниванию. *Новые кузнечно-прессовые машины*. Москва : ЭНИКМАШ. 1965. 811. С. 4–5.

101. Банкетов А. Н., Бочаров Ю. А., Добринский Н. С. Кузнечно-штамповочное оборудование : учебник для машиностроительных вузов ; под ред. А. Н. Банкетова, Е. Н. Ланского. Москва : Машиностроение. 1982. 576 с.

102. Власов В. И., Борзыкин А. Я., Букин-Батырев И. К. Кривошипные кузнечно-прессовые машины ; под ред. В. И. Власова. Москва : Машиностроение. 1982. 424 с.

103. Ланской Е. Н., В. И. Силанов, И. Н. Филькин, В. М. Шиновский. Проектирование базовых деталей кривошипных прессов при заданных показателях прочности и жесткости. *Кузнечно штамповочное производство*. 1983. 3. С. 11–19.

104. Попов Е. Н. Основные направления развития процессов и машин обработки давлением. *Кузнечно. штамповочное производство*. 1983. 3. С. 2–4.

105. Мещерин В. Г., Ланской Е. Н., Опаренко В. Ф. О нормах жесткости кривошипных горячештамповочных прессов. Исследование и конструирование новых кузнечно-прессовых машин. Москва : Машиностроение. 1966. С. 91–119.

106. Гурьев Ю. Г., Кирдун В. А., Бабенко В. П. Специализированные кривошипные горячештамповочные прессы для точной штамповки. *Кузнечно-*

*штамповочное производство*. 1981. 5. С. 19–22.

107. Гурьев Ю. Т., Гончаров А. И. Новые тенденции в развитии горячештамповочных прессов. *Обработка давлением. Технология и оборудование*. Москва : НИИМаш. 1972. 2. С. 1–7.

108. Харлашкин В. В. Разработка и внедрение механических прессов с клиношарнирным приводом ползуна для точной штамповки: дис…канд. техн. наук. 05.03.05. Краматорск. 1986. С. 167–174.

109. А. с. 461844 СССР, B30b1/32. Клиновой пресс. Бочаров Ю. А., Сафонов А. В. 1804011/25-27 ; заявл. 30.06.72 ; опубл. 28.02.75, Бюл. № 8.

110. А. с. 1152797 СССР, B30 B1/40. Клиновой пресс. Роганов Л. Л., Харлашкин В. В., Новиков В. С., Босов В. П., Калинин С. С. 3653653/25–27 ; заявл. 21.10.83 ; опубл. 30.04.85, Бюл. № 16.

111. А. с. 1202897 СССР, B30 B1/40. Клиношарнирный пресс. Роганов Л. Л., Харлашкин В. В., Босов В. П., Калинин С. С., Новиков В. С. 3714659/25–27 ; заявл. 26.03.84 ; опубл. 07.01.86, Бюл. № 1.

112. А. с. 1318423 СССР, B30 B1/40. Клиновой пресс. Роганов Л. Л., Харлашкин В. В., Трофимов В. И. 4004593/31–27 ; заявл. 10.01.86 ; опубл. 23.06.87, Бюл. № 23.

113. Karnaukh S. G, Chosta N. V., Markov O. E., Kukhar V. V. Development and research of the press operating mechanism, made in the form of the wedge-joint mechanism with a curving wedge for separation operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. 116, pp. 3305–3314, https://doi.org/10.1007/s00170-021-07718-8.

114. Чоста Н. В., Карнаух С. Г. Клиношарнирный механизм с вогнутым клином. *Проблемы техники. технологии и экономики машиностроительного производства. Межвузовская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов*. Краматорск : ДГМА. 1996. С. 35–36.

115. Роганов Л. Л., Чоста Н. В., Карнаух С. Г. Совершенствование клиношарнирных механизмов прессов для разделительных процессов обработки давлением. *Обработка материалов давлением: Сборник научных трудов*.

Краматорск: ДГМА. 2009. 2(21). С. 333–338.

116. Карнаух С. Г., Чоста Н. В. Совершенствование клиношарнирных механизмов прессов для разделительных процессов обработки давлением. *Прогресивна техніка. технологія та інженерна освіта: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції*. Київ – Херсон. 2019. С. 90–92.

117. Karnaukh S. G., Chosta N. V., Markov O. E., Rizak P. I. Research of the press operating mechanism made in the form of the wedge-joint mechanism with a curving wedge for separation operations. *Матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу 2021»*. Херсон: ХНТУ. 2021. 7. С. 39–41.

118. Соловцов С. С., Тимонин А. И. Положительное влияние высокой скорости на качество коротких заготовок, отрезаемых от прутка. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1977. 3. С. 25–27.

119. Кириенко П. Г., Кобрин В. Н., Федосиенко И. Г. Скоростная машина для резки проката. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1998. 11. С. 35–37.

120. Кононенко В. Г. Оборудование и технология импульсной обработки материалов. Ленинград : Машиностроение. 1968. 50 с.

121. Роганов Л. Л., Кириенко Т. В., Роганов М. Л. Принцип «добавления энергии» в кузнечно-прессовых машинах периодического действия. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. ДДМА*. Краматорськ. 2007. С. 287–290.

122. Роганов Л. Л. Совершенствование технологий и машин для разных отраслей машиностроения на основе развития гидроупругих и клиношарнирных механизмов. *Обработка металлов давлением*. Краматорск : ДГМА. 2007. (27). С. 163–168.

123. Tarasov A. F., Cheng Kung Je, Li Wu, Pao Hsueh. The statico-dynamic forming of powders preforms on press-hammers. *Journal of engineering thermophysics*. 1998. 19(6). pp. 5–9.

124. Роганов Л. Л., Роганов М. Л. Гідропружний і клиношарнірний механізми в машинобудуванні: навчальний посібник. Краматорськ: ДДМА. 2008. 132 с.,

ISBN 978–966–379–233–0.

125. Круглова Е. Д. Исследование разделения сортового проката на заготовки неполной закрытой резкой с пассивным поперечным прижимом: дис…канд. техн. наук. 05.03.05. Москва. 1973. 215 с.

126. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г. Разработка безотходных способов разделения сортового проката и оборудование для его реализации. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: Збірник наукових праць*. Краматорськ. 2003. С. 376–380.

127. Соловцов С. С. Приоритетное направление совершенствования производства точных коротких заготовок из сортового проката. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1990. 7. С. 8–11.

128. Основные направления развития оборудования для резки проката за рубежом. *Обзор*. Москва : Машиностроение. 1976. 56 с.

129. Леонов И. С., Фуга Г. П., Крылов Г. Л. Ножницы для резки листового и сортового проката. Москва : Машиностроение. 1981. 320 с.

130. Катрахов А. Н. Комплекс с ножницами для резки круглого и квадратного проката. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1987. 2. С. 35–36.

131. Катрахов А. Н., Куркин И. М. Автоматизированный комплекс на базе ножниц для неполностью закрытой разрезки сортового проката. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1988. 2. С. 36–37.

132. Катрахов А. Н. Кривошипные ножницы для резки заготовок. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1999. 5. С. 35–36.

133. Макшанов Л. Я., Кудинов И. Е., Удалов П. П. Оборудование для раскроя сортового проката. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1981. 5. С. 26–28.

134. Яшаяев С. Ш. Резка заготовок от прутка сдвигом с дифференцированным зажимом. *Технология машиностроения*. 1963. 5. С. 15–21.

135. Карнаух С. Г., Чоста Н. В. Расчеты напряжений в зоне развития разрушающей трещины при холодной ломке изгибом. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. ДДМА*. Краматорськ. 2006. С. 327–331.

136. Финкель В. М. Физические основы торможения разрушения. Москва : Металлургия. 1977. 360 с.

137. Коликов А. П., Полухин В. И., Крупин А. В. Новые процессы деформации металлов и сплавов: учебное пособие для ВУЗов. Москва : Высшая школа. 1986. 351 с.

138. Тимощенко В. А., Кириловский В. В. Влияние условий нагружения на характер пластического течения при трехточечной схеме ломки проката. *Известия вузов.* 1986. 2. С. 122–126.

139. Гришаев В. В., Высоцкий Е. Н. Траектория краевой трещины при изгибе стержня. *Проблемы прочности*. 1989. 6. С. 52–56.

140. Гришаев В. В., Высоцкий Е. Н. Исследование скорости роста трещины в изогнутом стержне. *Проблемы прочности*. 1991. 7. С. 44–47.

141. Цыбулько А. Е., Бахтин Д. Е., Романенко Е. А. Анализ критериев нарушения прочности материалов в хрупком и пластическом состояниях путем отрыва и сдвига при сложном нагружении. *Кузнечно-штамповочное производство*. 2008. 4. С. 22–24.

142. Тимощенко В. А., Тока А. В. Чистовая обработка толстолистовых заготовок. Кишинев: Штиница. 1984. 88 с.

143. Тимощенко В. А., Богоев В. С. Разделение листового металла эластичными средами. Кишинев: Штиница. 1988. 107 с.

144. Безухов Н. И. Теория упругости. пластичности и ползучести. М.: Высшая школа. 1969. 258 с.

145. Бурман З. И., Аксенов В. М., Лукашенко В. И. Суперэлементный расчет подкрепленных оболочек. Москва : Машиностроение. 1982. 256 с.

146. Бурман З. И., Тимофеев М. Т. Математическое обеспечение для матричных расчетов тонколистовых пространственных конструкций с применением МКЭ. *Вопросы оптимального использования ЭЦВМ в расчете сложных конструкций: Сб. науч. тр. КГУ.* Казань. 1973. С. 87–94.

147. Голенков В. А., Радченко С. Ю. Технологические процессы обработки металлов давлением с локальным нагружением заготовки. Москва :

Машиностроение. 1977. 226 с.

148. Голенков В. А., Кондрашов В. И., Зыкова З. П. Математическое моделирование процессов обработки материалов давлением : учебное пособие. Москва : Машиностроение. 1994. 272 с.

149. Радченко С. Ю., Маркин Н. И., Филин А. В. Исследование процесса отрезки точных коротких заготовок. *Заготовительное производство в машиностроении*. 2003. 3. С. 45–48.

150. Алієва Л. І., Грушко О. В. Оцінка технологічної деформівності при обробці металів тиском з урахуванням схем напруженого стану. *Научный Вестник ДГМА*. Краматорск : ДГМА. 2015. 1(16Е). С. 4–21. Электронный доступ: http://www.dgma.donetsk.ua/ science_public/science_vesnik/№1(16E)_2015/article/3.pdf.

151. Огородников В. А., Деревенько И. А., Алиева Л. И. Ресурс пластичности металлов при холодном объемном формоизменении : монография. Винница : ВНТУ. 2016. 176 с., ISBN 978–966–2696–69–1.

152. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. Киев : Вища школа. 1983. 175 с.

153. Друянов Б. А. Прикладная теория пластичности пористых тел. Москва : Машиностроение. 1989. 168 с.

154. Богатов А. А., Мижирицкий О. И., Смирнов С. В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. Москва. Металлургия. 1984. 144 с.

155. Колмогоров В. Л. Напряжения. Деформации. Разрушение. Москва : Металлургия. 1970. 229 с.

156. Грушко А. В. Карты материалов в холодной обработке давлением : монография. Винница : ВНТУ. 2015. 348 с.

157. Матвийчук В. А., Алиев И. С. Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов : монография. Краматорск : ДГМА. 2009. 268 с.

158. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении. Киев. 1989. 152 с.

159. Калпин Ю. Г., Перфилов В. И., Петров П. А., Рябов В. А.,

Филиппов Ю. К. Сопротивление деформации и пластичность металлов при обработке давлением. Москва : Машиностроение. 2011. 244 с.

160. Михалевич В. М. Тензорні модели накопичення пошкоджень. Винниця : «Универсум–Винниця». 1998. 195 с.

161. Сивак И. О. Пластичность металлов при холодной пластической деформации. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр.* Краматорськ–Слов'янськ. 2000. С. 168–171.

162. Огородников В. А., Кирица И. Ю., Музычук В. И. Диаграммы пластичности и особенности их построения. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр.* Краматорськ : ДДМА. 2006. С. 251–255.

163. Дель Г. Д., Огородников В. А., Нахайчук В. Г. Критерий деформируемости металлов при обработке давлением. *Известия ВУЗов*. Машиностроение. 1975. 4. С. 19–24.

164. Дель Г. Д. Пластичность деформированного металла. *Физика и техника высоких давлений*. 1983. 11. С. 28–32.

165. Огородников В. А., Грушко А. В., Деревенько И. А. Моделирование процессов обработки давлением на основе гипотезы о силовом и кинематическом подобии параметров деформирования. *Обработка материалов давлением : Сборник научных трудов.* Краматорск : ДГМА. 2012. 4. С. 46–52.

166. Shtern M. B., Kuzmov A. V. Effect of a third invariant on the properties and structure of constitutive relationships for powder materials. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 42. 2003. pp. 329–335.

167. Wierzborski T., Bao Y., Lee W. Y., Y. Bai Y. Calibration and evaluation of seven fracture models. *International journal of mechanical sciences*. 2005. 47. pp. 719–743.

168. Смирнов-Аляев Г. А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. Инженерные расчеты процессов конечного формоизменения материалов. Ленинград : Машиностроение. 1978. 368 с.

169. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов. Физикомеханические

основы пластической деформации. Москва : Металлургиздат. 1961. 376 с.

170. Смирнов В. С., Григорьев А. К., Пакудин В. П., Садовниченко Б. В. Сопротивление деформации и пластичность металлов (при обработке давлением). Москва : Металлургия. 1975. 272 с.

171. Огородников В. А., Деревенько И. А., Алиева Л. И. Параметры напряженного состояния диаграмм пластичности. *Обработка материалов давлением : Сборник научных трудов*. Краматорск : ДГМА. 2011. 4(29). С 10–18.

172. Огородников В. А., Алиева Л. И., Кожушаный В. М., Деревенько И. А. Параметры модели, формирующей карту материала в процесах обработки давлением. *Обработка материалов давлением : Сборник научных трудов.* Краматорск : ДГМА. 2011. 1(26). С. 91–98.

173. Краснопольский М. А. Поперечное выдавливание при изготовлении коллекторов электрических машин. *Вестник машиностроения*. 1964. 2. С. 43–46.

174. Степанский Л. Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением. Москва : Машиностроение. 1979. 215 с.

175. Алиева Л. И. Совершенствование процессов комбинированного выдавливания: монография. Краматорск : ООО «Тираж – 51». 2018. 352 с., ISBN 978–966–379–846–2.

176. Грушко О. В., Огороднiков В. А., Побережний М. І., Єленич М. П. Побудова кривої течії матеріалу за границями міцності і текучості. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2009. 6. С. 90–93.

177. Алиева Л. И. Оценка предельного формоизменения при радиальном выдавливании с использованием энергетического критерия. *Известия Тульского государственного университета. Серия «Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением»*. 2006. 1. С. 199–206.

178. Власов А. В. Методика прогнозирования механических свойств материала после холодной деформации по результатам математического моделирования. *Обработка материалов давлением: Сборник научных трудов.* Краматорск : ДГМА, 2013, 1 (34). С. 72–78.

179. Закиров Р. А., Трусковский В. И. Численное моделирование процесса

разделения сортового проката плоскими клиновыми ножами. *Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов: Сб. тр. международной науч.- техн. конф.*– Санкт-Петербург. 2005. С. 34–36.

180. Закиров Р.А. Математическая модель разделения проката плоскими клиновыми ножами. *Наука и технологии. Избранные труды Российской школы «К 70-летию Г. П. Вяткина».* Москва : РАН. С. 20–21.

181. Томсен Э., Янг К., Кобаяши Ш. Механика пластической деформации при обработке металлов. Москва : Машиностроение. 1969. 503 с.

182. Соловцов С. С., Круглова Е. Д. Расчет поля напряжений в очаге пластической деформации при неполной закрытой резке. *Известия ВУЗов*. Машиностроение. 1972. 11. С. 140–144.

183. Унксов Е. П. Инженерные методы расчета усилий при обработке металлов давлением. Москва : Машгиз. 1957. 164 с.

184. Унксов Е. П. Инженерная теория пластичности. Методы расчета усилий деформирования. Москва : Машгиз. 1959. 268 с.

185. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. Москва : Машиностроение. 1971. 232 с.

186. Соколов Л. Д. Сопротивление металлов пластической деформации. Москва : Металлургиздат. 1963. 284 с.

187. Тимощенко В. А. Нарастание деформации и разрушение заготовки при резке. *Известия ВУЗов*. Машиностроение. 1989. 8. С. 87–90.

188. Тимощенко В. А., Собакин Е. Д. Исследование напряженного состояния при резке полосы сдвигом. *Известия ВУЗов*. Машиностроение. 1979. 10. С. 126–130.

189. Партон В. З., Борисковский В. Г. Динамика хрупкого разрушения. Москва : Машиностроение. 1988. 240 с.

190. Биба Н. В., Стебунов С. А. Разработка и совершенствование технологии ковки и штамповки с помощью QForm3D. Кузнечно-штамповочное производство : *Перспективы и развитие : Сб. научных трудов*. Екатеринбург : ГОУ ВПО «УГТУ–УПИ». 2005. 884 с., ISBN 5–321–00–172–3.

191. Биба Н. В., Стебунов С. А., Гладков Ю. А., Мордвинцев П. С. Qform –

универсальная и эффективна программа для моделирования коки и штамповки. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2011. 1. С. 36–42.

192. Fereshteh-Saniee F., Daneshzad-Moghaddam B. A new CAD system for finisher die design of an axisymmetric forging component with arbitrary profile. *Journal of materials processing technology*. 2004. 153(1). pp. 157–163.

193. Третьяк В. В., Долматов А. И., Федорова А. С., Бреус С. В. Разработка программного комплекса для расчета параметров импульсной объемной штамповки. *Вестник двигателестроения*. 2014. С. 176–180.

194. Матвеев С. А., Мамутов В. С., Иванов К. М. Возможности конечно–элементного анализа при решении технологических задач обработки металлов давлением. *Металлообработка*. 2003. 1. С. 23–28.

195. Костылев Б. И., Марголин В. З. Решение МКЭ динамической упругопластической задачи механики разрушения. Сообщение 1. Динамическая упругопластическая задача. *Проблемы прочности*. 1990. 7. С. 5–11.

196. Унксов Е. П., Джонсон У., Колмогоров В. Л. Теория пластических деформаций металлов / под ред. Унксова Е. П., Овчинникова А. Г. Москва : Машиностроение. 1983. 598 с.

197. Луценко В. А., Боровик П. В., Коваленко О. А. Конечно-элементное моделирование разделительных операций листовой штамповки. *Обработка металлов давлением*. 3(24). 2010. С. 15–19.

198. Воронцов А. Л. О корректном построении и проверке теоретических моделей процессов обработки металлов давлением. *Кузнечно-штамповочное производство*. 2011. 6. С. 3–9.

199. Дмитриев А. В., Воронцов А. Л. Анализ решений, выполненных методом конечных элементов. *Производство проката*. 2004. 4. С. 3–11.

200. Ренне И. П. Экспериментальные методы исследования пластического формоизменения в процессах обработки металлов давлением с помощью делительной сетки. Тула. 1970. 147 с.

201. Сопротивление материалов пластическому деформированию в

приложениях к процессам обработки металлов давлением / под ред. Лясникова А. В. Санкт-Петербург : Внешторгиздат. 1995. 527 с.

202. Дель Г. Д. Технологическая механика. Москва : Машиностроение. 1978. 174 с.

203. Полухин П. Н., Воронцов В. К., Кудрин А. Б., Чиченов Н. А. Деформации и напряжения при обработке металлов давлением. Москва : Машиностроение. 1974. 336 с.

204. Петухов П. З., Казанцев А. В. Применение тензометрии в машиностроении. Москва : Машгиз, 1956. 366 с.

205. Карнаух С. Г. Анализ безотходных способов разделения сортового проката на мерные заготовки. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: Збірник наукових праць*. Краматорськ–Слов'янськ. 2000. С. 400–403.

206. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. Анализ технологий и оборудования для разделения труб на мерные заготовки. Сообщение 1. *Обработка материалов давлением: Сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА. 2013. 1(34). С.120–128.

207. Одрин В. М. Метод морфологического анализа технических систем. Москва : ВНИИПИ. 1989. 312 с.

208. Саушкин Б. П. Комбинированные методы обработки в машиностроительном производстве. *Металлообработка*. 2003. С. 8–17.

209. Саушкин Б. П., Айзельман И. А. Основы технологии. Воронеж : Изд-во ВГТУ. 1998. 180 с.

210. Подураев В. Н. Технология физико-химических методов обработки. Москва : Машиностроение. 1985. 264 с.

211. Смоленцев В. П., Болдырев А. И., Кузовкин А. В. Комбинированные методы обработки / под ред. Смоленцева В. П. Воронеж : Изд-во ВГТУ. 1996. 168 с.

212. Мордехай В. М. Технологические основы разработки комбинированных электрофизических и электрохимических методов обработки. *Вестник машиностроения*. 1993. 4. С. 38–42.

213. Волков Ю. С., Лившиц А. Л. Введение в теорию размерного формообразования электро-физикохимическими методами. Київ : Вища школа. 1978. 120 с.

214. Круглов В. В., Сорокин В. М., Пучков В.П. Электрофизикохимические и комбинированные методы обработки : учеб. пособие. Нижний Новгород : НГТУ. 1998. 93 с.

215. Карнаух С. Г., Чоста Н. В. Разработка новых способов разделения сортового проката и оборудования для их реализации с использованием методики синтеза комбинированных методов обработки. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. Краматорськ : ДДМА. 2006. 1(3). С. 105–111.

216. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов. Справочное пособие в 3-х томах. Т. II. Методы исследования механических свойств металлов : Машиностроение. 1974. 320 с.

217. Фадеев Ю. И., Основин В. А. Влияние боковых надрезов на характеристики вязкости разрушения конструкционной стали. Заводская лаборатория. 1978, 1. С. 103–106.

218. Федина Т. С. Разделение труб на заготовки. *Сборник аналитических материалов*. ЦНИИНТИКПК. 1989. 10 с.

219. Карнаух С. Г., Карнаух Д. С., Чоста Н. В. Разработка оборудования для отрезки сортового проката (труб). *Обработка материалов давлением: Сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА. 2014. 1(38). С.210–214.

220. Карнаух С. Г., Карнаух Д. С., Чоста Н. В. Разработка прогрессивных способов и конструкций оборудования для разделения сортового проката (труб) на мерные заготовки. *Обработка материалов давлением: Сборник научных трудов.* Краматорск: ДГМА. 2015. 1(40). С. 59–68.

221. Карнаух С. Г. Разработка оборудования для реализации нового способа «сдвиг – ломка» для разделения проката (труб) на мерные заготовки. *Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов.* Краматорск: ДГМА. 2016. 1(42). С. 250–258.

222. Карнаух С. Г. Разработка и исследование оборудования для разделения

сортового проката на мерные заготовки. *Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов.* Краматорск: ДГМА. 2017. 1(44). С. 222–228.

223. Карнаух С. Г. Совершенствование оборудования для разделения сортового проката на мерные заготовки. *Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов.* Краматорск: ДГМА. 2017. 2(45). С. 154–160.

224. Карнаух С. Г. Разработка и исследование оборудования для разделения сортового проката на мерные заготовки. *Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості освіти»*. Київ. 2018. С. 214–219.

225. Карнаух С. Г. Совершенствование механических способов разделения труб на мерные заготовки. *Тези доповідей X міжнародної науково-технічної конференції «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії»*. Київ. 2018. С. 45–46.

226. Карнаух С. Г. Перспективні технології заготівельного виробництва та обладнання для їх реалізації. *Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов.* Краматорск: ДГМА. 2019. 2(49). С. 202–211, https://doi.org/10.37142/2076-2151/2019-2(49)202.

227. Карнаух С. Г., Чоста Н. В. Розробка перспективних технологій і конструкцій обладнання для безвідхідного розділення прокату. *Обробка матеріалів тиском. Materials Working by Pressure*. Краматорськ : ДДМА. 2023. 1(52). С. 170–181, https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1(52)170.

228. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Владимиров Э. А., Шоленинов В. Е. Исследование установки для отрезки сортового проката эксцентричным закручиванием. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: Збірник наукових праць ДДМА*. Краматорськ. 2000. С. 419–423.

229. Карнаух С. Г., Бегунов А. А., Добряк С. К., Чоста Н. В. Анализ процесса холодной ломки проката изгибом с перераспределением зон растягивающих и сжимающих напряжений по сечению проката. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. Краматорськ: ДДМА. 2005. 1. С. 53–56.

230. Пат. 116200 Україна, B23D 23/00. Спосіб ламання прокату (труб). Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. u201612116; заявл. 29.11.2016; опубл. 10.05.2017. Бюл. №9.

231. Пат. 112669 Україна, B23D 31/00, B23D 23/00. Пристрій для ломки прокату згином. Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. u201606662; заявл. 17.06.2016; опубл. 26.12.2016. Бюл. №24.

232. Пат. 147486 Україна, B23D 23/00, B23D 31/00. Гідродинамічний хладнолом для розділення труб на мірні заготовки. Карнаух С. Г., Марков О. Є., Чоста Н. В. u202007833; заявл. 08.12.2020; опубл. 12.05.2021. Бюл. №19.

233. Пат. 106828 Україна, B23D 27/00. Установка для ломки сортового прокату (труб). Карнаух С. Г., Карнаух Д. С., Чоста Н. В. u201510764; заявл. 05.11.2015; опубл. 10.05.2016. Бюл. №9.

234. Пат. 107698 Україна, B23D 27/00. Спосіб ломки труб. Карнаух С. Г., Карнаух Д. С., Чоста Н. В. u201510763; заявл. 05.11.2015; опубл. 24.06.2016. Бюл. №12.

235. Пат. 74405 Україна, B23D 23/00. Пристрій для холодної ломки труб. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. u201204703; заявл. 17.04.2012; опубл. 25.10.2012. Бюл. №20.

236. Пат. 85225 Україна, B23D 31/00, B23D 23/00. Пристрій для холодної ломки труб. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. u201306948; заявл. 03.06.2013; опубл. 11.11.2013. Бюл. №21.

237. Банкетов А. Н. Классификация кузнечных машин и промышленная терминология. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1988. 6. С. 28–31.

238. Бочаров Ю. А. Структурно-морфологическая классификация кузнечно-штамповочных машин и установок. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1974. 11. С. 30–34.

239. Ланской Е. Н., Банкетов А. Н. Элементы расчета деталей и узлов кривошипных прессов. Москва : Машиностроение. 1966. 380 с.

240. Живов Л. И., Овчинников А. Г. Кузнечно-штамповочное оборудование. Прессы. Киев : Вища школа. 1981. 376 с.

241. Бочаров Ю. А., Сазонов А. В., Ежов А. С. Перспективы создания мощного кузнечно-прессового оборудования. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1985. 4. С. 28–30.

242. А. с. 816780 СССР, B30 B1/40. Клиновой пресс. Роганов Л. Л., Харлашкин В. В. 2380053/25–27 ; заявл. 26.08.1976 ; опубл. 30.03.1981. Бюл. № 12.

243. А. с. 1214477 СССР, B30 B1/40. Клиновой пресс. Роганов Л. Л., Харлашкин В. В., Трофимов В. И. 3807038/25–27; заявл. 31.10.1984; опубл. 28.02.1986. Бюл. № 8.

244. А. с. 1270024 СССР, B30 B1/40. Клиновой пресс. Роганов Л. Л., Харлашкин В. В., Трофимов В. И. 3908187/25–27; заявл. 05.06.1985; опубл. 15.11.1986. Бюл. № 42.

245. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Чоста Н. В., Шоленинов В. Е. Исследование механизмов с переменной клиновидностью для технологических процессов обработки металлов давлением с максимальной начальной силой. *Обработка материалов давлением: Сборник научных трудов.* Краматорск: ДГМА. 2008. 1(19). С. 342–347.

246. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. Совершенствование исполнительных механизмов машин для реализации разделительных операций. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. Луганськ. 2011. 2(156). С. 27–33.

247. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. Исследование процесса разделения труб способом отрезки эксцентричным закручиванием. *Обработка материалов давлением: Сборник научных трудов.* Краматорск: ДГМА. 2012. 1(30). С. 233–238.

248. Скуднов В. А. Предельные пластические деформации металлов. Москва . Металлургия. 1989. 176 с. ISBN 5–229–00308–1.

249. Skudnov V. A., Safronov A. S., Khlybov A. A. Estimation of structural sensitivity of pipe steels ultimate strain to pipelines service life using complex energy criteria of synergy fracture. *Izvestiya ferrous metallurgy*. 2019. 62(1). pp. 25–33.

250. Myl’nikov V. V., Skudnov V. A. Influence of different state parameters on the behavior of fatigue curves. *Izvestiya ferrous metallurgy*. 2018, 61(3), pp. 244–250.

251. Greben’kov S. K., Skudnov V. A., Shatsov A. A. Deformation and fracture of low-carbon martensitic steels. *Metal science and heat treatment*. 2016. 58(1). pp. 91–96.

252. Skudnov V. A. Influence of heat treatment temperature on synergistic criteria of steel fracture. *Engineering technology*. 2003. 2. pp. 6–7.

253. Карнаух С. Г., Винников М. А. Применение критериев разрушения материалов при выборе способа разделения сортового проката. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. ДДМА*. Краматорськ – Слов'янськ. 2003. С. 329–337.

254. Karnaukh S. G., Chosta N. V. The use classifier of material facture criteria. *Матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології. матеріали й обладнання в ливарному виробництві»*. Краматорськ : ДДМА. 2021. С. 158–159.

255. Классификация и кластер / под. ред. Дж. Вэн Райэин. Москва : Мир. 1980. 390 с.

256. Глова В. И., Аникин И. В., Аджели М. А. Мягкие вычисления и их приложения. Москва : Наука. 2000. 312 с.

257. Дюк В., Самойленко А. Data Mining. Санкт-Петербург : Питер. 2001. 368 с.

258. Терехов С. А. Нейросетевые информационные модели сложных инженерных систем. *Нейроинформатика*. Новосибирск : Наука. 1998. С. 101–136.

259. Сетлак Г. Идентификация структуры нечеткой системы при помощи нейронных сетей. *Искусственный интеллект*. 2003. 2. С. 44–51.

260. Дебок Г., Кохонен Т. Анализ финансовых данных с помощью самоорганизующихся карт. Москва : Альпина Паблишер. 2001. 368 с.

261. Горбань А. Н., Зиновьев А. Ю., Питенко А. А. Визуализация данных методом упругих карт. *Информационные технологии.* Москва : Машиностроение. 6. 2000. С. 26–35.

262. Айвазян С. А., Бежаева З. И., Староверов О. В. Классификация многомерных наблюдений. Москва : Статистика. 1974. 240 с.

263. Monaghan J. An investigation of plane-strain lateral extrusion to form components having staggered branches. *Journal of materials processing technology*. 1998. 77. pp. 305–313.

264. Иванов К. М., Шевченко С. В., Юргенсон Э. Е. Метод конечних элементов в технических задачах ОМД : учеб. пособие. Санкт–Петербург : Ин–т машиностроения, 2000. 217 с.

265. Владимиров Э. А., Шоленинов В. Е. Комплексный расчет исполнительного механизма пресса с группами Ассура произвольной структуры. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр.* Краматорськ : ДДМА. 2007. С. 316–321.

266. Турчак Л. И. Основы численных методов. Москва : Физмат. 2002. 300 с.

267. Карнаух С. Г., Карнаух Д. С., Чоста Н. В., Бегунов А. А. Исследование силовых параметров процессов внедрения жесткого клинового инструмента в прокат. Металлообработка. 2010. 3(57). Санкт-Петербург. С. 33–35.

268. Айвазян С. А. Статистическое моделирование зависимостей. Москва : Металлургия. 1968. 227 с.

269. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособие для вузов. Москва : Высшая школа. 2002. 479 с.

270. Афонькин М. Г., Магницкая М. В. Производство заготовок в машиностроении. Ленинград : Машиностроение. 1987. 256 с.

271. Карнаух С. Г. Методика вибору безвідходного способу поділу сортового прокату (труб) на мірні заготовки. *Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка. технологія та інженерна освіта».* Київ. 2017. С. 181–183.

272. Терехина А. Ю. Анализ данных методами многомерного шкалирования. Москва : Наука, 1986. 168 с.

273. Винников М. А., Карнаух С. Г. Выбор информативной системы критериев разделения материалов. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у*

*металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. ДДМА*. Краматорськ – Слов'янськ. 2004. С. 391–397.

274. Карнаух С. Г., Винников М. А., Карнаух Д. С. Применение критериев разрушения материалов для выбора способа разделения сортового проката. *Металлообработка*. 2011. 1(61). Санкт-Петербург. С. 25–31.

275. Karnaukh S. G., Markov O. E., KukharV. V., Shapoval A. A. Classification of steels according to their sensitivity to fracture using a synergetic model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. 119. pp. 5277–5287, https://doi.org/10.1007/s00170-022-08653-y.

276. Karnaukh S. G. Development of the choice procedure for separation method of section iron complex criteria of materials destruction. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2017. 2(80). pp. 31–38, https://doi.org/10.20535/2521-1943.2017.80.113172.

277. ДСТУ ГОСТ 14019:2004. Матеріали металеві. Метод випробування на згин (ГОСТ 14019-2003 (ИСО 7438:1985), IDT) : Держстандарт України. 2003.

278. Глинер Р. Е. Определение предельной пластичности полосового проката при изгибе. *Кузнечно-штамповочное производство*. 2008. 10. С. 41–44.

279. Gliner R. E., Skoblo A. V., Nikolaeva L. N., Maiorov M. A. Analysis of the relationship between longitudinal and transverse strains in sheet steel in tensile tests. *Industrial laborat*ory. 1983. 49 (11). pp. 1200–1202, https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0020845988&partnerID=40&md5=a026cc94915a8c66f1c98d44287cc49a.

280. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. Определение предельной пластичности сортового проката при разделении способом ломки изгибом. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. Краматорськ : ДДМА. 2010. 1(18). С. 257–261.

281. Karnaukh S. G., Markov O. E., Shapoval A. A., Hrudkina N. S. Selecting a cutting method for workpieces before stamping using synergetic fracture criteria and a deformability limit determination technique for separating processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. 129. pp. 5447–5455,

https://doi.org/10.1007/s00170-023-12627-z.

282. Пат. 130634 Україна, B23D 23/00. Спосіб ломання прокату. Карнаух С. Г. u201710207; заявл. 23.10.2017; опубл. 26.12.2018. Бюл. №24.

283. Карнаух С. Г., Бігунов О. О., Мучник О. Є. Дослідження процесу статико-динамічного навантаження зразків за схемою триточкового холодного ламання згином на прес-молотах. *Машинознавство*. 2000. 12. С. 31–36.

284. Karnaukh S. G. Studying the process of static-dynamic loading of a preform according to the scheme of three-point breaking by bending in press-hammers. *Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo. Obrabotka Metallov Davleniem.* 2001. 2. С. 8–12, https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0035763635&origin=resultslist.

285. Карнаух С. Г., Карнаух Д. С., Чоста Н. В., Коляденко А. В. Разработка специализированного оборудования статико-динамического действия для разделения проката (труб) на мерные заготовки. *Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов.* Краматорск: ДГМА. 2016. 2(43). С. 152–160.

286. Карнаух С. Г. Дослідження енергосилових характеристик обладнання з гідропружним приводом. *Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов.* Краматорск: ДГМА. 2020. 1(50). С. 272–281, https://doi.org/10.37142/2076-2151/2020-1(50)243.

287. Карнаух С. Г., Чоста Н. В. Визначення енергосилових параметрів високошвидкісних машин з гідропружним приводом. *Вісник національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки металів у машинобудуванні та металургії. Збірник наукових праць*. Харків. 2020. 2(1356). С. 13–18.

288. Karnaukh S. G., Aliiev I. S. Research of process of division of grade rolling on the measured blanks by method of breaking bend at static and shock loading. *Engineering, energy, transport. Scientific journals of Vinnitsa national agrarian university*. Вінниця: ВНТУ. 2021. 112. 1. С. 81–87, https://doi.org/10.37128/2520-6168-2021-1-10.

289. Рокач И. В. О численном моделировании экспериментов по определению динамической трещиностойкости материалов. *Проблемы прочности*. 1992. 7.

С. 22–26.

290. Красовский А. Я., Орыняк И. В., Наумов А. В. К динамике процесса ударных испытаний образцов на сосредоточенный изгиб. Сообщение 1. *Проблемы прочности*. 1989. 5. С. 25–30.

291. Красовский А. Я., Орыняк И. В., Наумов А. В. К динамике процесса ударных испытаний образцов на сосредоточенный изгиб. Сообщение 2. *Проблемы прочности*. 1989. 6. С. 3–7.

292. Karnaukh S. G., Markov O. E., Kukhar V. V., Shapoval A. A. Research of the rolled stock separating into workpieces using breaking by bending with dynamic and static-dynamic force. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. 120. pp. 2763–2776, https://doi.org/10.1007/s00170-022-08902-0.

293. Карнаух С. Г. Совершенствование безотходных энергосберегающих способов разделения сортового металлопроката и оборудования для получения заготовок высокого качества : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05. Краматорск. 1999. 221 с.

294. Калиткин Н. Н. Численные методы. Москва : Наука. 1978. 512 с.

295. Karnaukh S. G., Markov O. E., Aliiev I. S. Study of the rolled stock separating into workpieces using breaking by bending with static-dynamic loading. *International scientific conference «MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education»*. Riga, Latvia : «Baltija Publishing». 2023. 1. pp. 40–43, https://doi.org/10.30525/978-9934-26-361-3-11.

296. Карнаух С. Г. Экспериментальные исследования процесса разделения проката по схеме трехточечной холодной ломки изгибом при статико-динамическом нагружении. *Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов.* Краматорск: ДГМА. 2019. 1(48). С. 110–117.

297. Карнаух С. Г., Винников М. А. Экспериментальные исследования процесса трехточечной ломки изгибом. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: Збірник наукових праць*. Краматорськ. 2001. С. 83–86.

298. Карнаух С. Г., Чоста Н. В. Силовые характеристики безотходных

процессов разделения сортового проката на мерные заготовки. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. ДДМА*. Краматорськ. 2007. С. 247–252.

299. Бегунов А. А., Карнаух С. Г. Силовые характеристики безотходных способов разделения проката. *Сборник трудов Седьмой конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GmbH* / Под ред. Шацкого А. С. Москва: Полигон – пресс. 2007. С. 360–365.

300. Karnaukh S. G., Markov O. E. Study of the process of breaking rolled steel by bending for stamping under impact and combined loading. *«MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education»*. Scientific monograph. Riga, Latvia : Baltija Publishing. 2023. pp. 20–40, https://doi.org/10.30525/978-9934-26-382-8-2.

301. Karnaukh S. G. Research of the influence of deformation speed on energy and power adjectives of the process of three-point cold bend breaking. *Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції*. Київ. 2020. С. 413–415.

302. Карнаух С. Г., Бегунов А. А., Добряк С. К., Винников М. А., Чоста Н. В. Экспериментальные исследования процесса трехточечной ломки проката изгибом при статическом и динамическом нагружении. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. ДДМА*. Краматорськ. 2005. С. 334–341.

303. Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. Влияние скорости нагружения на энергию зарождения и распространения трещин в образцах из разных материалов при трехточечной холодной ломке проката изгибом. *Металлообработка.* 2009. 3(51). Санкт-Петербург. С. 44–47.

304. Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. Исследование влияния скорости деформирования на силовые характеристики процесса трехточечной холодной ломки изгибом. *Металлообработка*. 2010. 1(55). Санкт-Петербург. С. 34–39.

305. Кондряков Е. А., Жмака В. Н., Харченко В. В., Бабуцкий А. И., Романов С. В. Система измерения деформаций и усилий при динамических

испытаниях материалов. *Проблемы прочности*. 2005, 3. С. 140–145.

306. Харченко В. В., Кондряков Е. А., Жмака В. Н. Влияние температуры и скорости нагружения на энергию зарождения и распространения трещин в образцах Шарпи из углеродистых сталей. *Проблемы прочности*. 2006. 5. С. 120–127.

307. Karnaukh S. G., Karnaukh D. S. Research of the influence of deformation speed on energy and power adjectives of the process of three-point cold bend breaking and on alignment integrity of raw parts. *Metallurgical and Mining Industry*. 2011. 3. 3. pp. 107–114, https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84904025526&origin=resultslist.

308. Тарасов А. Ф., Роганов Л. Л., Карнаух С. Г. Расчет статико – динамического нагружения заготовок на пресс-молотах при одинаковом направлении статического и ударного усилия. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії : Збірник наукових праць*. Краматорськ. 1994. 2. С. 83–86.

309. Карнаух С. Г. Підвищення якості заготовок. отриманих способом ломки згином при статико-динамічному навантаженні на прес-молоті. *Обробка матеріалів тиском. Materials Working by Pressure*. Краматорськ: ДДМА. 2022. 1(51). С. 123–133, https://doi.org/10.37142/2076-2151/2022-1(51)123.

310. Пат. 111267 Україна, B30B1/00. Прес-молот з клиношарнірним механізмом з увігнутим клином. Карнаух С. Г., Карнаух Д. С., Чоста Н. В., Коляденко А. В. u201603526; заявл. 04.04.2016; опубл. 10.11.2016. Бюл. №21.

311. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Чоста Н. В. Разработка нового типа кузнечно-прессового оборудования для разделительных операций. *Металлообработка*. 2010. 6(60). Санкт-Петербург. С. 28–34.

312. Пат. 154562 Україна, B23D 23/00. Клиновий прес для розділення прокату. Карнаух С. Г., Марков О. Є., Чоста Н. В. u202302171; заявл. 08.05.2023; опубл. 22.11.2023. Бюл. №47.

313. Алієв І. С., Марков О. Є., Карнаух С. Г. Розробка штампів для розділення профілів складної конфігурації. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XX Міжнародної науково-технічної конференції* /

за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ-Тернопіль: ДДМА. 2022. С. 25–27.

314. Алієв І. С., Марков О. Є., Карнаух С. Г. Розробка та дослідження конструкцій штампів для розділення профілів складної конфігурації на мірні заготовки. *Обробка матеріалів тиском. Materials Working by Pressure*. Краматорськ : ДДМА. 2022. 1(51). С. 154–165, https://doi.org/10.37142/2076-2151/2022-1(51)154.

315. Сердюк А. И. Особенности технологии безотходного разделения фасонных П – образных профилей в штампах со сложным движением ножей. Мариуполь : ПГТУ. 2015. 139 с.

316. Карнаух С. Г. Исследование процесса разделения труб способом отрезки эксцентричным закручиванием. *Республиканский научный журнал «Вестник Карагандинского государственного индустриального университета»*. Караганда: КГИУ. 2018. 2 (21). С. 222–228.

317. Карнаух С. Г. Розробка та дослідження перспективних схем поділу труб на мірні заготовки. *Scientific journals of Vinnitsa national agrarian university.* Вінниця: ВНТУ. 2021. 112. 1. С. 30–37, https://doi.org/10.37128/2520-6168-2021-1-4.

318. Пат. 51501 Україна, B23D 31/00, B23D 23/00. Пристрій для поділу сортового прокату на мірні заготовки способом ексцентричного закручування. Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. u200911584; заявл. 13.11.2009; опубл. 26.07.2010. Бюл. №14.

319. Karnaukh S. G., Markov O. E., Lysenko A. A. Research on the new process of separating hollow work-piece by eccentric torsion cutting for stamping. *FME Transactions journal*. 2023. 52 (1). pp. 29–36, https://doi.org/10.5937/fme2401029K.

320. Пат. 23759 Україна, B23D 31/00, B23D 23/00. Пристрій для поділу сортового прокату на мірні заготовки відрізкою зсувом. Карнаух С. Г., Чоста Н. В. u200613705; заявл. 25.12.2006; опубл. 11.06.2007. Бюл. 8.

321. Пат. 24635 Україна, B 23D 31/00, B23D 23/00. Пристрій для поділу сортового прокату на мірні заготовки відрізанням зсувом. Карнаух С. Г., Чоста Н. В. u200701465; заявл. 12.02.2007; опубл. 10.07.2007. Бюл. 10.

322. Пат. 51499 Україна, МКИ B23D 23/00, B23D 31/00. Пристрій для поділу сортового прокату способом ексцентричного закручування. Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. u200911580; заявл. 13.11.2009; опубл. 26.07.2010. Бюл. №14.

323. Пат. 125304 Україна, B23D 15/00. Пристрій для відрізки прокату. Карнаух С. Г. u201710707; заявл. 03.11.2017; опубл. 10.05.2018. Бюл. №9.

324. Пат. 134608 Україна, B23D 23/00. Клиновий прес. Карнаух С. Г., Чоста Н. В. u201812759; заявл. 21.12.2018; опубл. 27.05.2019. Бюл. №10.

325. Пат. 142424 Україна, B23D 23/00. Клиновий прес. Карнаух С. Г., Чоста Н. В. u201910277; заявл. 10.10.2019; опубл. 10.06.2020. Бюл. №11.

326. Живов Л. И. К вопросу о динамике вырубного гидравлического пресса. *Известия вузов*. 1973. 6. С. 21–25.

327. Карнаух С. Г., Роганов Л. Л., Тарасов А. Ф. К динамике разделения проката на мерные заготовки на гидравлическом прессе при мгновенном исчезновении технологической нагрузки. *Импульсная обработка металлов давлением*. Харьков. 1997. С. 123–133.

328. Синицкий В. М. Исследование динамики быстроходных гидравлических прессов. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1995. 8. С. 22–25.

329. Федоринов В. А., Карнаух С. Г., Кулик А. Н. Разделение полос на мерные заготовки в условиях мелкосерийного производства *Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов.* Краматорск: ДГМА. 2016. 2(43). С. 128–134.

330. Карнаух С. Г., Роганов Л. Л. Бєгунов О. О. Дослідження нового способу поділу сортового прокату за схемою “зсув-ламання”. *Машинознавство*. 2001. 6. С. 33–35.

331. Karnaukh S. G., Markov O. E., Aliieva L. I., Kukhar V. V. Designing and researching of the equipment for cutting by breaking of rolled stock. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. 109. 9–12. pp. 2457–2464, https://doi.org/10.1007/s00170-020-05824-7.

332. Пат. 134610 Україна, B23D 23/00. Пристрій для розділення прокату. Карнаух С. Г., Сидюк Д. М. u201812761; заявл. 21.12.2018; опубл. 27.05.2019. Бюл. №10.

333. Пат. 116199 Україна, B23D 23/00, B21B 1/02. Спосіб розділення прокату. Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. u201612115; заявл. 29.11.2016; опубл. 10.05.2017. Бюл. №9.

334. Томленов А. Д. Теория пластического деформирования металлов. Москва : Металлургия. 1972. 408 с.

335. Соколовский В. В. Теория пластичности. Москва : Высшая школа. 1969. 608 с.

336. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. Москва : Наука. 1969. 420 с.

337. Грин А. Г. Пластическое течение надрезанных полос при изгибе. *Механика*. 1955. 4. С. 54–56.

338. Хилл Р. Математическая теория пластичности. Москва : Гос. изд-во техн.-экон. литературы. 1956. 408 с.

339. Шоу М. К., Де Сальво Ж. И. Новый подход к пластичности и его применение к тупым двухмерным инденторам. Труды американского общества инженеров – механиков. Москва. 1970. 2. С. 210–221.

340. Потапкин В. Ф., Роганов Л. Л., Сатонин О. В., Бегунов А. А., Карнаух С. Г. Математическое моделирование и расчет силовых параметров при совместном внедрении двух аболютно жестких клиньев различных высот и углов при вершине. *Захист металургійних машин від поломок:* Збірник наукових праць. Маріуполь. 2000. 5. С. 209–216.

341. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Доброносов Ю. К., Бегунов А. А. Устройство для рифления прокатных валков. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: Збірник наукових праць*. Краматорськ. 2003. С. 101–103.

342. Панфилов Г. В., Нгуен В. Т., Михайличенко С.Н. Вдавливание клинового пуансона в полуплоскость. Известия Тульского государственного университета. 2018. 6. С. 17–32.

343. Карнаух С. Г., Бегунов А. А., Винников М. А. Экспериментальные исследования силовых параметров процесса внедрения жесткого клиновидного инструмента в прокат. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: Збірник наукових праць*. Краматорськ –

Хмельницький. 2002. С. 91–93.

344. Христианович С. А. Плоская задача математической теории пластичности при внешних силах, заданных на замкнутом контуре. *Математичекий сборник.* 1936. 4(1). 511 с.

345. Панфилов Г. В., Недошивин С. В., Судаков П. В. Разложение специальных цилиндрических функций по степеням переменных аргументов при интегральном преобразовании Лапласа – Карсона. *Известия Тульського государственного университета. Естественные науки.* 2012. 1. С. 130–140.

346. Степанский Л. Г. Расчет напряжений при разрезке сдвигом. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1995. 6. С. 2–4.

347. Пат. 134609 Україна, B23D 23/00. Установка для розділення прокату. Карнаух С. Г. u201812760; заявл. 21.12.2018; опубл. 27.05.2019. Бюл. №10.

348. Карнаух С. Г. Разработка штампов для отрезки проката с дифференцированным зажимом. *Кузнечно-штамповочное производство*. 2000. 4. С. 19–22.

349. Карнаух С. Г., Чоста Н. В. Розробка допоміжних пристроїв до штампів для відрізки сортового прокату зсувом з диференційним затиском. *Обробка матеріалів тиском. Materials Working by Pressure*. Краматорськ : ДДМА. 2022. 1(51). С. 188–195, https://doi.org/10.37142/2076-2151/2022-1(51)3.

350. Пат. 124822 Україна, B23D 31/00, B23D 23/00. Штамп для відрізки прокату. Карнаух С. Г. u201710702; заявл. 03.11.2017; опубл. 25.04.2018. Бюл. №8.

351. Карнаух С. Г., Бахтін І. Д. Розробка і дослідження штампів з диференційним затиском прокату. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XIX Міжнародної науково-технічної конференції* / за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ: ДДМА. 2021. С. 55–57.

352. Карнаух С. Г., Чоста Н. В. Розробка допоміжних пристроїв до штампів для відрізки сортового прокату зсувом з диференційним затиском. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XX Міжнародної науково-технічної конференції* / за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ – Тернопіль: ДДМА. 2022. С. 80–82.

353. Карнаух С. Г., Алієв І. С., Таган Л. В., Матвійчук В. А. Розробка штампів

з диференційним затиском для різання заготовок під точне штампування. *Engineering, energy, transport. Scientific journals of Vinnitsa national agrarian university*. Вінниця: ВНТУ. 2021. 112. 4(115). С. 66–74, https://doi.org/10.37128/2520-6168-2021-4.

354. Karnaukh S. G., Markov O. E., Shapoval A. A., Zubenko K. V. Development and research of the stamp for cutting of a rolled stock with a differentiated clamp. *FME transactions*. 2022. 50 (4). pp. 674–682, https://doi.org/10.5937/fme2204674K.

355. Пат. 25552 А Україна, В23Д23/00. Штамп для відрізки прокату з диференційованим затиском. Роганов Л. Л., Тарасов О. Ф., Карнаух С. Г. 97062588; заявл. 03.06.97; опубл. 30.10.98. Бюл. 6.

356. Karnaukh S. G. Study of the stamp for cutting bar sections with a differentiated clamp. *Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском: матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції*. Київ. 2023. С. 15–18.

357. Карнаух С. Г. Розробка штампів для точного відрізання зсувом. *Машинознавство*. 1998. 3. С. 34–36.

358. Пат. 124778 Україна, B23D 31/00, B23D 33/08, B23D 33/10, B23D 36/00. Механізм упору до штампу для відрізки сортового прокату зсувом. Карнаух С. Г., Карнаух Д. С., Літвиненко О. І. u201710245; заявл. 23.10.2017; опубл. 25.04.2018, Бюл. №8.

359. Пат. 148741 Україна, B26D 7/00. Упор до штампу для розділення сортового прокату. Карнаух С. Г., Марков О. Є. u202007625; заявл. 30.11.2020; опубл. 15.09.2021. Бюл. №37.

360. Пат. 147482 Україна, B26D 7/00. Упор до штампу для розділення сортового прокату. Карнаух С. Г., Марков О. Є. u202007617; заявл. 30.11.2020; опубл. 12.05.2021. Бюл. №19.

361. Пат. 147485 Україна, B26D 7/00. Упор до штампу для розділення сортового прокату відрізанням зсувом. Карнаух С. Г., Марков О. Є. u202007831; заявл. 08.12.2020; опубл. 12.05.2021. Бюл. №19.

362. Пат. 148032 Україна, B26D 7/00. Упор до штампу для розділення сортового прокату. Карнаух С. Г., Марков О. Є. u202007832; заявл. 08.12.2020; опубл. 30.06.2021. Бюл. №26.

# ДОДАТОК А

## СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальні значення основних параметрів процесу розглядали як випадкові величини $x_i$, які характеризуються нормальним законом розподілу і отримані в результаті повторних вимірювань. Для обробки отриманих значень використовували стандартні методи теорії йомовірності і математичної статистики. Статистичну обробку результатів експериментів виконували з використанням пакету MATHCAD і STATISTIKA.

Математичне очікування серії вимірювань:

$$\bar{x} = 1/n \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i, \tag{A.1}$$

де $n$ – кількість вимірювань;

$i$ – номер паралельного вимірювання;

$x_i$ – значення $i$ – того вимірювання.

Дисперсія серії вимірювань:

$$D_x = S_{\bar{x}}^2 = \sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 / \big(n \cdot (n-1)\big). \tag{A.2}$$

Середньоквадратична похибка результатів серії вимірювань

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{D_x}. \tag{A.3}$$

Задавшись коефіцієнтом надійності $\alpha = 0{,}95$ (рівень значущості $0{,}05$) визначаємо коефіцієнт Стьюдента при кількості паралельних вимірювань $n = 5$ і числі ступенів вільності $f = n - 1 = 4 - t_{\alpha;f} = 2{,}78$.

Абсолютна похибка вимірювань

$$\Delta x = t_{j;f} \cdot S_{\bar{x}}. \quad \text{(А.4)}$$

Дійсне значення вимірюваної величини знаходиться у границях довірчого інтервалу $\bar{x} - \Delta x \leq x \leq \bar{x} + \Delta x$.

Звідки, остаточний інтервал дорівнює $x = \bar{x} + \Delta x$.

Відносна похибка серії вимірювань:

$$\delta_{\bar{x}} = \pm \Delta x / x \cdot 100\%. \quad \text{(А.5)}$$

Перевірку однородності результатів експериментів, що визначає достовірність обліку усіх сильнодіючих факторів кожного досліду на одному рівні, проводили за $G$ – критерієм Кохрена:

$$G_p = S_{max}^2 / \sum_{j=1}^{k} S_j^2 \leq G_T, \quad \text{(А.6)}$$

де $G_p$ – розрахунковий критерій Кохрена;

$G_T$ – табличне значення критерія Кохрена при $n = 5$; $f = 4$ і рівня значимості 0,05;

$j = 1,\ 2 \ldots k$ – порядковий номер досліду на одному рівні;

$S_j$ – дисперсія $j$ – того досліду.

$S_{max}^2$ – максимальна дисперсія досліду.

Точність вимірювань досліджуваних параметрів залежить від ряду факторів, які вносять у результати вимірювань певну похибку.

Сумарна похибка вимірювань:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{l=1}^{m} \delta_l^2}, \quad \text{(A.7)}$$

де $m$ – кількість факторів, що впливають на результат вимірювання;

$l = 1,2 \ldots m$ – порядковий номер фактора, який чинить вплив;

$\delta_l$ – похибка, яка вноситься фактором в результаті вимірювань.

Ймовірна похибка: $\xi = 2/3 \cdot \delta_{\Sigma}$.

Аналіз результатів статистичної обробки показав, що відносна похибка результатів вимірювань не перевищує 8%, сумарна похибка – 6%, ймовірна – 4%.

Порівняння похибок розрахункових і табличних значень критерія Кохрена показало, що всі результати вимірювання – однорідні, що свідчить про те, що у результаті вимірювань були враховані всі фактори, які могли впливати на результати проведених експериментів.

# ДОДАТОК Б

# ПРИЛАДИ, ЩО ЗАСТОСОВАНІ ДЛЯ МАГНІТНО-ПОРОШКОВОЇ ТА ФАРБО-КАПІЛЯРНОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЙ. ПРОТОКОЛИ КОНТРОЛЮ ПОВЕРХНЕВИХ ДЕФЕКТІВ ЗРАЗКІВ




а




б

Рис. Б1 – Фотографії матеріалів (а) для фарбо-капілярної дефектоскопії та приладів (магніт $Delta\ Flux$, лампа $Flux\ VD-N$) для магнітно-порошкової дефектоскопії

**Протокол контролю поверхневих дефектів**
**Inspection Report Surface crack test**
**(Inspection certificate3.1)**

Висновок / Decision № M4-521

Лист / Sheet 1 | Листів / Sheets 1

| | | | |
|---|---|---|---|
| Найменування / Description: Зразок | Фіксація виробу / Product registration: 1 | Кількість, шт. / Quantity: 1 (one) | № замовлення / Order No: – |
| Креслення № _ / Drawing No. – | | Заказчик/Customer – | Специфікація/Specification No – |
| | Матеріал / Material: – | Плавка/Heat: – | № Контракту/Contract No: – |

Додаткові відомості для замовника (заповнюється при необхідності)
Additional information for a customer (filled if necessary)

| Стан контрольованої поверхні / Condition of surface to be inspected | T°C виробу / Product testing temperature | Умови огляду / viewing conditions | Еталон /Adjustment reference block | Стадія виготовлення / Stage of manufacture | Мінімально реєстрована ширина розкриття дефекту / min. width of defect to be recorded |
|---|---|---|---|---|---|
| Необроблена/ Rough ☐<br>Обработанная/ machined ☒ | 20°C | | Berthold probe | – | 1 мкм |

☒ Магнітно-порошкова дефектоскопія / Magnetic particle test
☐ Краско-капілярний метод дефектоскопії / Penetrant test

| Тип приладу / Instrument typ | Спосіб намагнічування / Method of magnetizing | Спосіб контролю / Inspection technique | Проникаючий засіб / Penetrant | Засіб очищення / Cleaning agent | Проявник / Developing agent | Час дії (min) пенетрантом / Penetration time; проявником / Development time |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Delta Flux Yoke | Безперервний / Continuous ☒<br>Метод сплеску / Surge ☐<br>Залишковий / Residual ☐ | Сухий / Dry ☐<br>Вологий / Wet ☐<br>Флуоресцентний / Fluorescent ☒ | | | | |
| Засіб контролю / Test agent: Helling NRF101 | | | | | | |

Формування намагнічуючого поля /Type of magnatization

Методика, процедура, карта контролю / Technique, Procedure, Inspection Scheme
ДСТУ EN 10228-1

Вимоги, що висуваються до контролю /Test requirements
ДСТУ EN 10228-1, класс/class 4

Результати контролю / Test results

| Вимоги згідно / Requirements as per | Обсяг контролю / Scope of inspection | Класи якості / Quality classe | Зони контролю / Zones of inspections | Частота індикацій / Frequency of indications | Межа реєстрації / Recording limit (mm) | | Межа допуску / Acceptance limit (mm) | | Відповідає / Ok | Не відповідає / not Ok |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | лінейная/ linear | не линейная/ non linear | линейная/ linear | не линейная/ non linear | | |
| ДСТУ EN 10228-1 | Торці зразка | 4 | - | 5[1)] | 1 | 1 | 2 ізольованих/ isolated, 5 сумарна/ cumulative[1] | - | X | - |

Ескіз/ Sketch
Релевантних індикацій не виявлено
No relevant indication has been found

| Прізвище /Surname | Кваліфікація/Level | Підпис /Signature | Дата/Date |
|---|---|---|---|
| Рибас А.О. | Рів. III<br>Серт.№754.11<br>від 26.03.2021 | | 01.08.2024 |

Рис. Б2 – Протокол результатів випробувань методом магніто-порошкової дефектоскопії зразка із сталі Ст. 0

**Протокол контролю поверхневих дефектів**
**Inspection Report Surface crack test**
**(Inspection certificate3.1)**

Висновок / Decision № С18-329

Лист / Sheet 1 — Листів / Sheets 1

| | | | |
|---|---|---|---|
| Найменування / Description: Зразок | Фіксація виробу / Product registration: 1 | Кількість, шт. / Quantity: 1 (one) | № замовлення / Order No: – |
| Креслення № – / Drawing No. – | | Заказчик/Customer: – | Специфікація/Specification No: – |
| | Матеріал / Material: – | Плавка/Heat: – | № Контракту/Contract No: – |

Додаткові відомості для замовника (заповнюється при необхідності)
Additional information for a customer (filled if necessary)

| Стан контрольованої поверхні / Condition of surface to be inspected | T°C виробу / Product testing temperature | Умови огляду / viewing conditions | Еталон /Adjustment reference block | Стадія виготовлення / Stage of manufacture | Мінімально реєстрована ширина розкриття дефекту / min. width of defect to be recorded |
|---|---|---|---|---|---|
| Необроблена/ Rough ☐ Обработанная/ machined ☒ | 20°C | | K1 | – | 1 мкм |

☐ Магнітно-порошкова дефектоскопія / Magnetic particle test

☒ Краско-капілярний метод дефектоскопії / Penetrant test

| Тип приладу / Instrument typ | Спосіб намагнічування / Method of magnetizing | Спосіб контролю / Inspection technique | Проникаючий засіб / Penetrant | Засіб очищення / Cleaning agent | Проявник / Developing agent | Час дії (min) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| – | Безперервний Continuous ☐ | Сухий Dry ☐ | Helling Nord Test U88 | Helling Nord Test U87 | Helling Nord Test U89 | пенетрантом / Penetration time: 15 min |
| Засіб контролю / Test agent | Метод сплеску Surge ☐ | Вологий Wet ☐ | | | | проявником / Development time: 20 min |
| | Залишковий Residual ☐ | Флуорисцентний Fluorescent ☐ | | | | |

Формування намагнічуючого поля /Type of magnatization

Методика, процедура, карта контролю / Technique, Procedure, Inspection Scheme
ДСТУ EN 10228-2:2001

Вимоги, що висуваються до контролю /Test requirements
ДСТУ EN 10228-2:2001, клас 4 / class 4

Результати контролю Test results

| Вимоги згідно / Requirements as per | Обсяг контролю / Scope of inspection | Класи якості / Quality classe | Зони контролю / Zones of inspections | Частота індикацій / Frequency of indications | Межа реєстрації / Recording limit (mm) | | Межа допуску / Acceptance limit (mm) | | Відповідає Ok | Не відповідає not Ok |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | лінійна/ linear | не лінійна/ non linear | лінійна/ linear | не лінійна/ non linear | | |
| ДСТУ EN 10228-2:2001 | Торці зразка | 4 | - | ДСТУ EN 10228-2: 2001, клас 4 / class 4, tab. 1 | ≥1 | ≥1 | 2 | 3 | X | - |

Ескіз/ Sketch
Релевантних індикацій не виявлено
No relevant indication has been found

| | Прізвище /Surname | Кваліфікація/Level | Підпис /Signature | Дата/Date |
|---|---|---|---|---|
| | Шаройка О.О. | Рів. II Серт. №724.11 від 27.11.2020 | | 01.08.2024 |

Рис. Б3 – Протокол результатів випробувань фарбо-капілярним методом дефектоскопії зразка із сталі Ст. 0

| | Протокол контролю поверхневих дефектів<br>Inspection Report Surface crack test<br>(Inspection certificate3.1) | | Висновок / Decision<br>№ M4-522<br>Лист Sheet 1 / Листів Sheets 1 |
|---|---|---|---|
| Найменування / Description: Зразок | Фіксація виробу Product registration: 2 | Кількість, шт. Quantity 1 (one) | № замовлення Order No: – |
| Креслення № _ Drawing No. – | | Заказчик/Customer – | Специфікація/Specification No – |
| | Матеріал / Material: – | Плавка/Heat: – | № Контракту/Contract No: – |

Додаткові відомості для замовника (заповнюється при необхідності)
Additional information for a customer (filled if necessary)

| Стан контрольованої поверхні Condition of surface to be inspected | T°C виробу / Product testing temperature | Умови огляду / viewing conditions | Еталон /Adjustment reference block | Стадія виготовлення / Stage of manufacture | Мінімально реєстрована ширина розкриття дефекту / min. width of defect to be recorded |
|---|---|---|---|---|---|
| Необроблена/ Rough ☐<br>Обработанная/ machined ☒ | 20°C | | Berthold probe | – | 1 мкм |

☒ Магнітно-порошкова дефектоскопія / Magnetic particle test ☐ Краско-капілярний метод дефектоскопії / Penetrant test

| Тип приладу / Instrument typ | Спосіб намагнічування / Method of magnetizing | Спосіб контролю / Inspection technique | Проникаючий засіб / Penetrant | Засіб очищення / Cleaning agent | Проявник / Developing agent | Час дії (min) пенетрантом / Penetration time; проявником / Development time |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Delta Flux Yoke | Безперервний Continuous ☒ | Сухий Dry ☐ | | | | |
| Засіб контролю / Test agent: Helling NRF101 | Метод сплеску Surge ☐ | Вологий Wet ☐ | | | | |
| | Залишковий Residual ☐ | Флуоресцентний Fluorescent ☒ | | | | |

Формування намагнічуючого поля /Type of magnatization

Методика, процедура, карта контролю / Technique, Procedure, Inspection Scheme
ДСТУ EN 10228-1

Вимоги, що висуваються до контролю /Test requirements
ДСТУ EN 10228-1, класс/class 4

Результати контролю Test results

| Вимоги згідно / Requirements as per | Обсяг контролю / Scope of inspection | Класи якості / Quality classe | Зони контролю / Zones of inspections | Частота індикацій / Frequency of indications | Межа реєстрації / Recording limit (mm) | | Межа допуску / Acceptance limit (mm) | | Відповідає Ok | Не відповідає not Ok |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | лінейная/ linear | не линейная/ non linear | линейная/ linear | не линейная/ non linear | | |
| ДСТУ EN 10228-1 | Торці зразка | 4 | - | 5[1)] | 1 | 1 | 2 ізольованих/ isolated, 5 сумарна/ cumulative[1] | - | X | - |

Ескіз/ Sketch
Релевантних індикацій не виявлено
No relevant indication has been found

| | Прізвище /Surname | Кваліфікація/Level | Підпис /Signature | Дата/Date |
|---|---|---|---|---|
| | Рибас А.О. | Рів. III<br>Серт.№754.11<br>від 26.03.2021 | | 01.08.2024 |

Рис. Б4 – Протокол результатів випробувань методом магніто-порошкової дефектоскопії зразка із сталі 40Х

**Протокол контролю поверхневих дефектів**
**Inspection Report Surface crack test**
**(Inspection certificate3.1)**

Висновок / Decision № С18-330

Лист / Sheet 1 — Листів / Sheets 1

| | | | |
|---|---|---|---|
| Найменування / Description: Зразок | Фіксація виробу / Product registration: 2 | Кількість, шт. / Quantity: 1 (one) | № замовлення / Order No: – |
| | | Заказчик/Customer: – | Специфікація/Specification No: – |
| Креслення № _ / Drawing No. – | Матеріал / Material: – | Плавка/Heat: – | № Контракту/Contract No: – |

Додаткові відомості для замовника (заповнюється при необхідності)
Additional information for a customer (filled if necessary)

| Стан контрольованої поверхні / Condition of surface to be inspected | T°C виробу / Product testing temperature | Умови огляду / viewing conditions | Еталон /Adjustment reference block | Стадія виготовлення / Stage of manufacture | Мінімально реєстрована ширина розкриття дефекту / min. width of defect to be recorded |
|---|---|---|---|---|---|
| Необроблена/ Rough ☐ Обработанная/ machined ☒ | 20°C | | K1 | – | 1 мкм |

☐ Магнітно-порошкова дефектоскопія / Magnetic particle test

☒ Краско-капілярний метод дефектоскопії / Penetrant test

| Тип приладу / Instrument typ | Спосіб намагнічування / Method of magnetizing | Спосіб контролю / Inspection technique | Проникаючий засіб / Penetrant | Засіб очищення / Cleaning agent | Проявник / Developing agent | Час дії (min) пенетрантом / Penetration time | проявником / Development time |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| – | Безперервний / Continuous ☐ | Сухий / Dry ☐ | Helling Nord Test U88 | Helling Nord Test U87 | Helling Nord Test U89 | 15 min | 20 min |
| Засіб контролю / Test agent | Метод сплеску / Surge ☐ | Вологий / Wet ☐ | | | | | |
| | Залишковий / Residual ☐ | Флуоресцентний / Fluorescent ☐ | | | | | |

Формування намагнічуючого поля /Type of magnatization

Методика, процедура, карта контролю / Technique, Procedure, Inspection Scheme
ДСТУ EN 10228-2:2001

Вимоги, що висуваються до контролю /Test requirements
ДСТУ EN 10228-2:2001, клас 4 / class 4

Результати контролю / Test results

| Вимоги згідно / Requirements as per | Обсяг контролю / Scope of inspection | Класи якості / Quality classe | Зони контролю / Zones of inspections | Частота індикацій / Frequency of indications | Межа реєстрації / Recording limit (mm) | | Межа допуску / Acceptance limit (mm) | | Відповідає / Ok | Не відповідає / not Ok |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | лінійна/ linear | не лінійна/ non linear | лінійна/ linear | не лінійна/ non linear | | |
| ДСТУ EN 10228-2:2001 | Торці зразка | 4 | - | ДСТУ EN 10228-2: 2001, клас 4 / class 4, tab. 1 | ≥1 | ≥1 | 2 | 3 | X | - |

Ескіз/ Sketch
Релевантних індикацій не виявлено
No relevant indication has been found

| | Прізвище /Surname | Кваліфікація/Level | Підпис /Signature | Дата/Date |
|---|---|---|---|---|
| | Шаройка О.О. | Рів. II Серт. №724.11 від 27.11.2020 | | 01.08.2024 |

Рис. Б5 – Протокол результатів випробувань фарбо-капілярним методом дефектоскопії зразка із сталі 40Х

# ДОДАТОК В

# АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ректор Донбаської державної
машинобудівної академії,
д-р техн. наук, професор
_____ Віктор КОВАЛЬОВ
«10» 09 2024 року

**ДОВІДКА №1**

про дольову участь докторанта, канд. техн. наук, доцента
Карнауха Сергія Григоровича в економічному ефекті від
результатів впровадження спільних науково-дослідних робіт
Донбаської державної машинобудівної академії

Результати дисертаційної роботи докторанта Карнауха С.Г. були використані на ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (НКМЗ), ПАТ Енергомашспецсталь (ЕМСС), АТ Мотор Січ, ПАТ «Дружківський завод металевих виробів» (ДЗМВ) в рамках спільних науково-дослідних робіт з вдосконалення методик розрахунку і проектування процесів обробки металів тиском, технологій і оснастки виробництва гаряче- та холоднодеформованих заготовок та виробів.

Загальний економічний ефект за рівнем цін відповідного року за актами впровадження та дольова участь виконавця робіт Карнауха С. Г. наведено у таблиці:

| Номер акту | Назва підприємства | Рік впровад-ження | Загальний економічний ефект, тис. грн. | Економічний ефект (частка) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | % | фактичний, тис. грн. | очікуваний, тис. грн. |
| 1 | ПАТ НКМЗ | 2013 | 2500 | 25 | 625 | – |
| 2 | ПАТ ЕМСС | 2014 | 350 | 25 | 87,5 | 282,5 |
| 3 | АТ Мотор Січ | 2015 | 500 | 25 | 125 | 340 |
| 4 | ПАТ ДЗМВ | 2016 | 460 | 25 | 115 | 240 |
| | | | **Всього:** | | 952,5 | 862,5 |

Начальник науково-дослідного сектору Валентина КРИВУНЬ

Ректор Донбаської державної
машинобудівної академії,
д-р техн. наук, професор
_____ Віктор КОВАЛЬОВ
«10» 09 2024 року

**ДОВІДКА №2**

про дольову участь докторанта, канд. техн. наук, доцента
Карнауха Сергія Григоровича в економічному ефекті від
результатів впровадження спільних науково-дослідних робіт
Донбаської державної машинобудівної академії

Результати дисертаційної роботи докторанта Карнауха С.Г. були використані на ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (НКМЗ) в рамках спільних науково-дослідних робіт з вдосконалення методик розрахунку і проектування процесів обробки металів тиском, технологій і оснастки виробництва холоднодеформованих заготовок та виробів.

Загальний економічний ефект за рівнем цін відповідного року за актами впровадження та дольова участь виконавця робіт Карнауха С. Г. наведено у таблиці:

| Номер акту | Назва підприємства | Рік впровад-ження | Загальний економічний ефект, тис. грн. | Економічний ефект (частка) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | % | фактичний, тис. грн. | очікуваний, тис. грн. |
| 1 | ПАТ НКМЗ | 2022 | 1200 | 50 | 600 | 1050 |
| | | | **Всього:** | | 600 | 1050 |

Начальник науково-дослідного сектору Валентина КРИВУНЬ

# АКТ 1

ПРИВАТНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
НОВОКРАМАТОРСЬКИЙ
МАШИНОБУДІВНИЙ
ЗАВОД
ПрАТ «НКМЗ»

PRIVATE JOINT STOCK COMPANY
NOVOKRAMATORSKY
MASHINOSTROITELNY
ZAVOD
PJSC «NKMZ»

НКМЗ, вул. Борисоглібська, 15В, офіс 8, м. Київ, 04070, Україна
NKMZ, Borysohlibska Street, 15V, office 8, Kyiv, 04070, Ukraine
ЄРДПОУ 05763599 +38(050)456-83-56 +38(050)456-83-60 +38(050)130-10-24ztm@nkmz.comsales@nkmz.comwww.nkmz.com

№ 81/001.1 від 17.07.2024 На № _____ від _____

**ЗАТВЕРДЖУЮ:**

Головний металург ПрАТ «НКМЗ»,

к.т.н.

_____ В. М. Злигорєв

«___» _____ 2024 року

## АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Комісія у складі представників ПрАТ «НКМЗ»: начальника ковальсько-пресового цеху Завади О.В., начальника бюро пресових викуванців ВГМет Романчі Л.І., та представників Донбаської державної машинобудівної академії (ДДМА): завідувача кафедри «Обробка металів тиском» (ОМТ) ДДМА Алієв І. С., д-р техн. наук, проф.; професора кафедри ОМТ ДДМА Абхарі П. Б., д-р техн. наук, проф. склала цей акт про те, що в результаті проведених спільних наукових досліджень докторантів кафедри ОМТ ДДМА Карнауха С. Г., Левченко В. М. впроваджено на ПрАТ «НКМЗ» наступні результати:

- розрахункові моделі процесів розділення сортового прокату з визначенням енергосилових параметрів, показників формоутворення та прогнозування рівня геометричної точності заготовок;
- технологічні рекомендації з проектування безвідходного процесу розділення сортового і трубного прокату холодною ломкою згином при динамічному і комбінованому навантаженні на прес-молоті;
- рекомендації щодо проектування штампів з диференційованим затиском прокату, перспективні конструкції таких штампів та передніх упорів до них;
- рекомендації з розробки технології і штампового оснащення на основі використання схем деформації комбінованого і поперечного видавлювання у роз'ємних матрицях;

- методики розрахунки силових режимів процесів деформування точного кування і штамповки порожнистих деталей, що дозволяють розрахувати питоме навантаження на інструмент та розрахувати його стійкість.

Нові технологічні рекомендації та рекомендації до проектування обладнання для їх реалізації забезпечують зменшення матеріальних витрат на виробництво виробів на (12…15)% за рахунок зменшення витрат на матеріал, інструмент, підвищення продуктивності процесу, підвищення геометричної точності заготовок, зменшення величин припусків на розміри деталей, починаючи із розділення вихідних матеріалів на мірні заготовки.

Реальний економічний ефект становив 1200 тис. грн. за рівнем цін 2022 року. Очікуваний економічний ефект від впровадження склав 2100 тис. грн. за рівнем цін 2022 року.

Акт призначений для спеціалізованих вчених рад із захисту докторських і кандидатських дисертацій та не є основою для висування фінансових вимог.

Розрахунок економічного ефекту не наводиться, так як містить елементи комерційної таємниці ПрАТ «НКМЗ».

ПрАТ «НКМЗ»:

Начальник ковальсько-пресового цеху

_____ Завада О.В.

Начальник бюро пресових викуванців ВГМет

_____ Романча Л.І.

Донбаська державна машинобудівна академія:

Завідувач кафедри ОМТ, д-р техн. наук, професор

_____ І. С. Алієв

Професор кафедри ОМТ, д-р техн. наук, професор

_____ П. Б. Абхарі

# АКТ 2

**Затверджую:**
Проректор з наукової роботи, управління розвитком та міжнародних зв'язків Донбаської державної машинобудівної академії

_____Михайло ТУРЧАНІН

«___» _____ 2024 р.

## АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Матеріали дисертаційних робіт докторантів Донбаської державної машинобудівної академії (ДДМА) Карнауха С. Г. і Левченко В. М., а також результати кафедральних НДР Дк-09-2015 і Дк-09-2020, що містять:

– розрахункові моделі енергосилових параметрів, формоутворення та прогнозування дефектоутворення в процесах бокового, поздовжнього та комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання;

– рекомендації щодо проектування штампового оснащення та технологічного процесу штампування порожнистих і складнопрофільованих деталей;

– рекомендації за розрахунками і проектуванням процесів та штампового оснащення для процесів розділення прокату на точні заготовки під видавлювання, впроваджено в навчальний процес на кафедрі обробки металів тиском (ОМТ) у вигляді лекційного матеріалу в рамках викладання дисциплін: «Теорія процесів ковальсько-штампувального виробництва», «Технологія ковальсько-штампувального виробництва», а також при виконанні проектних та практичних робіт студентами та магістрантами спеціальності 136 «Металургія», спеціалізація «Комп'ютерне проектування процесів обробки металів тиском» і підготовки аспірантів PhD за спеціальностями 132 «Матеріалознавство» та 131 «Прикладна механіка».

Результати НДР відображено також у посібнику «Енергетичні методи досліджень процесів обробки металів тиском» (Краматорськ–Тернопіль : ДДМА, 2023. 179 с. *ISBN 978-617-7889-54-9)* для здобувачів PhD за спеціальностями 131 «Прикладна механіка», 132 «Матеріалознавство» денної та заочної форм навчання.

Завідуючий кафедрою ОМТ
доктор техн. наук, професор Іграмотдін АЛІЄВ