

До спеціалізованої вченої ради
Д 26.002.32
Національного технічного
університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора
Михалевича Володимира Маркусовича
на дисертаційну роботу Карнауха Сергія Григоровича на тему:
«Розвиток наукових основ та удосконалення процесів безвідходного розділення
сортового і трубного прокату на основі застосування
способів комбінованого навантаження»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за
спеціальністю 05.03.05 – процеси та машини обробки металів тиском,
13 – Механічна інженерія

Актуальність теми дисертаційної роботи

Сучасна економічна ситуація в Україні висуває підвищені вимоги до споживання промислової продукції, зокрема в аспектах енерго- та ресурсозбереження. Цим вимогам найбільшою мірою відповідають вироби з малою металоємністю, оптимальною геометрією, мінімальною собівартістю виготовлення та відповідністю експлуатаційним характеристикам. У зв'язку з цим ключовою тенденцією заготівельного виробництва є підвищення геометричної точності та покращення якості поверхні заготовок.

Навіть незначне зменшення витрат металу при роздільних операціях — за умов серійного або масового виробництва, що охоплює десятки мільйонів заготовок на рівні країни — дає змогу суттєво знизити загальну собівартість кінцевої продукції. За розрахунками, економія лише 1% матеріалу дозволяє знизити витрати на виробництво продукції машинобудування в чотири рази ефективніше, ніж така сама економія за рахунок капітальних вкладень, і втричі ефективніше, ніж економія на фонді оплати праці.

Широкий асортимент сортового та трубного прокату зумовлює необхідність застосування різноманітних способів їх розділення, відповідного обладнання та оснастки, що не завжди є ефективними та часто супроводжуються

значними енергетичними й матеріальними витратами. Незважаючи на велику кількість досліджень, присвячених оцінці ступеня вичерпання ресурсу пластичності матеріалів, залишається актуальною потреба у розробленні нового підходу до вибору безвідходного способу розділення сортового і трубного прокату з різними механічними характеристиками.

Перспективним напрямом удосконалення процесів розділення є розроблення нових і модернізація існуючих безвідходних технологій розділення сортового та трубного прокату. Важливими складовими цього процесу є автоматизація проектування на основі систематизації та класифікації способів розділення, конструктивних схем обладнання й оснастки для їх реалізації, а також накопичення даних і формування інформаційних банків з розрахунковими та методичними рекомендаціями, схемами деформування тощо.

Теоретичні напрацювання, нові технологічні ідеї, а також удосконалення існуючих способів розділення й відповідного обладнання мають суттєве значення для підвищення ефективності виробничих процесів і забезпечення високої геометричної точності заготовок.

Запропоновані способи розділення та відповідне обладнання з використанням комбінованого навантаження дозволяють знизити негативні наслідки розвантаження преса. Зокрема, миттєвий скид технологічного навантаження в момент розділення, що супроводжується вивільненням накопиченої енергії деформації станини й приводу, часто призводить до пошкоджень елементів конструкції преса, його приводу та фундаменту. Застосування комбінованого навантаження сприяє зменшенню ударних навантажень і підвищенню надійності роботи обладнання.

У цьому контексті тема дисертаційної роботи Карнауха С. Г., що присвячена підвищенню ефективності процесів розділення сортового та трубного прокату шляхом розвитку наукових засад, впровадження нових технологічних рішень і засобів комбінованого навантаження, а також розроблення методик проектування технологічних процесів, обладнання й оснастки, є безперечно *актуальною*.

Оцінка змісту та завершеності дисертації

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, семи розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний об'єм роботи 415 сторінок, в тому числі 366 сторінок основного

тексту, 160 рисунків та 33 таблиць, список використаних джерел з 362 найменувань та 3 додатків.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, подано загальну характеристику роботи, сформульовано мету та основні завдання дослідження, окреслено об'єкт і предмет дослідження. Висвітлено зв'язок дисертації з науковими програмами, тематиками та госпдоговірними роботами, зазначено особистий внесок здобувача. Наведено відомості про наукову новизну, практичну значущість одержаних результатів, їх апробацію та впровадження.

В першому розділі проаналізовано сучасний стан та основні напрями розвитку безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату, а також відповідного обладнання й оснастки для їх реалізації.

Незважаючи на значний обсяг уже виконаних досліджень у цій галузі, встановлено необхідність подальших теоретичних і експериментальних робіт, спрямованих на розробку нових технологічних схем, удосконалення наявних методів розділення, оцінку їх технологічних можливостей, моделювання режимів деформування та створення методик інженерного розрахунку і проектування процесів з урахуванням специфіки силового та кінематичного впливу. Зазначено, що частина нових технологічних рішень може бути реалізована на існуючому ковальсько-пресовому обладнанні з мінімальними конструктивними змінами, тоді як інші — через принципову новизну — потребують створення спеціалізованого устаткування: прес-молотів із можливістю точного дозування енергії, механізмів для забезпечення різних типів навантаження (статичного, динамічного, статико-динамічного), а також механічних пресів із компактними виконавчими механізмами.

На підставі проведеного аналізу чітко сформульовано мету роботи та основні завдання дослідження.

В другому розділі обґрунтовано вибір напрямів досліджень, методів і методик теоретичного та експериментального аналізу, а також застосування скінченно-елементного моделювання процесів розділення.

Як основні методи теоретичних досліджень процесів із комбінованим навантаженням використано кластерний аналіз, аналітичні та графоаналітичні підходи теорії механізмів і машин, методи скінченних різниць і скінченних елементів, а також метод полів ліній ковзання.

Для експериментального дослідження деформованого стану заготовок застосовано метод тензометрії. Геометричну точність вивчали за допомогою

макроструктурного аналізу з вимірюванням абсолютних і відносних викривлень геометричної форми, а також методів магнітопорошкової й фарбокапілярної дефектоскопії. Механічні властивості матеріалів визначали за результатами випробувань зразків відповідно до стандартних методик.

На основі розробленої класифікації безвідходних способів розділення сортового та трубного прокату, із використанням методів комбінаторики, синтезовано перспективні технологічні схеми з комбінованим навантаженням, що дозволяють підвищити ефективність роботи обладнання та забезпечити високу геометричну точність заготовок.

Запропоновано класифікацію компактних виконавчих механізмів для пресів і обґрунтовано доцільність використання перспективних типів — клиношарнірних, кривошипно-кругових, кривошипно-кулісних і їх комбінацій. Такі механізми створюють оптимальні силові й кінематичні режими навантаження, що сприяє зменшенню енергосилових витрат у процесах розділення та зниженню шкідливих наслідків розвантаження преса після завершення технологічного циклу.

Третій розділ присвячено аналізу інформативності синергетичних критеріїв руйнування в порівнянні з традиційними механічними характеристиками, а також теоретичному обґрунтуванню методу вибору безвідходного способу розділення сортового та трубного прокату.

На основі використання синергетичних критеріїв руйнування та граничних ступенів деформації розроблено класифікацію матеріалів за їх чутливістю до руйнування. Така класифікація дозволяє обґрунтовано обирати доцільний спосіб безвідходного розділення залежно від механічних властивостей матеріалу.

Кластерний аналіз показав, що серед множини синергетичних показників найбільш інформативними є критерій поширення тріщини та критерій крихкості. При додаванні до них інших критеріїв утворюються інформативні множини мінімальної потужності, що забезпечують класифікацію матеріалів за їхньою чутливістю до розділення з заданою вірогідністю. Це свідчить про високу ефективність цієї комбінації критеріїв у порівнянні з іншими варіантами.

Доповненням до цього підходу є запропонований експериментальний метод оцінювання деформовності матеріалів за величинами повздовжньої та поперечної граничної деформації в умовах безвідходного розділення сортового

прокату. На підставі результатів дослідження запропоновано методику вибору конкретного безвідходного способу розділення сортового і трубного прокату з урахуванням чутливості матеріалів до руйнування, що підвищує точність технологічного проектування.

Четвертій розділ присвячений дослідженню процесу триточкової холодної ломки згином при статичному, динамічному та комбінованому статико-динамічному навантаженні на прес-молоті.

Теоретичні дослідження проводилися з використанням методу скінченних різниць для розв'язку диференціальних рівнянь, що описують деформування елементів системи «прес-молот – оснастка – зразок». Розроблені математичні моделі враховують попереднє статичне навантаження, конструктивні особливості прес-молота, жорсткості контактів між деталями прес-молота, оснастки та зразка. Паралельно з теоретичним моделюванням процесу розділення використовувався метод скінченних елементів.

Встановлено, що застосування комбінованого статико-динамічного навантаження зменшує високочастотні коливання інструменту, зразка і опор, запобігаючи порушенню контакту між зразком та опорами, а також несиметричності навантаження відносно концентратора напружень.

Дослідження показали, що більша частина енергії витрачається на зародження й в'язке підростання тріщини, а енергія крихкого руйнування складає не більше 25% від загальної енергії розділення. Збільшення динамічної максимальної сили ломки в порівнянні зі статичною для досліджених матеріалів склало не більше 8%, за винятком зразків сталі 40Х, де приріст склав більше 30%. Наявність статичної сили в момент удару забезпечує певний рівень напружень розтягання в зоні концентратора напружень, що підвищує керованість процесом тріщиноутворення. Рекомендована величина статичної сили при комбінованому навантаженні становить не менше 25% від сили ломки і збільшується зі зростанням жорсткості контактів між рухомими деталями прес-молота, оснасткою і зразком.

Аналіз геометричної точності отриманих заготовок показує, що найкращі результати спостерігаються при комбінованому статико-динамічному навантаженні, де розбіжність теоретичних і експериментальних даних не перевищує 5%.

У п'ятому розділі проведено дослідження процесів розділення сортового і трубного прокату з використанням компактних виконавчих механізмів.

Застосовуючи аналітичні і графоаналітичні методи теорії механізмів і машин (ТММ), а також метод скінченних елементів, розроблено залежності для розрахунку технологічних параметрів процесів розділення сортового прокату на пресах з клиношарнірними, кривошипно-кулісними та кривошипно-круговими механізмами запропонованих конструкцій. Обґрунтовано доцільність застосування додаткового клина з постійним кутом нахилу, що може використовуватись для ходу наближення, вибірки зазорів та зміни кута нахилу увігнутого клина. Це дозволяє забезпечити оптимальну траєкторію руху ножів і покращити геометричну точність отриманих заготовок.

Розроблено методику вибору геометричних, кінематичних і силових параметрів клиношарнірного механізму з увігнутим клином для реалізації процесів розділення прокату.

Установлено, що для клиношарнірного механізму з увігнутим клином і поворотним ножом параметр, що визначає положення центру обертання шарніру механізму, доцільно вибирати рівним половині радіуса увігнутого клина. При реалізації процесу розділення трубчастого прокату за схемою ексцентричного закручування з використанням кривошипно-кругового механізму встановлено, що зі збільшенням ексцентриситету енергосилові параметри розділення збільшуються. Для забезпечення геометричної точності отриманих заготовок величину ексцентриситету рекомендується вибирати в діапазоні від 0,5 до 1,5 від товщини стінки трубчастої заготовки.

Застосування запропонованих конструкцій компактних виконавчих механізмів дозволяє зменшити енергосилові параметри процесу розділення, знизити шкідливі наслідки розвантаження преса в кінці робочого ходу, підвищити жорсткість преса, а також покращити коефіцієнти корисної дії та зусилля при використанні преса.

У шостому розділі запропоновано та досліджено нові способи розділення сортового прокату із застосуванням комбінованого навантаження, що використовують енергію розвантаження преса для виконання корисної роботи – формування концентратора напружень. Це дозволяє за один робочий хід послідовно реалізовувати операції «нанесення концентратора напружень – розділення» за такими схемами: «вдавлення клинового ножа – консольна ломка», «частковий зсув – консольна ломка», «частковий зсув – реверсний зсув».

На основі аналізу процесу за схемою «вдавлення клинового ножа – консольна ломка» із використанням методу полів ліній ковзання та методу скінченних елементів визначено залежності енергосилових параметрів, а також співвідношення робіт на етапах нанесення концентратора та власне розділення. Установлено, що енергії, яка вивільняється під час розвантаження преса, достатньо для нанесення ефективного концентратора напружень. Для забезпечення ефективності процесу та стійкості інструмента рекомендовано вибирати кут клинового ножа в межах $25...40^\circ$, а глибину вдавлення – $10...20\%$ від висоти поперечного перерізу зразка. Отримані заготовки мають високу геометричну точність, хоча дещо поступаються за цим показником заготовкам, отриманим при комбінованому статико-динамічному навантаженні.

При реалізації схем «частковий зсув – консольна ломка» та «частковий зсув – реверсний зсув» встановлено, що зі збільшенням ходу ножа сили та роботи, необхідні для формування концентратора, зростають у межах $15...20\%$ незалежно від механічних властивостей матеріалу. Це пояснюється тим, що зсув охоплює весь переріз зразка практично одразу після контакту ножа із заготовкою.

Аналіз способу за схемою «частковий зсув – реверсний зсув» із використанням методу скінченних елементів показав, що робота на етапі нанесення концентратора становить не більше 20% загальної роботи, витраченої на розділення. Це підтверджує доцільність використання енергії розвантаження преса для формування концентратора в межах одного робочого ходу. Геометрична точність отриманих заготовок є задовільною.

У сьомому розділі, на основі розробленої класифікації штампів з диференційованим затиском прокату та передніх упорів, запропоновано та досліджено низку нових конструкцій штампів, які характеризуються підвищеними техніко-економічними показниками. Наведено рекомендації щодо вибору параметрів клинових механізмів для базової конструкції штампів: кут передавання зусилля на затиск і відрізка прокату рекомендується обирати в межах $30...40^\circ$, а кут передавання зусилля на затиск ножових вкладишів – у межах $27...30^\circ$. Теоретичний аналіз, експериментальні дослідження та результати експлуатації таких штампів дозволили не лише перевірити відомі інженерні рішення, але й сформулювати нові рекомендації для проектування штампів з диференційованим затиском прокату.

Загальні висновки подано наприкінці дисертації; у них відображено ключові результати дослідження з аргументованими рекомендаціями щодо практичного застосування отриманих напрацювань.

Аналіз змісту основної частини дисертації свідчить, що тема, мета та положення, винесені на захист, повністю відповідають змісту роботи та характеризуються концептуальною цілісністю. Усі поставлені в дослідженні завдання реалізовано, що дало змогу досягти визначеної мети. Результати та сформульовані висновки є достовірними й логічно впливають із поставлених наукових завдань.

Список використаних джерел, що налічує 362 найменування, достатньо повно охоплює предметну галузь і засвідчує глибоке опрацювання здобувачем актуальної вітчизняної та іноземної літератури.

Отже, дисертація є завершеною самостійною науковою працею, що відповідає вимогам до кваліфікаційних досліджень.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх новизна

Найважливіші наукові положення та результати дослідження викладено у загальних висновках дисертації. Основні теоретичні напрацювання ґрунтуються на дослідженні силових і деформаційних режимів безвідходного розділення сортового та трубного прокату з використанням методів скінченних різниць і скінченних елементів, методу полів ліній ковзання, а також аналітичних і графоаналітичних методів теорії механізмів і машин. Для розробки нового методу вибору способу безвідходного розділення матеріалів з різними механічними характеристиками застосовано кластерний аналіз на основі самоорганізованих карт Кохонена.

Отримані теоретичні результати підтверджено експериментально з використанням методів фізичного моделювання й тензометрії. Для оцінки достовірності результатів застосовано статистичну обробку експериментальних даних.

Таким чином, наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертації, є обґрунтованими, методично вивіреними й достовірними.

Дисертація має виражену наукову новизну, що полягає в наступному:

Запропоновано класифікацію безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату, на основі якої за допомогою комбінаторного підходу синтезовано перспективні схеми комбінованого навантаження, що дозволяють знизити енергосилові витрати, зменшити негативні наслідки розвантаження обладнання та підвищити геометричну точність заготовок.

Науково обґрунтовано метод вибору безвідходного способу розділення сортового прокату з урахуванням механічних характеристик матеріалів на основі синергетичних критеріїв руйнування та граничних деформацій. Сформовано класифікацію матеріалів за чутливістю до руйнування, що дає змогу обґрунтовано вибирати спосіб розділення.

Сформульовано закономірності та залежності технологічних параметрів процесу триточкової холодної ломки згином, здійснюваної комбінованим статико-динамічним навантаженням. Застосування методів скінченних різниць та елементів дозволяє реалізувати плавний, симетричний режим навантаження, що підвищує геометричну точність заготовок.

Розроблено залежності для розрахунку параметрів розділення прокату на пресах з клиношарнірними механізмами, які забезпечують зниження енергосилових параметрів і негативного впливу розвантаження в кінці ходу преса.

Запропоновано методику розрахунку геометричних і силових параметрів розділення трубного прокату за допомогою кривошипно-кругового механізму, що поєднує зсув і кручення. Урахування жорсткості інструмента та складного плоского руху дозволяє підвищити ефективність використання зусиль преса.

Обґрунтовано залежності енергосилових параметрів процесу комбінованого навантаження, що реалізується завдяки активним зусиллям преса та реактивним зусиллям деформації технологічної системи. Це дає змогу в межах одного робочого ходу виконувати нанесення концентраторів напружень (вдавленням або частковим зсувом) та остаточне розділення (ломкою або реверсивним зсувом), що підвищує ККД преса й продуктивність процесу.

Удосконалено залежності для визначення силових параметрів процесу розділення прокату в штампах із диференційованим затиском, з урахуванням впливу кутів клинових механізмів та сил тертя. Це дозволяє оптимізувати параметри штампу й підвищити геометричну точність заготовок.

Найбільш важливі наукові положення і результати роботи викладені в загальних висновках дисертації. Основні результати теоретичної частини роботи засновані на дослідженні силового і деформаційного режимів розділення при реалізації безвідходних процесів розділення сортового і трубного прокату, які проведені з використанням методів скінченних різниць і скінченних елементів, методу полів ліній ковзання, аналітичних і графоаналітичних методів теорії механізмів і машин. Розробка нового методу вибору безвідходного способу розділення сортового і трубного прокату із матеріалів з різними механічними характеристиками проведено з використанням методу кластерного аналізу – самоорганізованих мап Кохонена.

Отримані рішення успішно пройшли експериментальну перевірку, для чого автор використовував методи фізичного моделювання та тензометрії. Для оцінки точності отриманих результатів експериментальних досліджень використовувалися методи статистичної обробки дослідних даних.

Вищенаведене дозволяє вважати достовірними та обґрунтованими наукові положення, висновки та рекомендації, наведені у роботі.

Основні положення дисертаційної роботи, базуються на концептуальному підході до рішення проблеми та мають наукову новизну:

1. Розробка класифікації безвідходних способів розділення сортового та трубного прокату, на підставі якої засобами комбінаторики виконаний синтез перспективних способів комбінованого навантаження, що дозволяють зменшити енергосилові параметри процесу розділення, зменшити наслідки розвантаження обладнання в момент зняття технологічного навантаження та підвищити геометричну точність отриманих заготовок.

2. Наукове обґрунтування методу вибору способу безвідходного розділення сортового прокату із матеріалів з різними механічними характеристиками із застосуванням синергетичних критеріїв руйнування та величин граничних деформацій. Створення класифікації матеріалів за ознакою їх чутливості до руйнування, яка дозволяє зробити обґрунтований вибір способу безвідходного розділення.

3. Розробка закономірностей та залежностей 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.

4. Розробка залежностей для розрахунку технологічних параметрів процесу розділення сортового і фасонного прокату на пресах з клиношарнірними механізмами, що дозволяє зменшити енергосилові параметри процесу розділення та шкідливі наслідки розвантаження пресу в кінці робочого ходу.

5. Розробка залежностей 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. Обґрунтування залежностей 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 вдавненням 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.

Значимість роботи для практики

Наукові результати, висновки та рекомендації, сформульовані у висновку дисертації, є логічним завершенням розроблених теоретичних положень, результатів комплексу теоретико-експериментальних досліджень автора,

отримані ним особисто і мають загальнонаціональне значення. Практичну цінність дисертаційної роботи складають наступні її основні результати:

- 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 ножом, 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 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 ножом та кривошипно-круговим механізмом для розділення фасонного і трубного прокату; штампів з диференційованим затиском прокату;

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.

Практичне впровадження у виробництво підтверджується актами впровадження.

Повнота викладення результатів в опублікованих працях, апробація роботи

Матеріали дисертаційної роботи опубліковані в 117 роботах, з яких 10 статей у виданнях, віднесених до першого-третього квартилів (Q1-Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports, 38 – у фахових виданнях, 23 роботи – в матеріалах міжнародних конференцій, 14 публікацій, які додатково відображають наукові результати дисертації. На нові технічні рішення отримано 30 патентів України.

Результати роботи пройшли необхідну апробацію, вони докладені і обговорені на всеукраїнських і міжнародних науково-технічних конференціях за напрямком роботи та на науковому семінарі при спеціалізованій вченій раді Д 12.105.01 (ДДМА, 2024). Основі результати достатньо повно викладені у наукових публікаціях, зарахованих за темою дисертації.

Відповідність змісту реферату основним положенням дисертації

За структурою та змістом реферат відповідає вимогам, встановленим МОН України. У тексті реферату відображено основні положення, зміст, результати і висновки здійсненого Карнаухом С. Г. дисертаційного дослідження. Зміст реферату і основних положень дисертації є ідентичними.

Оцінка оформлення дисертації та реферату

Дисертаційна робота та реферат добре оформлені та ілюстровані. Дисертаційна робота написана чіткою і лаконічною мовою. Виклад матеріалу в роботі має логічну послідовність.

Дотримання принципів академічної доброчесності

За результатами науково-технічної експертизи дисертація Карнауха С. Г. визнана оригінальною роботою, яка не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень.

Зауваження та/або дискусійні питання по дисертації і реферату

В цілому високо оцінюючи зміст дисертації і реферату, слід висловити певні зауваження і уточнити деякі питання.

1. Один із вагомих результатів дисертації пов'язаний із застосуванням синергетичних критеріїв руйнування та граничних деформацій для створення класифікації матеріалів за ознакою їх чутливості до руйнування, що забезпечує обґрунтований вибір способу безвідходного розділення. У цьому контексті цілком логічним виглядає включення огляду основ теорії деформовності як теоретичного підґрунтя та потенційної альтернативи при розробці відповідного методу вибору. Проте виклад цього матеріалу розміщено всередині підрозділу 1.5 Теоретичні й експериментальні дослідження процесів безвідходного розділення сортового і трубного прокату, який також містить інші змістово завершені частини — 1.5.1 Моделювання процесів розділення методом скінченних елементів та 1.5.2 Експериментально-аналітичні й експериментальні методи. Така структура ускладнює сприйняття та знижує логічну узгодженість викладу. З огляду на значущість огляду теорії деформовності для загальної методології дослідження, доцільно було б виділити цей матеріал в окремий підрозділ, що сприяло б кращій структуризації розділу 1.5.
2. На стор. 96 дисертації не достатньо чітко сформульовано речення: «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». Доцільніше було б сформулювати, наприклад, так: «Вибір інтенсивності деформацій як кількісної міри пластичності не є оптимальним, оскільки ґрунтується на спрощеному припущенні про рівнозначність приросту деформацій. Це означає, що приріст деформацій в будь-який момент деформування однаково впливає на процес накопичення ушкоджень — незалежно від поточного виду напруженого стану».
3. На стор. 96 дисертації зазначається «Вірогідність розрахунків граничних деформацій за критерієм (1.27) вище, ніж за критеріями (1.25), (1.26), саме при реалізації об'ємного напруженого стану». Проте, критерій (1.25), на відміну від критеріїв (1.26), (1.27), призначений для моделювання граничних деформацій при високих температурних, тому таке порівняння є методологічно некоректним.
4. Слід відзначити, що понад 50 % джерел у списку використаних опубліковані до 2000 року, що може свідчити про обмежене залучення результатів новітніх досліджень останніх десятиліть. Така структура

бібліографії потребує критичнішого переосмислення з точки зору сучасного стану наукової проблематики. Разом з тим, наявність у списку використаних джерел значної кількості сучасних іноземних публікацій, а також публікацій самого здобувача у 10 виданнях, що входять до першого–третього квартилів (Q1–Q3) за класифікацією SCImago Journal and Country Rank та Journal Citation Reports, свідчить про орієнтацію на світовий рівень досліджень і компенсує зазначений недолік.

5. У процесі обґрунтування доцільності використання синергетичних критеріїв руйнування зазначається, що «процес руйнування при реалізації безвідходних способів розділення прокату супроводжується незначними пластичними деформаціями», а в окремих випадках — «може розглядатися як квазікрихкий». Проте варто врахувати, що розділення може реалізовуватися і шляхом досягнення граничних значень пластичної деформації зсуву, що супроводжується формуванням якіснішої поверхні розділу. Такий варіант механізму руйнування заслуговує на окрему увагу, і бажано було б розширити розгляд підходів до врахування подібних процесів у межах застосування синергетичних критеріїв.
6. Термінологічне формулювання «зсув – кручення» («спосіб комбінованого навантаження за схемою “зсув – кручення”») не є достатньо вдалим і потребує уточнення. Це пов'язано з тим, що кручення тіл, зокрема циліндричних, супроводжується зсувними деформаціями, тобто кручення є однією з форм реалізації зсуву як виду деформації. Водночас, якщо в роботі йдеться про поєднання різних схем зсувного навантаження, зокрема таких, що характеризуються різною орієнтацією головних осей приростів деформацій, доцільно було б більш чітко сформулювати фізичну суть запропонованого комбінованого навантаження. Уникнення термінологічної неоднозначності сприятиме кращому розумінню механізму деформування та підвищенню наукової точності викладу.
7. У роботі для перевірки інформативності синергетичних критеріїв руйнування застосовано методи кластерного аналізу, зокрема нейронні мережі у вигляді самоорганізованих мап Кохонена. Проте не наведено достатньої інформації про вибірки, що використовувались для навчання мереж та тестування їх здатності до класифікації.
8. Із тексту дисертації не зрозуміло, як при реалізації процесів розділення прокату з використанням енергії розвантаження пресу (с. 280) дозується

енергія, яка необхідна для нанесення ефективного концентратора напружень?

9. Екранна форма результатів розрахунку залежності роботи нанесення концентратора напружень від кроку, отримана за допомогою програмного комплексу Deform (с. 22, рис. 27, а), у тексті реферату погано читається у чорно-білому друкованому вигляді.
10. У тексті дисертації та реферату допускаються мовностилістичні помилки, зокрема вживання відносного займенника "які" замість граматично коректного "що" у реченнях із неживими іменниками; вживання терміну «деформованості» замість «деформовності». Наприклад: «...обладнання і оснастки для їх реалізації, які забезпечують можливість суміщених...», «...виявлення механізмів, які створюють ефективні силові і деформаційні ...», «...застосовувати виконавчі механізми, які мають високу жорсткість...», «Запропоновано експериментальний метод визначення деформованості зразків...» тощо. Зустрічаються стилістично недосконалі речення, і у назвах підрозділів, зокрема, «3.1 Методика рішення завдання щодо визначення інформативності синергетичних критеріїв руйнування»; "Методика рішення завдання" — калька з російської "методика решения задачи"; українською більш природно буде, наприклад, «Методика розв'язання завдання...».

Висновок

Викладені зауваження до змісту дисертації не знижують її наукового та практичного рівня і не впливають на загальну позитивну оцінку проведеного дослідження.

Одним із безперечних достоїнств дисертаційної роботи є її тісний зв'язок із реальними науково-дослідними програмами, що виконувалися в межах держбюджетного фінансування Міністерства освіти і науки України, а також госпдоговірних тем у співпраці з провідними машинобудівними підприємствами країни. Такий зв'язок забезпечив прикладну спрямованість дослідження, його відповідність актуальним потребам промисловості, а також підтверджує значний практичний досвід здобувача, який безпосередньо брав участь у виконанні, а подекуди й керівництві зазначеними науково-технічними проектами. Це свідчить про високий рівень обґрунтованості та практичної цінності отриманих результатів.

Дисертація є завершеною кваліфікованою науковою працею, виконаною здобувачем самостійно. Отримані в ній науково обґрунтовані рішення, на базі розвитку наукових основ, застосування нових технологічних способів і засобів комбінованого навантаження та розробки методик проектування технологічних процесів, обладнання та оснастки, вносять помітний внесок у розвиток теорії і практики процесів безвідходних способів розділення сортового і трубного прокату. Наукові положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи в повній мірі обґрунтовані з наукової і технічної точки зору, що свідчить про високий науковий рівень роботи. Це дозволяє оцінити роботу, як таку, що повністю відповідає за своїм науковим рівнем, практичною та теоретичною цінністю, змістом та оформленням вимогам пп. 7 – 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженою постановою Кабінету Міністрів України від 17.11.2021 р. № 1197 із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ України № 502 від 19.05.2023 та № 507 від 03.05.2024 р., а її автор **Карнаух Сергій Григорович** заслуговує присудження йому **наукового ступеня доктора технічних наук** за спеціальністю 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском, 13. – Механічна інженерія.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри вищої математики
Вінницького національного технічного університету,
член Національного Комітету НАН України
з теоретичної та прикладної механіки

Володимир МИХАЛЕВИЧ

Підпис проф. Михалевича В. М. *засвідчую:*

Учений секретар Вінницького національного
технічного університету.

К. Т. Н., доцент



Інна ВІШТАК