

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
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

**УСТИМЕНКО АЛІНА ІВАНІВНА**

УДК 621.74.046

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ЧАВУННИХ ВИЛИВКІВ З ГРАДІЄНТНОЮ  
СТРУКТУРОЮ ТА ВЛАСТИВОСТЯМИ**

136 – Металургія

13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

\_\_\_\_\_ А.І. Устименко

Науковий керівник: Лук'яненко Іван Віталійович, к. т. н.

## АНОТАЦІЯ

*Устименко А.І.* Технологія виробництва чавунних виливків з градієнтною структурою та властивостями. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 136 Металургія. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2025.

Дисертація присвячена дослідженню та розробленню технології виробництва жаростійких чавунних виливків з градієнтною структурою та властивостями для роботи в умовах інтенсивного впливу циклічних термомеханічних навантажень.

Розроблено комплекс технологічних прийомів формування градієнту структури та властивостей за рахунок зміни морфології включень графіту у виливках з жаростійких чавунів. Актуальність дослідження полягає у покращенні експлуатаційних властивостей оснащення склотарної промисловості, а саме – формокомплекту, який піддається інтенсивному впливу термічних навантажень. Відповідно, дана практична цінність є вихідним пунктом для досліджень та утилітарного відображення розробленого комплексу технологічних прийомів.

Дисертаційна робота складається з чотирьох розділів, у яких викладено та обґрунтовано основні результати дисертаційної роботи.

У вступі наведено актуальність дисертаційного дослідження, сформульовано мету та задачі, вказано наукову новизну та практичну цінність.

У першому розділі висвітлено світові екологічні проблеми, що стосуються деструктивного впливу пластикових пакувальних матеріалів на навколишнє середовище та сучасні тенденції їх заміни на альтернативні матеріали природного походження, такі як скло. Наведено характерні проблеми світових виробників скляної порожнистої тари (склотари) та тенденції розвитку галузі в цілому. Розкрито проблеми виробників оснащення, а саме деталей формокомплекту (форми) для виготовлення порожнистих виробів зі скла. На основі проведеного літературного

огляду наведено особливості процесу виробництва склотари, що формують основні вимоги до експлуатаційних властивостей формокомплектів. Проаналізовано поширені матеріали світових виробників формокомплекту, відображено рівень конкурентності вітчизняного виробництва. Розглянуто сучасні методи покращення експлуатаційних властивостей матеріалів, що дозволило оцінити особливості та ефективність технологічних прийомів для подальшого застосування під час виготовлення виливків з жаростійких чавунів. На основі розглянутого та проаналізованого матеріалу – сформульовано мету та задачі дослідження.

У другому розділі описано вихідні матеріали та технологічний процес виплавляння жаростійких чавунів, матеріали для їх позапічного оброблення та особливості проведення. Представлено технологічні варіанти виготовлення виливків, методи дослідження фазових перетворень, мікроструктури, механічних властивостей, жаростійкості та температуропровідності чавунів.

У третьому розділі описано проведені дослідження з визначення хімічного складу жаростійких кремнистих чавунів 310СМ та 350СМХАН на основі аналізу впливу хімічних елементів на формування властивостей жаростійкості матеріалів. За результатами аналізу визначено вміст основних елементів, а саме % мас.: С = 3,0-3,2; Si = 3,1-3,5 – для чавуну 310СМ; С = 3,0-3,6; Si = 1,8-2,6 – для чавуну 350СМХАН. Основними легувальними елементами для обох сплавів обрано: Si, Mo, Cr, Al, Ni.

Визначено температури початку фазових перетворень в дослідних чавунах 310СМ та 350СМХАН методом диференційно-термічного аналізу. Отримані результати порівнювали з характеристиками гомогенних зразків чавуну зі складової формокомплекту для виготовлення склотари. Для порівняння використали складову формокомплекту – форму (далі – вихідний зразок), яка відбракована через локальне потрапляння скла у вентиляційні канали під час налаштування технологічного процесу. За результатами візуального контролю формувальна поверхня вихідного зразка не мала критичних дефектів. Встановлено, що температури початку фазових перетворень дослідних чавунів 310СМ і 350СМХАН перевищують значення температури початку фазових перетворень чавуну вихідного зразка на 31,9 °С та 17,7 °С відповідно.

Встановлено показники жаростійкості (окалиностійкості, ростостійкості та термостійкості) чавунів 310СМ та 350СМХАН за температури  $1000\pm 20$  °С, які порівнювали з аналогічними показниками чавуну вихідного зразка. У результаті встановлено, що після 50 год витримування за температури  $1000\pm 20$  °С зміна питомої маси чавунів 310СМ та 350СМХАН менша порівняно з показниками вихідного зразка. Визначено, що у відсотках, значення окалиностійкості чавунів 310СМ та 350СМХАН кращі за окалиностійкість вихідного зразка на 4% та 2 % відповідно.

У результаті дослідження ростостійкості встановлено, що ріст зразків чавунів 310СМ та 350СМХАН зі збільшенням кількості циклів нагрівання-охолодження (інтервал термоциклування  $25\pm 3$  °С $\leftrightarrow$  $1000\pm 20$  °С) збільшується лінійно. Після 60-ти циклів випробовувань на ростостійкість визначено, що зміна геометричних розмірів зразків чавуну 310СМ тотожна значенням вихідного зразка. Зміна розмірів зразків з чавуну 350СМХАН вдвічі менша порівняно зі змінами в чавуні вихідного зразка. Показники термостійкості зразків із чавунів 310СМ та 350СМХАН після 60-ти циклів нагрівання-охолодження знаходяться на рівні показників чавуну вихідного зразка.

У четвертому розділі представлено результати застосування технологічних варіантів для виготовлення виливків із чавунів 310СМ та 350СМХАН з градієнтною структурою за перерізом. Експериментально проведені дослідження знайшли своє відображення у результатах металографічних досліджень, показниках мікротвердості, твердості та температуропровідності, які підтверджують наявність градієнтної структури та властивостей за перерізом виливків.

Перший технологічний варіант виготовлення виливків з чавунів 310СМ та 350СМХАН полягає в поверхневому обробленні розплаву в ливарній формі силікобарієвим інокулятором марки SB5 фракціями 0,315 мм, 0,4 мм та 0,63 мм. За результатами металографічного дослідження перерізу виливків визначено, що форма включень графіту пластинчата, а розподіл включень – рівномірний. Встановлено, що за перерізом зразків із чавуну 310СМ середні розміри графітових включень змінюються від 290 мкм до 700 мкм, із чавуну 350СМХАН – в 1,5 рази менші порівняно з 310СМ (залежно від зони). Визначено наявність феритно-перлітної металевої матриці. Мікротвердість феритної складової змінюється від 180 HV до



120 HV, а перлітної – від 347 HV до 230 HV. Для зразків 350СМХАН властива перлітно-феритна металева матриця з незначною кількістю фериту у вигляді оторочок навколо графітових включень. Мікротвердість домінуючого перліту знаходиться в діапазоні від 365 HV до 300 HV.

Другий технологічний варіант виготовлення виливків полягає в поверхневому обробленні розплавів 310СМ та 350СМХАН силікобарієвим інокулятором марки SB5 фракцією 0,315 мм у поєднанні із застосуванням холодильників товщинами 10 мм, 20 мм та 30 мм в нижній порожнині ливарної форми. Технологічний варіант дозволив отримати пластинчасту форму включень графіту зі зміною їх розподілу від дрібнорозгалуженого до рівномірного. Встановлено, що у виливках з чавунів 310СМ та 350СМХАН середні розміри графітових включень зменшилися приблизно в 2,5 рази, порівняно з показниками першого технологічного варіанту. У результаті металографічного дослідження мікроструктури зразків, встановлено, що у виливках з чавуну 310СМ наявна феритно-перлітна матриця. Мікротвердість феритної складової змінюється від 218 HV до 162 HV, а перлітної складової – від 350 HV до 253 HV. Для зразків з чавуну 350СМХАН властива перлітно-феритна металева матриця з незначним вмістом фериту, мікротвердість домінуючого перліту змінюється від 337 HV до 260 HV за перерізом усіх зразків.

З метою отримання феритної металевої матриці використано третій технологічний варіант, який полягає у ковшовому обробленні чавунів 310СМ та 350СМХАН силікобарієвим інокулятором марки SB5 та заливанні розплаву на холодильники товщинами 10 мм, 20 мм та 30 мм. Встановлено, що даний варіант дозволив отримати за перерізом виливків обох сплавів градієнт включень графіту пластинчастої форми за розподілом – від дрібнорозгалужених міждендритних до розеткових, які переходять до рівномірних пластинчатих включень графіту. Визначено, що у виливках присутнє зменшення розмірів графітових включень залежно від досліджуваної зони, порівняно з першим та другим технологічними варіантами: для виливків з чавуну 310СМ розміри змінюються від 84 мкм до 357 мкм, а для 350СМХАН – від 65 мкм до 227 мкм. Встановлено, що зразкам із чавуну 310СМ властива повністю феритна металева матриця, значення мікротвердості якої за

перерізом змінюються від 184 HV до 126 HV. При цьому, для зразків з чавуну 350СМХАН характерна перлітна металева матриця з карбідними фазами. Мікротвердість перліту змінюється від 380 HV до 296 HV за перерізом усіх зразків.

З метою отримання градієнтної морфології структурних складових застосовано четвертий технологічний варіант, який полягає у комбінованому (поступовому) обробленні чавунів 310СМ та 350СМХАН: ковшове оброблення розплаву силікобарієвим інокулятором марки SB5 та внутрішньоформове модифікування в реакційній камері магнієвмісним модифікатором марки VL63(M) і лиття розплаву на холодильники товщинами 10 мм, 20 мм та 30 мм. Технологічний варіант забезпечив отримання у всіх виливках з чавуну 350СМХАН розподіл включень пластинчастого графіту від дрібнорозгалуженого міждендритного до розеткового та перехід до рівномірного. Вказаний розподіл включень графіту аналогічний розподілу в зразках, отриманих за третім технологічним варіантом. Однак, дисперсність графітових включень підвищилася в 1,5 рази порівняно з третім технологічним варіантом. Для виливків з чавуну 310СМ, які було виготовлено із застосуванням холодильників товщинами 10 мм та 20 мм, характерна така ж морфологія графітових включень як у виливках із 350СМХАН. Встановлено, що особлива градієнтна зміна морфології графітових включень властива за перерізом виливка з чавуну 310СМ, який виготовлено із застосуванням холодильника 30 мм. Досліджено, що на поверхні контакту з холодильником у виливку присутній шар завтовшки 6 мм з включеннями графіту кулястої форми, діаметром від 2 мкм до 17 мкм та ступенем сфероїдизування в межах від 70 % до 80 %. Встановлено, що з віддаленням від поверхні контакту із холодильником, морфологія включень графіту змінюється від кулястої до вермикулярної форми. Товщина шару включень вермикулярного графіту становить близько 15 мм. Після чого, в глибших шарах відбувається перехід до включень графіту пластинчастої форми розміром до 245 мкм. За результатами досліджень виливків із чавуну 310СМ, визначено, що їм властива феритна металева матриця, а виливкам з чавуну 350СМХАН – перлітно-феритна. Значення мікротвердості фериту в обох чавунах змінюються від 210 HV до 145 HV. Мікротвердість перліту у виливках з чавуну 350СМХАН змінюється за перерізом від 340 HV до 225 HV.

Проведено дослідження температуропровідності виливків з чавунів 310СМ та 350СМХАН, які отримані за третім і четвертим технологічними варіантами виготовлення та із застосуванням холодильника товщиною 30 мм. Встановлено, що показники коефіцієнтів температуропровідності зразків із чавуну 310СМ у середньому на 26 % вищі, порівняно з показниками чавуну 350СМХАН та чавуну вихідного зразка.

Встановлено, що найперспективнішим технологічним варіантом є застосування комбінованого (поступового) оброблення чавуну 310СМ: ковшове оброблення розплаву інокулятором марки SB5 та внутрішньоформове модифікування в реакційній камері ливникової системи модифікатором марки VL63(M) із заливанням на холодильник товщиною 30 мм. Даний варіант дозволив отримати у виливках градієнтну структуру за морфологією графіту: зміна від шару включень графіту кулястої форми до шару з включеннями вермикулярного графіту та перехід до включень пластинчастої форми. За перерізом виливків з градієнтною структурою властива зміна механічних (мікротвердості та твердості) і теплофізичних властивостей, зокрема температуропровідності. Виливки з градієнтною структурою та властивостями можуть бути використані для виготовлення деталей з більшою довговічністю в умовах впливу циклічних термомеханічних навантажень. Застосовувати комбіноване оброблення для виготовлення чавунних виливків необхідно з урахуванням вимог до конкретного виробу.

**Ключові слова:** екологія, структура, розчинність, мікротвердість, кулястий графіт, формувальні матеріали, оксиди заліза, фазовий аналіз, високоміцний чавун, модифікування, кристалізація, стан поверхні, ливарна форма, температуропровідність, виливок

## ABSTRACT

Ustymenko A.I.. Technology of production of cast iron castings with gradient structure and properties. – Qualification scientific work on the rights of manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field 13 Mechanical Engineering, specializing in 136 Metallurgy. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2025.

The dissertation is dedicated to the development and research of a technology for producing heat-resistant cast iron castings with a gradient structure and properties, designed to withstand intense cyclic thermomechanical loads. Various technological methods have been developed to achieve a gradient change in structure and properties by altering the morphology of graphite inclusions in castings made from heat-resistant cast irons. This study is relevant for improving the operational properties of equipment used in the glass packaging industry, particularly the molding set, which is exposed to high thermal stress. Therefore, the practical value of this research serves as the foundation for the study and practical application of the developed set of technological methods.

The content of the work consists of four chapters in which the main results of the dissertation are presented and substantiated.

The introduction describes the relevance of the dissertation research, sets the goal and objectives, and formulates the scientific novelty and practical value.

The first section highlights global environmental issues related to the destructive impact of plastic packaging materials on the environment and current trends in replacing them with alternative materials of natural origin, such as glass. Specific problems of global glass packaging manufacturers and trends in the industry as a whole are described. The problems of manufacturers of equipment, namely moulding sets (glass moulds), for its production are revealed. Based on the literature review, the features of the glass packaging production process that constitute the basic requirements for the operational properties of molds are presented. The common materials used by mold manufacturers worldwide are analyzed, and the competitiveness of domestic production is assessed. Modern methods for

enhancing the performance properties of materials are discussed, which enable the evaluation of the characteristics and effectiveness of technological methods for future use in producing castings from heat-resistant cast irons. Consequently, the study formulates the aim and objectives.

The second section describes the starting materials and technological process of smelting heat-resistant cast irons, materials for out-of-furnace treatment of cast irons, and the specifics of its implementation. Technological variants of castings production, methods for studying phase transformations and heat resistance of materials, microstructure, mechanical properties, and thermal conductivity of cast irons are presented.

Chapter 3 describes the studies conducted to select the chemical composition of heat-resistant siliceous cast irons 310SM and 350SMHAN based on the analysis of the influence of chemical elements on the formation of heat resistance properties of materials. According to the results of the analysis, the main elements were determined as follows: % wt: C = 3,0-3,2; Si = 3,1-3,5 for 310SM cast iron; C = 3,0-3,6; Si = 1,8-2,6 for 350SMHAN cast iron. Si, Mo, Cr, Al, Ni were selected as the main alloying elements.

The temperatures of the onset of phase transformations in the experimental cast irons 310SM and 350SMHAN were determined by differential thermal analysis. The results obtained were compared with the characteristics of homogeneous samples of cast iron from a mould set for the manufacture of glass containers. For comparison, the mould (next – the original sample) was used, which, according to visual inspection, had no critical defects and was rejected due to local glass ingress into the ventilation ducts during the process setup. It was found that the temperature of the onset of phase transformation of the experimental cast irons 310SM and 350SMKhan exceeded the temperature of the onset of phase transformation of the cast iron sample from the original sample by 31,9 °C and 17,7 °C, respectively.

The heat resistance of 310SM and 350SMHAN cast irons at a temperature of  $1000 \pm 20$  °C, specifically scale resistance, growth resistance, and heat resistance, was determined by comparing them with the cast iron of the spent glass mold. It was found that after 50 hours of holding, the change in the specific gravity of 310SM and 350SMHAN cast irons is smaller compared to the indicators of the original sample. In percentage terms, the

scale resistance of 310SM and 350SMHAN cast irons is 4 % and 2 % better than the scale resistance of the original sample.

According to the results of the growth resistance study, it was demonstrated that the growth of 310SM and 350SMHAN cast iron samples increases linearly with an increase in the number of heating-cooling cycles ( $25 \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C} \leftrightarrow 1000 \pm 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Accordingly, after 60 cycles of growth resistance tests, it was determined that the changes in the geometric dimensions of 310SM cast iron are relatively the same as in the original sample, and for 350SMHAN cast iron they are half as much. In terms of heat resistance, after 60 heating-cooling cycles, 310SM and 350SMHAN cast irons are at the level of the original sample.

Chapter 4 presents the results of applying technological options for the manufacture of castings with gradient changes in structural components along their cross-section from 310SM and 350SMHAN cast irons. Experimentally conducted studies were reflected in the results of metallographic studies, determining mechanical and thermal properties, which confirm the presence of a gradient structure along the cross section of the castings.

The first technological option for manufacturing casting from 310SM and 350SMHAN cast is to surface treat the melt in the casting mould with a silicon-barium inoculant of SB5 grade with fractions of 0,315 mm, 0,4 mm, and 0,63 mm. The results of a metallographic study of the castings' cross-section showed that the shape of the graphite inclusions is lamellar and the distribution of inclusions is uniform. The average size of graphite inclusions for the 310SM alloy varies from 290  $\mu\text{m}$  to 700  $\mu\text{m}$  in cross-section, while for the 350SMHAN alloy, the size of graphite inclusions is approximately 1,5 times smaller than for 310SM, depending on the zone. For cast iron 310SM, a ferrite-pearlite matrix is present in the cross-section of all samples. The microhardness of the ferrite component ranges from 180 HV to 120 HV, and the pearlite component ranges from 347 HV to 230 HV. The 350SMHAN samples have a pearlite-ferrite metal matrix with a small ferrite content in the form of rims around graphite inclusions. The microhardness of the dominant pearlite is in the range of 365 HV to 300 HV in the cross-section of all samples.

The second technological variant of casting production involves surface treatment of 310SM and 350SMHAN melt with SB5 silicobarium inoculant with a fraction of 0.315 mm in combination with the use of 10 mm, 20 mm and 30 mm thick chillers in the lower cavity

of the casting mould. The technological variant produced a lamellar shape of graphite inclusions with a change in their distribution from finely branched to uniform. It was found that the size of graphite inclusions in castings from 310SM and 350SMHAN cast irons decreased by about 2,5 times compared to the previous surface treatment, from 80  $\mu\text{m}$  to 475  $\mu\text{m}$ . The metallographic study of castings produced according to this variant revealed that 310SM castings are characterized by a ferrite-pearlite matrix, with the microhardness of the ferrite component varying from 218 HV to 162 HV, and the pearlite component from 350 HV to 253 HV. The 350SMHAN samples are characterized by a pearlite-ferrite metal matrix with a low ferrite content, the microhardness of the dominant pearlite ranging from 337 HV to 260 HV in the cross-section of all samples.

To obtain a ferrite metal matrix, a technological variant was used, which involves ladle treatment of 310SM and 350SMHAN cast irons with an SB5 inoculant and pouring the melt onto chillers with thicknesses of 10 mm, 20 mm, and 30 mm. It has been established that this option allows for a gradient change in the cross-section of lamellar graphite in both alloys. This change involves transitioning from finely interdendritic to rosette and then to uniform lamellar graphite distribution. It has been determined that the castings of this variant are characterized by a decrease in the size of graphite inclusions depending on the studied zone compared to the previous technological variants. Specifically, for castings made from 310SM cast iron, the size of graphite inclusions varies from 84  $\mu\text{m}$  to 357  $\mu\text{m}$ , and for 350SMHAN, it ranges from 65  $\mu\text{m}$  to 227  $\mu\text{m}$ . It has been established that for 310SM cast iron castings, there is complete ferritization of the metal matrix, with microhardness values ranging from 184 HV to 126 HV in the zonal section. Meanwhile, samples from 350SMHAN cast iron exhibit a pearlite metal matrix with carbide phases. The microhardness of pearlite varies zonally from 380 HV to 296 HV in the cross-section of all samples.

To achieve a gradient morphology of structural components, the combined processing of 310SM and 350SMHAN cast irons was conducted. This involved ladle treatment of the melt with SB5 inoculant and in-mold modification in the reaction chamber with VL63(M) modifier, followed by melt casting on 10 mm, 20 mm, and 30 mm thick chillers.

This technological variant ensures that all 350SMHAN castings have a lamellar graphite distribution ranging from finely branched interdendritic to rosette and uniform distribution, which is similar to the previous variant. The dispersion of graphite inclusions increased by up to 1,5 times compared to ladle treatment alone. For 310SM cast iron castings produced using 10 mm and 20 mm thick chillers, the distribution of changes in the morphology of graphite inclusions is similar to that of 350SMHAN.

The results of the study revealed that a specific gradient change in graphite inclusions along the cross-section is present in a casting made of 310SM cast iron, which was produced using a 30 mm chiller. Studies of the casting show that the surface in contact with the chiller contains a layer of spheroidal graphite inclusions with a diameter of 2  $\mu\text{m}$  to 17  $\mu\text{m}$ , and the degree of spheroidization ranges from 70 % to 80 %. The thickness of the cast iron layer with spheroidal graphite inclusions is about 6 mm. It has been determined that spheroidal graphite is replaced by vermicular graphite, with a thickness of about 15 mm. After that, there is a transition to lamellar graphite with inclusion sizes up to 245  $\mu\text{m}$ . According to the results of studies on 310SM alloy castings, it was determined that they are characterized by a ferrite metal matrix, while 350SMHAN castings are characterized by the formation of both ferrite and pearlite components. The microhardness of the ferrite component in castings from both cast irons showed high values at 210 HV, which decrease along the cross-section of the casting to 145 HV. The microhardness of the pearlite component of the matrix of castings from 350SMHAN cast iron varies along the cross-section of the castings from 340 HV to 225 HV.

After studying the thermal conductivity of castings produced by ladle treatment of 310SM and 350SMHAN cast irons with SB5 inoculant, using melt casting on a 30 mm thick chiller and combined treatment, which involves ladle treatment with SB5 inoculant and in-mold modification in the reaction chamber with the VL63(M) modifier on a 30 mm thick chiller casting, it was observed that a gradient change in structural components occurred not only in terms of changes in the morphology of the structure but also in terms of thermal conductivity. The study revealed that the thermal conductivity coefficients of 310SM cast iron samples are up to 26 % higher than those of 350SMHAN cast iron and original sample cast iron.



It has been determined that the most promising technological option is the use of combined processing of 310SM cast iron. This process involves ladle treatment of the melt with the SB5 inoculant and in-mold modification in the reaction chamber of the casting system with the VL63(M) modifier. The castings are poured on a 30 mm thick chiller, which ensures the production of castings with a gradient in the morphology of structural components along their cross-section. This gradient ranges from a layer of cast iron with spheroidal graphite to a layer with lamellar graphite through an intermediate layer of cast iron with a vermicular graphite form. This process results in a change in both mechanical and thermal properties along the cross-section of the castings. Castings with a gradient structure and properties can be used to manufacture parts with increased durability under cyclic thermal and mechanical loads. The technological option for manufacturing castings by combined processing should be selected based on the requirements for a particular product.

**Key words:** ecology, structure, solubility, microhardness, spheroidal graphite, moulding materials, iron oxides, phase analysis, high-strength cast iron, modification, crystallisation, surface condition, mould, thermal conductivity, casting

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні результати дисертаційної роботи викладено в 9 публікаціях, у тому числі: 1 фахова стаття категорії «А», 4 фахові статті категорії «Б» та 4 тези доповідей на міжнародних науково-технічних і науково-практичних конференціях.

1. Lukianenko I. V., Yamshinskij M. M., Byba Ie. G., **Ustymenko A. I.**, Kovalenko I. V., Leonov D. S., Barabash M. Yu. Features of the Fabrication of High-Alloy Wear-Resistant Cast Irons for Operation in Conditions of Hydroabrasive Wear, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2024, Vol. 46, No. 12. P. 1205-1223. <https://doi.org/10.15407/mfint.46.12.1205> (*Особистий внесок*: брала участь в обговоренні та узагальненні результатів, підготувала статтю до друку).

2. **Устименко А.І.**, Лук'яненко І.В. Характеристики низьколегованого чавуну для формокомплектів у склотарній галузі. *Металознавство та обробка металів.* 2024. Том 30, №4. С. 14-24. <https://doi.org/10.15407/mom2024.04.014> (*Особистий внесок*: брала участь у виготовленні дослідних зразків, обробленні та обговоренні результатів, підготувала статтю до друку).

3. **Устименко А.І.**, Лук'яненко І.В. Особливості отримання градієнтної структури в чавунних заготовках для форм склотарної промисловості. *Процеси лиття.* 2024. Том 158, № 4. С. 3-13. <https://doi.org/10.15407/plit2024.04.003> (*Особистий внесок*: брала участь у виготовленні дослідних зразків, проведенні аналітичного огляду результатів, узагальненні результатів).

4. **Устименко А.І.**, Лук'яненко І.В. Вплив технології ливарної форми на утворення градієнтної структури виливків із жаростійкого чавуну. *Процеси лиття.* 2024. Том 156, № 2. С. 47-55. <https://doi.org/10.15407/plit2024.02.047> (*Особистий внесок*: брала участь у виготовленні дослідних зразків, обробленні та обговоренні результатів, підготувала статтю до друку).

5. **Устименко А.І.**, Лук'яненко І.В., Ямшинський М.М., Гурія І.М., Кивгило Б.В. Нові жаростійкі сплави для виготовлення склоформ. *Процеси лиття.* 2023. Том 151, № 1. С. 43-53. <https://doi.org/10.15407/plit2023.01.043> (*Особистий внесок*: брала участь в обговоренні та узагальненні результатів).

6. **Устименко А.І., Лук'яненко І.В.** Особливості технологічних методів виготовлення чавунних заготовок для чорнового та чистового склоформуального комплексу. Development of science in the conditions of deepening european integration processes: XXVIII International Science and Practical Conference, Rome, Italy, 15-17 July, 2024. Rome, 2024. p. 174-178. (*Особистий внесок:* брала участь в аналітичному огляді, обробленні та обговоренні результатів, підготувала тези до друку).

7. **Устименко А.І., Лук'яненко І.В.** Застосування технологічних прийомів для утворення градієнтної структури чавунних деталей формокомплекту склотарної промисловості. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2024*: зб. тез доп. XVI міжнар. наук.-техн. конференція, м. Київ, 25-26 квітня 2024 р. Київ, 2024. С. 336-339. (*Особистий внесок:* брала участь в обробленні та обговоренні результатів, підготувала тези до друку).

8. **Устименко А.І., Лук'яненко І.В., Кивгило Б.В.** Аналіз мікроструктури відпрацьованих деталей склоформи та напрямки покращення їх експлуатаційної стійкості. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2023*: зб. тез доп. XV міжнар. наук.-техн. конференція, м. Київ, 28-29 квітня 2023 р. Київ, 2023. С. 331-336. (*Особистий внесок:* брала участь в обговоренні та узагальненні результатів, підготувала тези до друку).

9. **Устименко А.І., Лук'яненко І.В.** Перспективи використання чавунних виливків з градієнтною структурою у якості деталей формокомплекту для виготовлення склотари. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2022*: зб. тез доп. XIV міжнар. наук.-техн. конференція, м. Київ, 28-29 квітня 2022 р. Київ, 2022. С. 185-188. (*Особистий внесок:* брала участь в обговоренні та узагальненні результатів, підготувала тези до друку).

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....</b>	<b>19</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>20</b>
<b>1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ПРОБЛЕМАТИКИ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ .....</b>	<b>25</b>
1.1 Тенденції розвитку склотарного світового та вітчизняного виробництва .....	26
1.2 Фізико-хімічні властивості скла .....	29
1.3 Технологічні процеси виготовлення тарного скла та формування скловиробу .....	32
1.4 Основні способи виготовлення скляної тари .....	34
1.5 Конструкція та особливості формокомплекту для виготовлення скляної тари .....	35
1.6 Вплив циклічних термомеханічних умов на форми під час виробництва порожнистої скляної тари.....	37
1.7 Причини утворення дефектів в формах та необхідні властивості матеріалу .....	42
1.8 Аналіз матеріалів формокомплекту .....	44
1.9 Технологічні способи виготовлення чавунних деталей формокомплектів .....	47
1.10 Порівняння властивостей чавунів для формокомплекту .....	48
1.11 Аналіз хімічного складу чавунів деталей формокомплекту для виготовлення скляної тари.....	49
1.12 Жаростійкість чавунів.....	51
1.13 Способи підвищення експлуатаційних властивостей деталей формокомплекту .....	54
1.14 Підвищення експлуатаційних властивостей чавунних деталей формокомплекту за допомогою регулювання процесів кристалізації литої заготовки .....	54
1.15 Технологічні методи позапічного оброблення.....	57
Висновки до розділу 1 та задачі дослідження .....	61
<b>2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....</b>	<b>64</b>
2.1 Технологічний процес виплавлення чавунного розплаву .....	64

2.2	Характеристики хімічного складу досліджуваних чавунів .....	65
2.3	Характеристики матеріалів та способів оброблення чавуну .....	65
2.4	Виготовлення ливарних форм та технологічні варіанти виготовлення заготовок.....	66
2.5	Підготовка зразків для досліджень.....	68
2.6	Металографічні дослідження .....	69
2.7	Дослідження фізико-механічних характеристик зразків .....	70
2.7.1	Визначення твердості зразків та мікротвердості окремих структурних складових .....	70
2.7.2	Методика визначення температуропровідності зразків .....	70
2.7.3	Метод диференційно-термічного аналізу дослідження зразків .....	75
2.7.4	Дослідження окалиностійкості чавунів .....	77
2.7.5	Дослідження термостійкості та ростостійкості чавунів .....	79
2.8	Оброблення отриманих результатів .....	80
	Висновки до розділу 2.....	80
<b>3</b>	<b>ВИЗНАЧЕННЯ ХІМІЧНИХ ТА ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДОСЛІДНИХ ЧАВУНІВ .....</b>	<b>82</b>
3.1	Підбір хімічного складу дослідних чавунів .....	82
3.2	Результати досліджень матеріалів за допомогою методу ДТА.....	85
3.2.1	Дослідження чавуну 310СМ методом ДТА .....	86
3.2.2	Дослідження чавуну 350СМХАН методом ДТА .....	88
3.2.3	Дослідження чавуну В.3. методом ДТА .....	89
3.3	Результати дослідження жаростійкості дослідних зразків чавунів .....	90
3.3.1	Дослідження окалиностійкості дослідних зразків .....	90
3.3.2	Дослідження ростостійкості та термостійкості зразків .....	92
	Висновки до розділу 3.....	97
<b>4</b>	<b>ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ ОТРИМАННЯ ЧАВУННИХ ВИЛИВКІВ З ГРАДІЄНТНОЮ СТРУКТУРОЮ ТА ВЛАСТИВОСТЯМИ.....</b>	<b>99</b>
4.1	Перший технологічний варіант – поверхневе оброблення розплаву чавуну інокулятором різної дисперсності .....	100

4.1.1	Властивості виливків із чавуну 310СМ.....	100
4.1.2	Властивості виливків із чавуну 350СМХАН.....	107
4.2	Другий технологічний варіант – поверхнєве оброблення розплаву чавуну інокулятором фракції 0,315 мм та застосування холодильників .....	113
4.2.1	Властивості виливків із чавуну 310СМ.....	114
4.2.2	Властивості виливків із чавуну 350СМХАН.....	121
4.3	Третій технологічний варіант – ковшове оброблення розплаву чавуну та застосування холодильників різних товщин .....	127
4.3.1	Властивості виливків із чавуну 310СМ.....	128
4.3.2	Властивості виливків із чавуну 350СМХАН.....	135
4.4	Четвертий технологічний варіант – комбіноване (поступове) ковшове оброблення розплаву чавуну та внутрішньоформове модифікування із застосуванням холодильників .....	141
4.4.1	Властивості виливків із сплаву 310СМ.....	141
4.4.2	Властивості виливків із сплаву 350СМХАН .....	149
4.5	Визначення коефіцієнтів температуропровідності зразків дослідних чавунів .....	156
	Висновки до розділу 4.....	160
	<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>164</b>
	<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>167</b>
	<b>ДОДАТОК А.....</b>	<b>182</b>
	<b>ДОДАТОК Б .....</b>	<b>184</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

РЗМ – рідкісноземельні метали;

ІМВТ – імпульсний метод вимірювання температуропровідності;

ІЧ – інфрачервоне теплове випромінювання;

ДТА – диференційно-темічний аналіз;

ОЦК – об’ємноцентрована кубічна ґратка;

ГЦК – гранецентрована кубічна ґратка;

В.З. – вихідний зразок;

$dQ$  – кількість теплоти, Дж;

$\rho$  – густина речовини, кг / м<sup>3</sup>;

$T$  – термодинамічна температура, К;

$S$  – ентропія одиниці маси речовини, Дж / К;

$\vec{q}$  – вектор густини теплового потоку, Вт / м<sup>2</sup>;

$\kappa$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт / (м · К);

$\vec{\nabla}T$  – градієнт температур;

$J_0$  – інтенсивність імпульсного випромінювання,

$R$  – коефіцієнт відбивання світла поверхнею;

$r$  – радіус світлового пучка;

$W(r, t)$  – форма проходження теплового імпульсу;

$C_p$  – питома об’ємна теплоємність, Дж / (кг · К);

$L$  – товщина шару, м;

$\chi$  – коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup> / с;

$\tau_d$  – зсув у часі максимуму пройденого теплового імпульсу, с;

$C$  – ізобарна теплоємність, Дж / (кг · К);

$\Delta P$  – різниця маси до та після випробовування, г;

$\tau$  – час витримування за температури випробовування, год;

$s$  – площа поверхні, м<sup>2</sup>

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Технологічні інновації та глобалізація економіки призводять до зростання темпу життя та продукування величезної кількості різноманітних товарів, що у свою чергу загостило питання сталого розвитку суспільства та екологічної ситуації. Важливим фактором впливу на погіршення екологічної ситуації є забруднення довкілля пластиковими відходами. Одним з основних джерел таких відходів є пакувальні матеріали харчових продуктів, тому виникає потреба в альтернативних екологічних матеріалах [1, 2]. Нині особливу увагу приділено склу, як альтернативі пластику, адже його ґрунтовною перевагою є можливість зворотного процесу перероблення, при майже відсутньому впливі відходів на навколишнє середовище, оскільки скло виготовляють з природних речовин [3, 4].

Всесвітня тенденція заміни пластикової тари на скляну призвела до трансформацій та активного нарощування вітчизняних виробничих потужностей, які орієнтуються на нормативну базу європейського ринку, а це в свою чергу дає поштовх до розроблення нових матеріалів та технологій для виготовлення скляної тари [5-8]. Характерними проблемами для вітчизняних виробників склотарної продукції є імпортозалежність та низький термін експлуатації високовартісного склоформуального оснащення, а саме формокомплекту (форма), які працюють в умовах інтенсивного впливу циклічних термічних навантажень.

Світова практика виділяє чавун як основний матеріал для виготовлення елементів формокомплектів, а метод виробництва заготовок – лиття, що дозволяє регулювати структуру та властивості матеріалу на етапі їх виготовлення. Відповідно необхідні експлуатаційні характеристики деталей (міцність та жаростійкість), які піддаються інтенсивному впливу термічних навантажень, забезпечують саме завдяки стабілізації хімічного складу та технологічних методів виготовлення заготовок, які регулюють поведінку та формування структурних компонентів матеріалу [9-15].

Тому актуальним питанням, що становить науковий та практичний інтерес, є визначення складу жаростійких чавунів та дослідження технології виробництва



виливків деталей формокомплектів, які матимуть покращені експлуатаційні властивості в умовах інтенсивної дії циклічних термічних навантажень.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалась на кафедрі ливарного виробництва Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» і мала зв'язок з НДР «Розроблення технології виготовлення чавунних виливків» (договір № Дндч/0201.01/7000.02/16/2021 від 10.11.2021 р.).

**Мета роботи** – створення комплексу технологічних прийомів формування градієнтної структури та властивостей у виливках з жаростійких чавунів.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

1. Визначити хімічний склад дослідних чавунів на основі комплексного аналізу бази даних жаростійких чавунів, які працюють в умовах циклічних термічних навантажень, сумісно з урахуванням впливу хімічних елементів на формування їх властивостей.

2. Визначити температури почату фазових перетворень в дослідних чавунах.

3. Визначити показники жаростійкості дослідних чавунів.

4. Розробити комплекс технологічних прийомів для виготовлення виливків із градієнтою структурою та властивостями за перерізом.

5. Дослідити зміни структури за перерізом виготовлених виливків металографічним методом.

6. Визначити механічні та теплофізичні властивості за перерізом виготовлених виливків.

**Об'єкт дослідження** – комплекс технологічних прийомів отримання виливків з жаростійких чавунів для роботи в умовах термічних навантажень.

**Предмет дослідження** – хімічний склад, теплофізичні та механічні властивості, технологічні параметри позапічного оброблення сплавів та структура чавунів.

**Методи дослідження.** Експериментальні дослідження для досягнення поставленої мети та задач виконували за допомогою сучасних методів та устаткування. Дослідження механічних властивостей та спеціальних властивостей (окалиностійкості, ростостійкості та термостійкості) чавунних виливків здійснювали

за сучасними стандартними нормативними методиками. Визначення коефіцієнту температуропровідності проводили імпульсним методом. Диференційно-термічний аналіз проводили на синхронному термічному аналізаторі STA 449 C Jupiter (NETZSCH). Металографічні дослідження проводили за допомогою оптичного мікроскопу iScore, IS.1053-PLMi (Euromex).

### **Наукова новизна одержаних результатів:**

1. Визначено хімічний склад низьколегованих графітизованих чавунів з підвищеним вмістом кремнію (Si). Застосування легувальних елементів (Mo, Cr, Al, Ni, Ti) у різних комбінаціях та кількостях дозволило отримати підвищення температури початку фазових перетворень, що сприяє збільшенню експлуатаційного ресурсу матеріалів в умовах впливу циклічних термічних навантажень.

2. Встановлено експериментально підвищені показники жаростійкості низьколегованих графітизованих чавунів з підвищеним вмістом кремнію (Si) для роботи в умовах впливу циклічних термічних навантажень. Це дозволило отримати кращі окалинотійкість, ростостійкість та термостійкість приблизно до 1,7 разів, що обумовлює збільшення терміну експлуатації виробів та зменшує витрати виробництва.

3. Вперше використано послідовне оброблення (ковшове силікобарієм та внутрішньоформове магнієвмісним модифікатором) рідкого чавуну з пришвидшеною кристалізацією у формі під час контакту з холодильником із сірого чавуну товщиною стінки 30 мм. Це дозволило отримати матеріал із градієнтом морфології графітових включень, а саме від кулястого до вермикулярного та перехід до пластинчастого графіту.

4. Встановлено, що послідовне оброблення розплаву чавуну забезпечує зміну коефіцієнтів температуропровідності за перерізом виливків залежно від градієнту структури. Отримані значення коефіцієнтів температуропровідності вищі на 26 % за показники аналогічного матеріалу, що сприяє підвищенню експлуатаційних характеристик матеріалу в умовах інтенсивного впливу циклічних термічних навантажень.

**Практичне значення отриманих результатів.** Запропоновано хімічні склади чавунів для виготовлення виливків з градієнтною структурою для роботи в умовах впливу циклічного термічного навантаження. Визначено кількісний склад інокулятора для ковшового оброблення та модифікатора для внутрішньоформового оброблення. На основі результатів досліджень (окалиностійкість, ростостійкість та термостійкість) запропоновано технологічні рішення виготовлення чавунних виливків із прогнозованою градієнтною структурою, що забезпечують стабільність процесу отримання склотарної продукції. Розроблено технологію виготовлення чавунних заготовок для деталей формокомплекту склотарного виробництва, які мають покращені експлуатаційні характеристики порівняно з аналогічною імпоротною продукцією. Використання розробленої технології одержання виливків із жаростійкого кремнистого чавуну дозволить металургійним підприємствам зайняти нішу з виготовлення заготовок для скляної промисловості.

Теоретичні та експериментальні результати, які представлено в дисертаційній роботі використані в навчальному процесі здобувачів вищої освіти металургійного профілю.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертація містить наукові результати, отримані дисертантом особисто або за його участю. Зокрема дисертантом здійснено літературний огляд за тематикою роботи, підготовлено зразки до проведення досліджень, проведено металографічні дослідження, визначено окремі властивості жаростійкості, визначено механічні властивості, оброблено, оформлено та узагальнено експериментальні дані.

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи висвітлено на: XIV міжнародній науково-технічній конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2022» (м. Київ, 28-29 квітня 2022); XV міжнародній науково-технічній конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2023» (м. Київ, 28-29 квітня 2023); XVI міжнародній науково-технічній конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2024» (м. Київ, 25-26 квітня 2024); XXVIII International Science and Practical Conference «Development of science in the

conditions of deepening european integration processes» (м. Рим, Італія, 15-17 липня 2024).

### **Структура та обсяг дисертації**

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і 2-х додатків. Загальний обсяг дисертації становить 184 сторінки, у тому числі основного тексту дисертації 148 сторінок, 83 рисунки, 14 таблиць, список використаних джерел зі 120 найменувань та додатків на 3 сторінках.

## **1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ПРОБЛЕМАТИКИ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ**

У сучасному світі велика кількість загострених питань скупчилася навколо екологічного стану довкілля. Відповідно, дана проблематика диктує нові тенденції у споживанні та звичках людей. Одним із найпоширенішим продуктом у вжитку став пластик, його використовують для пакування продукції, виготовлення тари, столових приборів та посуду, що мають одноразове призначення, тобто такого, який після використання викидається. Головна особливість забруднення довкілля пластиком, виробленого за різними технологіями, полягає в тому, що середній час його розкладання, за оцінкою National Geographic, коливається від 450 років до нескінченності [1].

Згідно з дослідженнями в Європі, річка Дунай щорічно викидає в Чорне море від 530 тонн до 1500 тонн пластику. Інше європейське дослідження підрахувало, що від 20 тонн до 31 тонн потрапляє в Північне море щороку з річки Рейн, причому різні місця вздовж цієї річки демонструють наявність значних джерел (наприклад, очисні споруди, притоки) і поглиначів. В італійській річці По відібрані концентрації відрізнялися сезонно, що підкреслює забруднення прісної води в річках як географічно, так і в часі [2, 16].

Тому, внаслідок деструктивного впливу пластикових відходів на екологічну ситуацію, виникає потреба у альтернативних йому екологічних матеріалах. Скло є одним із таких матеріалів, що дозволяє замінити пластик у виготовленні тари, воно використовувалося ще з давніх часів, та популярність пластику поступово затьмарила його. Звісно, як і пластик воно відноситься до побутових відходів, але ґрунтовною перевагою скла є можливість зворотного процесу переробки та менша кількість викидів, а також майже відсутній вплив наявності відходів, оскільки скло зроблено з природніх речовин, які не є чужорідними природі, а тому практично не мають токсичного впливу.

Зростання рівня життя людей, свідомості до екологічного питання обумовлене посиленням індустріалізації, технологічних інновацій, розвитку підприємництва.

Водночас, відбулося піднесення науки про пакувальні матеріали харчових продуктів переважно через зростання високих стандартів якості та безпеки харчових продуктів.

В цьому питанні склотара є головною, адже близько 130 мільйонів тонн щороку, а це 50 % світового виробництва скла, виготовляє тільки промисловість Європейського союзу (ЄС). Найбільшу частину виробленої продукції займає тара для напоїв (мінеральна вода, вино, пиво, міцні та безалкогольні напої) і це близько від 75 % до 80 % від загального виробництва. Залишок, у розмірі від 20 % до 25 % припадає на банки з широким горлом, що використовуються для пакування продуктів харчування [3, 4].

Всесвітня тенденція із заміни пластикової тари на скляну, антропогенна свідомість людства та підвищення цінності земних ресурсів призводить до збільшення попиту скловиробів, розвитку циркуляційних моделей економіки для переробки та виробництва, що в свою чергу дає поштовх до нарощування виробничих потужностей, розроблення нових матеріалів та технологій для виготовлення скляної тари [5, 6, 8].

### **1.1 Тенденції розвитку склотарного світового та вітчизняного виробництва**

Виробництво скла є однією з базових промисловостей, що задовольняє потреби як люднй, так і промисловостей. Скляна промисловість виробляє широкий спектр продукції конструкційного, хімічно-лабораторного, господарсько-побутового, електро-технічного, медичного, оптичного, художнього призначення тощо.

Однією із взірцевих для наслідування та співпраці для України є промисловість європейських країн, що обслуговує важливі сектори не лише на внутрішніх ринках, але й для експорту високоякісної продукції по всьому світу. В Європейському союзі налічується близько 160 заводів, які виробляють 80 мільярдів скляних пляшок, банок і флаконів щороку. Скляна промисловість приносить 9,5 мільярдів євро щорічного ВВП (валовий внутрішній продукт) ЄС і забезпечує 125 000 робочих місць [6].

Згідно з даними, зібраними Європейською федерацією тарного скла – у першій половині 2022 року виробництво та загальний обсяг продажів досягли рекордних рівнів. Показники виробництва в другому півріччі 2021 року та в 2022 році зросли на 3 % як у тонах, так і в одиницях, а загальний обсяг продажів зріс на 8,0 % у тоннах (8,5 % в одиницях) порівняно з першою половиною 2021 року. Це був найвищий темп зростання, зареєстрований з першого півріччя 2016 року. Загалом, з першого півріччя 2016 року до першого півріччя 2022 року обсяг продажів тарного скла зріс на 14,2 % в тоннах (1,5 млн тонн) і на 13,0 % в одиницях (5,3 млрд одиниць) [5, 6].

В останні роки скляна промисловість України також зазнала трансформацій та почала активно розвиватися, орієнтуючись на європейський ринок, стандарти та норми виробництва. Вітчизняні підприємства почали випускати якісну та конкурентоспроможну продукцію, що користується популярністю не тільки на теренах власної держави, а й за кордоном.

Ринок продукції нестабільний (рис. 1.1), але все ж вітчизняне виробництво демонструє тенденцію зростання [7, 8]. Так, українські підприємства виробили 3,44 млрд од. склотари у 2019 році, що на 8,1 % більше, ніж у 2018 році [4].

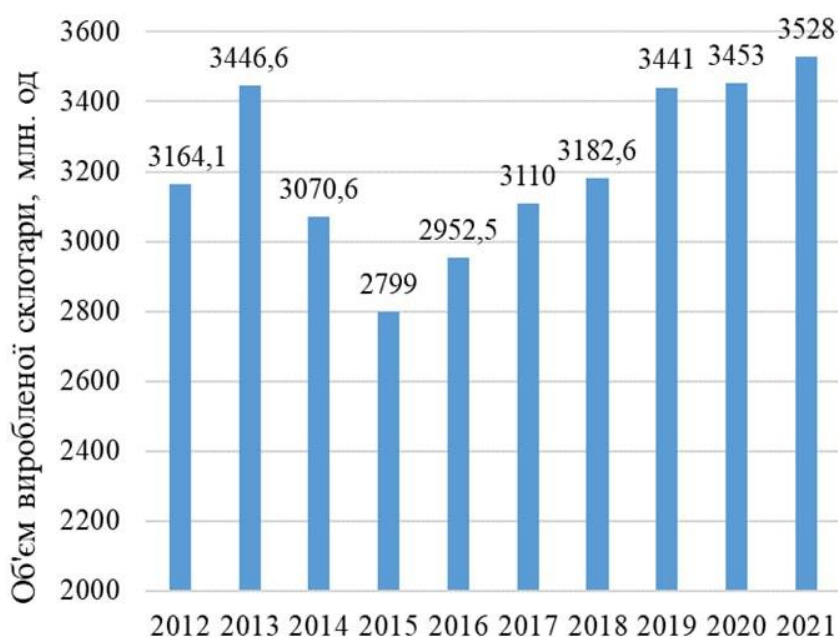


Рисунок 1.1 – Аналіз виробленої склотари в Україні (за період 2012-2021 роки)

У першій половині 2020 року заводи України експортували 813,8 млн од. склотари, що на 20 % більше, ніж за аналогічний період 2019 року, а сам експорт склотари становив понад 42 % від загальних обсягів виробництва [4].

Асоціація підприємств скляної промисловості «Скло України» налічує майже 60 українських та іноземних підприємств в цій галузі. Але головними підприємствами, які репрезентували виробництво скляної тари були компанії (рис. 1.2), на які припало 95,8 % ринку. Майже весь обсяг використання пляшок в Україні, а це 89 %, припадає на алкогольні вироби [4, 5].



Рисунок 1.2 – Лідери-виробники скляної тари в Україні (на 2020 р.)

На перший погляд українське скловиробництво є розвиненим та продуктивним, однак не самодостатнім, адже проблеми виникають не тільки у фінансовому, нормативно-методичному забезпеченні, а й в секторі інновацій та розробок. Нині українська промисловість та підприємства інтегрують нові стандарти та нормативи виробництва, а також стратегії розвитку на основі нових тенденцій та рішень, що значно збільшать об'єми виробництва та зменшать собівартість виготовленої продукції як на галузевому рівні, так і на окремих підприємствах.

Одним із недоліків промислових підприємств України, які займаються виготовленням скляної тари, є використання оснащення закордонного виробництва для безпосереднього формоутворення тари – формокомплект, особливо такої деталі як форма. Головними проблемами з якими стикаються українські виробники скляної



тари при експлуатації формокомплектів, є низька їх стійкість та висока вартість при закупівлі у найкращих світових виробників.

Розроблення та удосконалення матеріалів і технологій виготовлення елементів формокомплекту, які гарантуватимуть високі експлуатаційні характеристики на рівні закордонних аналогів, що будуть забезпечувати їхню імпортоконкурентність та імпортозаміщення, є актуальною проблемою галузі для українських підприємств. Для цього необхідно заглибитися в основи властивостей та виробництва скла, що обумовлюють умови експлуатації матеріалу формокомплекту.

## 1.2 Фізико-хімічні властивості скла

Скло – це аморфний, ізотропний матеріал, що має характеристики твердого тіла, які отримані внаслідок зміни в'язкості в процесі переохолодження розплавленого скломатеріалу, при цьому процес переходу з рідкого стану в твердий є зворотнім. Скло практично інертне та непроникне за кімнатних температур, що робить його найстабільнішим з усіх пакувальних матеріалів та мінімізує ризик потрапляння шкідливих хімічних речовин у їжу чи напої, що упаковані в скляну тару [17, 18].

За твердженням Американського товариства з випробувань матеріалів (ASTM) скло є неорганічним продуктом, що утворюється охолодженням до твердого стану без кристалізації [18]. Особливістю скла є те, що воно схоже на тверде кристалічне тіло – за рахунок жорсткості та чіткості форми, та на рідке – за рахунок асиметричності та ізотропічності структури. Специфічні властивості, що відрізняють скломатеріал від кристалів та рідини, не залежать від хімічного складу та температурної області затвердівання.

Процеси затвердівання та плавлення скла здійснюються в температурному інтервалі, який називають інтервалом склування: у ньому відбувається перехід у твердий стан під час затвердівання або у рідкий під час нагрівання. Однією з найважливіших властивостей скла під час технологічного процесу виробництва, є в'язкість скла. Показники в'язкості скла за температури варіння становлять  $10 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ,

що в 40000 разів більше від в'язкості розплавленого металу (сталі) [18, 19]. Деякі оксиди, в хімічному складі скла, підвищують в'язкість –  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ , а певні знижують –  $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{BaO}$  [20, 21]. Швидкість формування, тверднення та термічного оброблення виробу зі скла залежать від значень інтервалу робочої в'язкості. Температура, за якої виріб зі скла здатний деформуватися під власною вагою називається температурою розм'якшення, а інтервал між точкою розм'якшення та робочою точкою – це інтервал робочої в'язкості скла [17, 19, 20]. Відповідно, скло різного хімічного складу класифікують на таке, що має більший температурний інтервал формування виробів від 250 °C до 500 °C (як приклад свинцевий криштал), та таке, що має менший температурний інтервал формування – від 100 °C до 150 °C (тарне скло) [17, 18]. Процес виробництва скла вимагає розрахунків та експериментальних досліджень для побудови залежності температура-в'язкість. Однак, за твердженнями дослідників [20], на практиці часто використовують спрощену модель, що передбачає емпіричні залежності реперних значень в'язкості скла від температур, які найбільш важливі в технології виробництва (рис. 1.3).

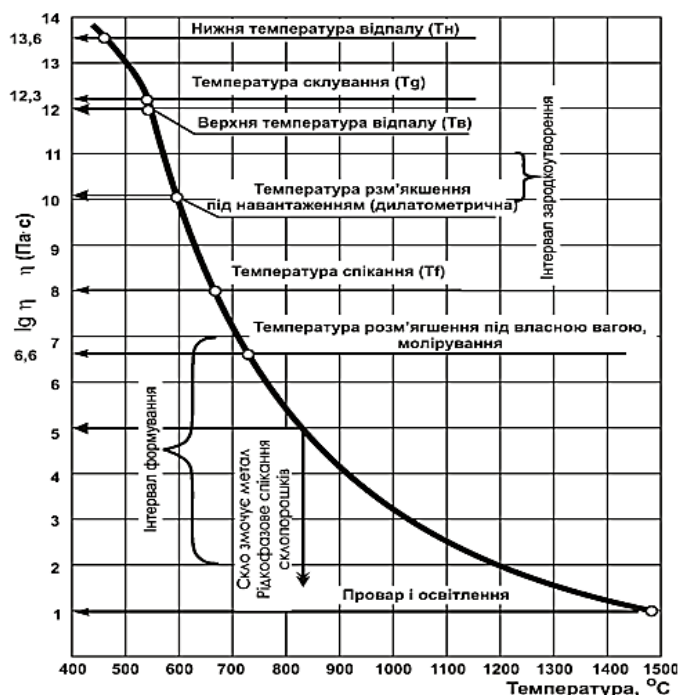


Рисунок 1.3 – Температури та значення реперних точок в'язкості скла, які найбільш важливі при виробництві [20]

В тому числі, одним із важливих явищ в технології виробництва склопродукції є поверхневий натяг, який впливає на процеси варіння, гомогенізації, формоутворення, видування, на однорідність скломаси та видалення газів (відповідає за утворення газових дефектів). Нескомпенсовані молекулярні сили на границі поділу фаз впливають на поверхневу енергію, що і є поверхневим натягом скла. Залежно від хімічного складу, деякі оксиди підвищують поверхневий натяг –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{ZrO}_2$  тощо, а деякі знижують –  $\text{Cr}$  ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CrO}_3$ ),  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$  тощо. Коефіцієнт поверхневого натягу розплавленого скла за температури від  $1000^\circ\text{C}$  до  $1400^\circ\text{C}$  становить від  $0,2 \text{ Дж/м}^2$  до  $0,38 \text{ Дж/м}^2$ , а зміна коефіцієнту поверхневого натягу на кожні  $100^\circ\text{C}$  становить від  $1\%$  до  $3\%$  [17, 18, 20, 21].

Теплофізичні властивості скла визначають придатність його для експлуатації в якості конструкційного, будівельного та захисного матеріалу в різних галузях промисловості та в побуті, де скляні вироби працюють в умовах змін температур. До теплофізичних властивостей скла належать теплоємність, теплопровідність, теплове розширення, термостійкість. Величина теплових властивостей скла залежить від його хімічного складу і температури [20].

Дослідники [17-19] виокремлюють ряд найбільш важливих теплових властивостей скла:

а) *питома теплоємність скла* залежить від температури: під час нагрівання до температури пом'якшення теплоємність скла зростає, але незначно, а при більш високих температурах (розтоплене скло) теплоємність зростає стрибкоподібно. Прикладом є значення теплоємності для кварцового скла в температурній області від  $0^\circ\text{C}$  до  $600^\circ\text{C}$  знаходяться в інтервалі значень від  $0,7 \text{ кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$  до  $1,15 \text{ кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$ . Питома теплоємність силікатного скла за кімнатної температури, залежно від хімічного складу, змінюється від  $0,3 \text{ кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$  до  $1,05 \text{ кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$ .

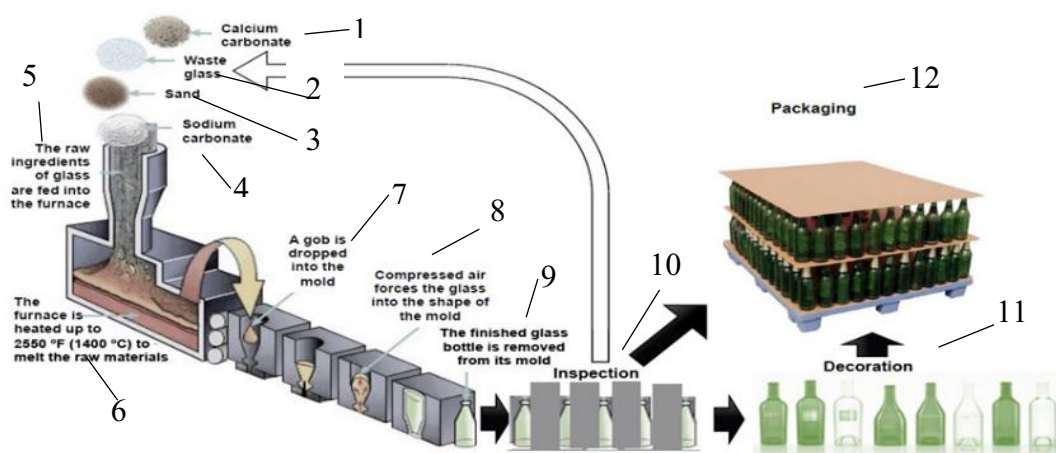
б) *коефіцієнт теплопровідності* – характеризує можливість скла проводити тепло в градієнтному температурному полі. Коефіцієнти теплопровідності різного скла мало відрізняються один від одного і знаходяться в межах від  $0,58 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$  до  $1,34 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$ .

в) *коефіцієнт лінійного розширення* – це величина, яка показує зміну розмірів або об'єму скла при нагріванні його на 1 °С. На практиці користуються середніми значеннями коефіцієнту, які обчислені залежно від температурного інтервалу та чистоти скла, наприклад коефіцієнт термічного розширення кварцового скла в діапазоні температур від 0 °С до 100 °С становить від  $5,4 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  до  $5,5 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  [22].

### **1.3 Технологічні процеси виготовлення тарного скла та формування скловиробу**

Процес скловаріння порожнистої скляної тари здійснюється за високих температур (від 1350 °С до 1650 °С залежно від типу скловарної печі [20]) у в'язкому середовищі (в скломасі), вміст якого постійно змінюється за хімічним і фазовим складом. На процес скловаріння та формування впливають такі супутні фактори, як: умови теплообміну, характер руху скломаси та газів. Загалом процес промислового скловаріння можна поділити на основні стадії: плавлення шихти, освітлення розплаву, гомогенізацію та охолодження розплаву [17, 20, 23].

Джерела [17, 19, 21, 23] інформують, що під час виготовлення порожнистої скляної тари необхідно оптимально провести процес скловаріння та правильно підібрати сировину (хімічний та гранулометричний склад). Роботи [17, 20, 23] вказують, що загалом виробничий процес виготовлення скляної тари (рис. 1.4) починається зі змішування сировини, яка визначає колір скла (зазвичай бурштиновий, жовтий, синій або зелений), до якої додається склобій. Потім суміш транспортують до печі, де її розплавляють, скляну масу подають до паралельно працюючих склоформувальних машин. У подальшому, сформована тара проходить перевірку якості. Вироби, в яких виявлено дефекти відбраковують і переплавляють у печі як склобій, а готову продукцію пакують на палети в кінці виробничої лінії, у разі необхідності, продукція проходить процес декорування.



1 – карбонат кальцію; 2 – склобій; 3 – пісок; 4 – карбонат натрію; 5 – подача сировини до печі; 6 – нагрів сировини в печі до 2500 °F (1400 °C); 7 – крапля скла («пулька»), яка подається до форми; 8 – формування скловиробу; 9 – випуск готової склотари; 10 – контроль якості; 11 – декорування; 12 – пакування

Рисунок 1.4 – Технологічна схема виробництва скляної тари [23]

Створення скловиробів з розплавленої маси скла називають процесом формування. Під час нього тісно поєднані явища теплопровідності, зміни в'язкості скломаси в широкому діапазоні саме в процесі транспортування скломаси, а також явища теплообміну (інколи навіть конвективного). Процес формування порожнистого скловиробу поділяють на дві основні стадії [20]:

- 1) формоутворення – пластичну масу доводять до майбутньої конфігурації залежно від в'язкості, поверхневого натягу та температурних змін скла;
- 2) фіксація форми – закріплюють конфігурацію та контури відформованого скловиробу залежно від виду скла та застосованого способу охолодження.

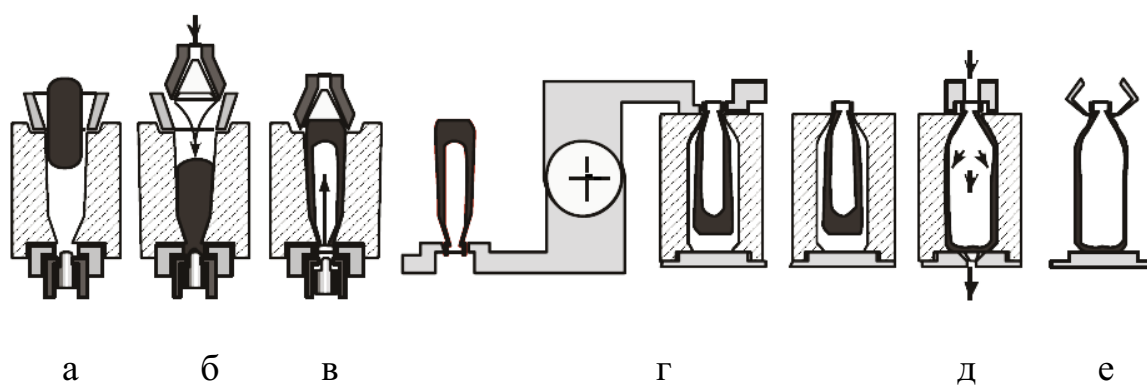
Також характерними параметрами процесу формування є робочий інтервал в'язкості скломаси та інтервал температури під час формування до того моменту, коли утворюється твердий зовнішній шар, який перешкоджає деформації виробу. Також важливими є: час формування (визначається часом твердіння скломаси, який залежить від хімічного складу скла, виду формувальних елементів та характеру їх контакту зі скломасою під час формування), температурний режим форми, умови

охолодження. Усі ці фактори впливають на якість виробу, продуктивність склоформувальних машин та форм, а особливо під час механізованого формування порожнистих скловиробів, адже цей процес є найбільш складним [17, 20].

#### 1.4 Основні способи виготовлення скляної тари

Найпоширенішими механізованими способами формування скляної порожнистої тари є пресовидування, видування та подвійне видування. В умовах масового виробництва формування здійснюють за допомогою формокомплекту на високопродуктивних склоформувальних машинах.

Спосіб видування скляної тари здійснюють за допомогою стисненого повітря, а процес пресовидування – пресуванням заготовки порожнистого скловиробу і подальшим її видуванням до необхідних розмірів. Однак найбільшого поширення набув спосіб видування, послідовність якого схематично наведено на рисунку 1.5.



а – подача краплі; б – формування горла; в – видування заготовки;  
г – передача із чорнової в чистову форму; д – остаточне видування;  
е – знімання виробу

Рисунок 1.5 – Процес формування порожнистих скляних виробів за способом подвійного видування [20, 24]

Відповідно до праць [14, 15, 17, 20, 24] під час склоформуального процесу, незалежно від його способу, використовують два види форм – чорнову та чистову. Пресовидування та видування порожнистої скляної тари мають базові технологічні операції (див. рис. 1.5) [20, 24]:

- а) подання дозованої краплі скла у вигляді «пульки» («gob») [8] гарячого скломатеріалу в чорнову форму (горлом вниз або нагору залежно від виду склоформуального автомату);
- б) формування горлової частини виробу;
- в) запресування/видування краплі скла до стану проміжної заготовки;
- г) розкриття чорнової форми та передача заготовки до чистової форми;
- д) остаточне видування виробу із внутрішнім охолодженням;
- е) розкриття чистової форми та передача виробу на подальший етап відпалу або покриття.

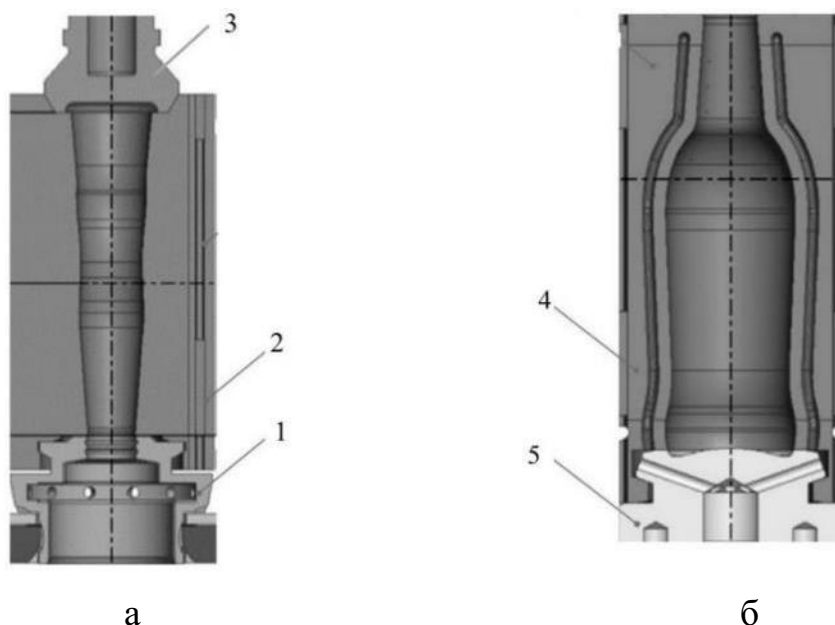
### **1.5 Конструкція та особливості формокомплекту для виготовлення скляної тари**

Формокомплект – це сукупність конструктивно та технологічно розробленого формового оснащення, яке використовується для відтворення зовнішньої поверхні виробів склотарного виробництва. Окремі частини формувального комплекту кріпляться до проміжних механізмів – тримачів, які рухаються за допомогою рухомих органів машини. Під час пресовидування та видування склотарних виробів застосовують типові деталі комплекту оснащення (рис. 1.6 та див. рис. 1.5) [20, 24]:

- а) чорнова або чистова форма (матриця/основа) – застосовують для відтворення зовнішньої конфігурації виробу та найчастіше складається із двох напівформ;
- б) kern (пуансон або плунжер) – передає зусилля/повітря для формування внутрішніх обрисів;
- в) пресове/горлове кільце (формувальне кільце) – замикає камеру формування в місці між формою та керном та формує верхній край виробу;

г) піддон – формує нижню частину виробу чистової форми процесу видування/пресовидування.

До форми відносять безпосередньо матрицю/основу, яку поділяють на верхню та нижню частини, також до чорнової форми відносять кільце для формування горлової частини тари.



1 – пресове/горлове кільце, 2 – напівформа чорнової форми, 3 – донна частина чорнової форми, 4 – напівформа чистової форми, 5 – донна частина чистової форми

Рисунок 1.6 – Конструктивні особливості склотарного формокомплекту [14]

Конструктивні особливості деяких частин формокомплекту мають вагомий вплив на технологічний процес виготовлення виробу. Наприклад, обмежувачем розтікання скломаси у формі є кільце (або кришка форми), яке також задає товщину та діаметр готового виробу. Необхідно уникати перегріву кільця, адже воно стикається зі скломасою при кожному пресуванні, правильно визначити його товщину та розміри для забезпечення теплового режиму, враховуючи температурне розширення матриці [17, 25]. Також, найбільш конструктивно важливе значення має внутрішня конфігурація та внутрішні габаритні розміри порожнини форми, адже вони безпосередньо відтворюють скловиріб. Висока швидкість робочого процесу склоформувальних машин в масовому виробництві впливає на те, що



формокомплект, а особливо форма, під час формування порожнистої скляної тари піддаються впливу потужного теплового потоку та механічних навантажень. Відповідно це є причиною для комбінації їхніх властивостей, а саме – тепло- та жаростійкість, міцність конструкції та комплекс необхідних механічних характеристик .

Під час конструювання формокомплектів для виробництва склотари, до матеріалу форм висувають такі найважливіші вимоги [25]:

- а) простота отримання заготовок та їх оброблюваність;
- б) високі теплофізичні властивості, зокрема теплопровідність та температуропровідність;
- в) щільна, однорідна та дрібнозерниста структура;
- г) мінімальні температурні деформації та напруження, що залежать від коефіцієнту лінійного розширення та модулю пружності матеріалу форм;
- д) висока корозійно-, жаро- та жаростійкість за робочих температур, висока зносостійкість;
- е) простота, зручність експлуатації та ремонту форм;
- ж) відносно невисока вартість матеріалу.

Ефективність виробництва скляної продукції визначається стійкістю, надійністю та характеристиками форм, що використовують. Макро- та мікроструктура матеріалу форм, а також технологія їх виготовлення значно впливають на якість готової скляної продукції.

## **1.6 Вплив циклічних термомеханічних умов на форми під час виробництва порожнистої скляної тари**

Спосіб видування набув найбільшого поширення серед способів виготовлення тонкостінної порожнистої скляної тари. Утворення склотарних виробів (рис. 1.7) полягає в тому, що скломасу роздувають в замкнутій формі, тобто вона відтворює обриси внутрішньої порожнини форми до безпосереднього затвердіння самого скломатеріалу.



Рисунок 1.7 – Видування склотари в промислових умовах [14]

Машинне видування є менш трудомістким процесом виробництва порожнистого скла, порівняно з пресуванням. Сучасні видувні склоформувальні автомати дозволяють досягти високої продуктивності завдяки конструкції, яка складається з окремих секцій. Наприклад, за маси виробу 150 г 10-ти секційна машина виробляє до 300 шт. виробів на хвилину, а за маси 300 г – до 200 шт. виробів на хвилину. Сучасні машини мають від 8 секцій до 20 секцій, тому їх продуктивність сягає від 4 млн. до 5 млн. виробів на добу. Поширеними є такі машини «Hartford» (США), «Linch-IS» (США), AL-106 (Чехія), «МолБроз» (Бельгія) тощо [17].

Основний процес виготовлення скляної тари за масового виробництва відбувається у складних термічних умовах. Робочі температури плавлення скломаси в печі знаходяться в інтервалі від 1350 °C до 1500 °C, а подача до склоформувальної машини – в діапазоні від 700 °C до 1100 °C (залежно від складу скла порожнистого виробу) [15, 17, 26, 27]. Формувальна порожнина форм, яка безпосередньо контактує з розплавленим склом, піддається найбільшому нагріванню (рис. 1.8) та дії термоциклічних умов експлуатації, що впливає на швидке зношування поверхневого шару чорнової, чистової форм, на тривалість процесу та якість готових виробів [27-29].

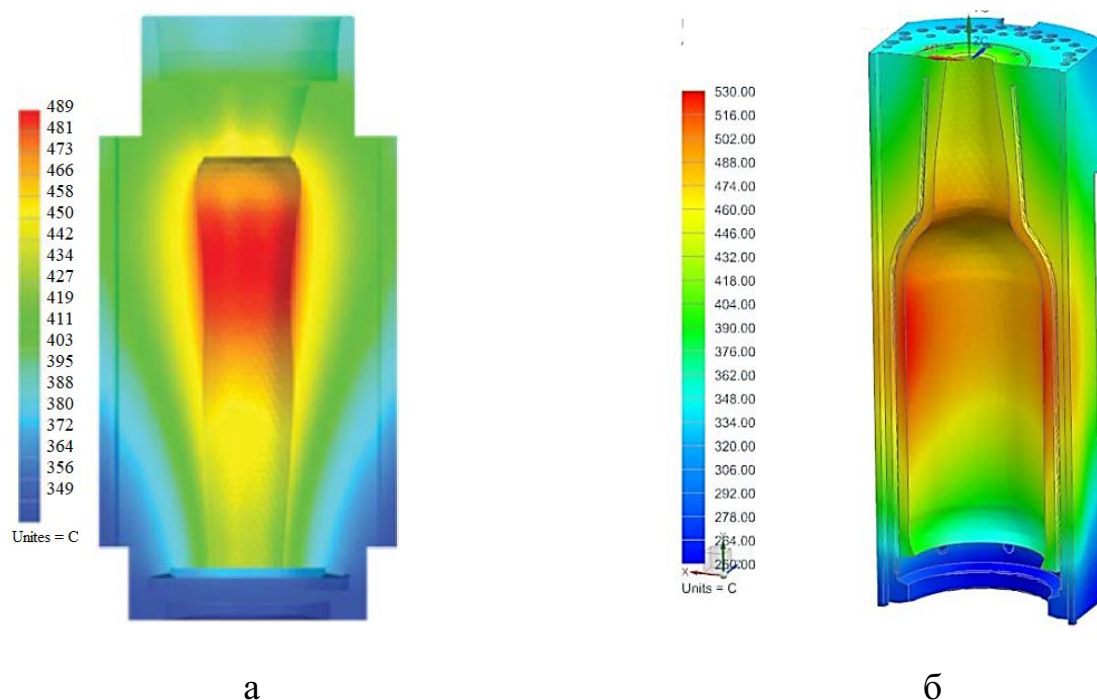


Рисунок 1.8 – Приклади розподілу температурних полів у чорновій (а) та чистовій (б) формах [28]

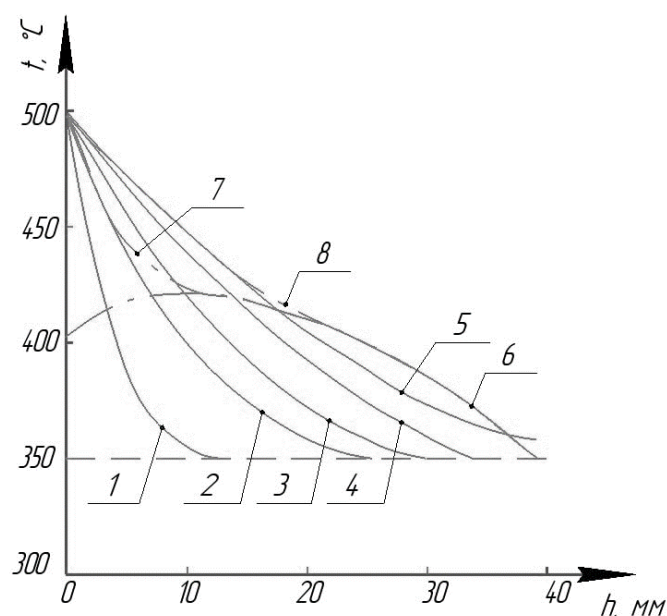
Як зазначають дослідники [21, 25] взаємодію скломаси зі внутрішніми поверхнями порожнини форми (робочі поверхні) можна розглядати як взаємодію двох напівобмежених рівномірно нагрітих тіл, які мають різні температуру та теплофізичні властивості (теплопровідність, теплоємність тощо). При цьому, взаємодія починається з моменту теплового контакту поверхонь з різною початковою температурою, внаслідок чого виникають теплові потоки, які впливають на процес формування виробу.

Результати дослідження [25, 30] щодо конструювання форм для склотарного виробництва стверджують, що між виробом та стінками форми встановлюється відповідний температурний напір, який можна вважати постійним на етапах формоутворення та фіксації форми виробу. Також необхідно врахувати, що стан поверхні скловиробу, утворення дефектів внаслідок накопичення пластичних деформацій та засічок на поверхні скляного виробу залежать від теплообміну між поверхнями, які контактують. Відповідно теплові потоки залежать від температури

скла та матеріалу поверхні форми [31]. Нагрів форми під час формування до температур, які перевищують температури скла, може спричинити прилипання скломаси до робочих поверхонь, більш різкий відбиток структури поверхні форми (сітка розгару, поверхневі тріщини тощо) та, як наслідок, зниження її стійкості.

Також визначено, що температура прилипання для чавунних форм, залежно від хімічного складу скла та температури відпалу скла може коливатися від 490 °C до 600 °C, а за подальшого збільшення температури форми спостерігається інтенсивна корозія робочої поверхні [25].

Температура в зоні контакту форми та маси скла, може зростати внаслідок високого значення коефіцієнту теплової акумуляції скла (здатність накопичувати тепло), що негативно впливає як на форму так і на скловиріб. Протилежний ефект на ці параметри має коефіцієнт теплової акумуляції форми: матеріал з високою теплопровідністю знижує температурні коливання в зоні контакту з масою скла, оскільки. Однак, зниження початкової температури форми призводить до збільшення температурного градієнта в зоні контакту зі склом, що сприяє посиленню теплових потоків і, як наслідок, збільшенню амплітуди температурних коливань. Якщо температура робочих поверхонь форми незмінна, а початкова температура скломаси зростає, то коливання температур теж зростатимуть (для всіх матеріалів форми). Відповідно до тверджень [25] коливання температур поступово зменшується під час передавання теплоти вглиб стінки форми, тому на зовнішній поверхні форми коливання температур буде незначним, отже його умовно прирівнюють до нуля. Також згідно з [25] температура залишається незмінною в усіх точках, які знаходяться на більшій відстані від поверхні контакту, ніж глибина проникнення тепла, адже за один цикл виготовлення тепло передається в формі лиш на певну глибину. Отже, від товщини стінки матриці форми, характеристик її матеріалу за перерізом, часу контакту з склом та хімічного складу скла залежить розподіл тепла вглиб форми і коливання температури в місці контакту форми з масою скла. До прикладу, розподіл температур у формі з чавуну марки СЧ 21-40 з товщиною стінки 40 мм наведено на рисунку 1.9.



1 – 1 с; 2 – 5 с; 3 – 10 с; 4 – 15 с; 5 – 20 с; 6, 7, 8 – фактичний розподіл температур по товщині стінок перед початком наступного циклу

Рисунок 1.9 – Криві розподілу температур за перерізом форми з чавуну СЧ 21-40 з товщиною стінки 40 мм за певної тривалості контакту [25]

Наприклад, у випадку виготовлення порожнистих безколірних скловиробів з товщиною стінки 4,5 мм за різниці температур між поверхнями скла та форми 200 °С, тривалості контакту  $\tau = 4$  с та тиску пресування 9,8 МПа – температура внутрішньої стінки форми становить 470 °С, а середнє значення теплового потоку скла –  $324 \cdot 10^3$  Вт / м<sup>2</sup> [25].

У серійному та масовому виробництві скляної тари необхідно враховувати, що температурні навантаження у вигляді теплових потоків прикладені з певною циклічністю та швидкістю, тому вплив скла сприяє накопиченню як температурних так і механічних навантажень.

Процес виготовлення скляної тари відбувається швидко і може тривати від 0,6 с до 150 с [25, 27, 32, 33] залежно від фізико-хімічних властивостей скла та конфігурації скляного виробу. Механічні навантаження, а саме компресійний тиск, під час видування спричиняє скляна заготовка, як агресивне середовище, на робочу

поверхню формокомплекту. Тиск скломаси на стінки форми за звичайних умов становить від 0,2 МПа до 0,5 МПа та в деяких випадках може становити 1,5 МПа [25, 26].

Варто зазначити, що під час роботи формокомплекту внаслідок циклічного та механічного впливу на стінки форми в матеріалі створюються залишкові внутрішні напруження, що відповідно, зумовлюють напружено-деформований стан форми. Відповідно в матеріалі форми, де найбільше впливає температура (робоча поверхня), прогресують структурні зміни як матриці так і морфології самого зерна матриці. Відповідно, такі зміни призводять до зменшення опору матеріалу до руйнувань, тому необхідно регулювати дисперсність структури та її трансформації для забезпечення міцності та твердості матеріалу, особливо в зоні термічного впливу на робочу поверхню формувальної порожнини форми.

### **1.7 Причини утворення дефектів в формах та необхідні властивості матеріалу**

Циклічні термічні та механічні навантаження найбільше впливають на поверхневі шари робочої частини форми вглиб від 1 мм до 10 мм [34, 35] (особливо на форми, які працюють в умовах видування) та спричиняють утворення дефектів в формі. Автори [12, 27, 30, 31] до основних причин виходу з ладу деталей формокомплекту відносять утворення окиснених ділянок, особливо на межах зерен, вигорання або викришування окремих структурних складових, скол частини форми. Наприклад, у випадку використання чавунних напівформ, внаслідок дії високої циклічної температури утворюються графітізовані та окиснені ділянки, а саме, відбувається зміна форми та розмірів графітових включень, їх ріст. Це спричиняє структурні трансформації в матеріалі та впливає на зміни об'єму деталі загалом. Зв'язки металевої матриці слабшають навколо включень, що призводить до їх викришування. Відповідно в цих місцях викришування утворюється зона окиснення (рис. 1.10).



Рисунок 1.10 – Дефекти, що спричинили вихід з ладу чорнової (а, б) та чистової (в) чавунних форм

Для збільшення стійкості форми, на робочі поверхні наносять спеціальні покриття (натуральні оліфи, цинкові білила тощо) та сушать форми за температури від 150 °C до 200 °C перед першим робочим циклом. Деякі покриття слугують як охолоджувачі, однак надлишок речовини може сприяти утворенню нагару на робочій поверхні форми [38].

Скломатеріал здійснює вплив на поверхню форми як агресивне середовище, що підсилюється в умовах високих робочих температур формування. Дослідження високотемпературної поведінки різних матеріалів форм і покриттів із циклічними змінами температури в окиснювальній атмосфері та у контакті з розплавленим склом [33, 39] стверджують, що корозія відбувається переважно вздовж меж зерен та в більш м'яких фазах матеріалів, а окисний шар, який утворився на поверхні контакту скла та форми, впливає на адгезію скла. Згідно з [33] прилипання скла до різних матеріалів форми експоненціально збільшується зі збільшенням температури. Ефект прилипання скломаси також залежить від її реологічних властивостей, температури, а також від якості поверхні форми, її шорсткості, типу нанесеного покриття.

Виходячи з умов роботи формокомплекту, можна виділити основні необхідні фізико-механічні властивості матеріалу форм:

- а) термостійкість робочого (найбільш навантаженого) шару деталі склоформи;
- б) окалиностійкість поверхонь, що безпосередньо піддаються агресивному впливу скла (робочі кромки, формувальні поверхні);
- в) ростостійкість;
- г) міцність формувальних поверхонь і робочих кромок;
- д) теплопровідність – відведення теплової енергії від робочих поверхонь.

Отже, вибір матеріалу для форми є критичним етапом у процесі виробництва скляних виробів. Матеріал повинен забезпечувати міцність, твердість, достатню теплопровідність за перерізом форми, а його структура повинна бути стабільною до внутрішніх трансформації, особливо в зоні контакту робочої формувальної порожнини форми з склом. Тому необхідно, щоб матеріал володів комплексом властивостей, які забезпечать довговічність форми в умовах впливу циклічних термомеханічних навантажень масою скла.

## **1.8 Аналіз матеріалів формокомплекту**

Дослідження ринку матеріалів для деталей форм демонструє широкий спектр матеріалів, що активно використовуються в даний час, приклади яких наведено в джерела [20, 27, 30, 34-37] та проілюстровано на рисунку 1.11.

Ринок деталей формокомплекту для скляної промисловості представлений широким спектром країн-виробників: США, Італія, Німеччина, Франція, Туреччина та Китай, Індія тощо (табл. 1.1). Основним матеріалом для виробництва деталей формокомплектів на світовому ринку є чавуни різних марок, їх використання значно зменшує вартість формокомплекту порівняно з відносно дорогими сталевими або бронзовими формами.



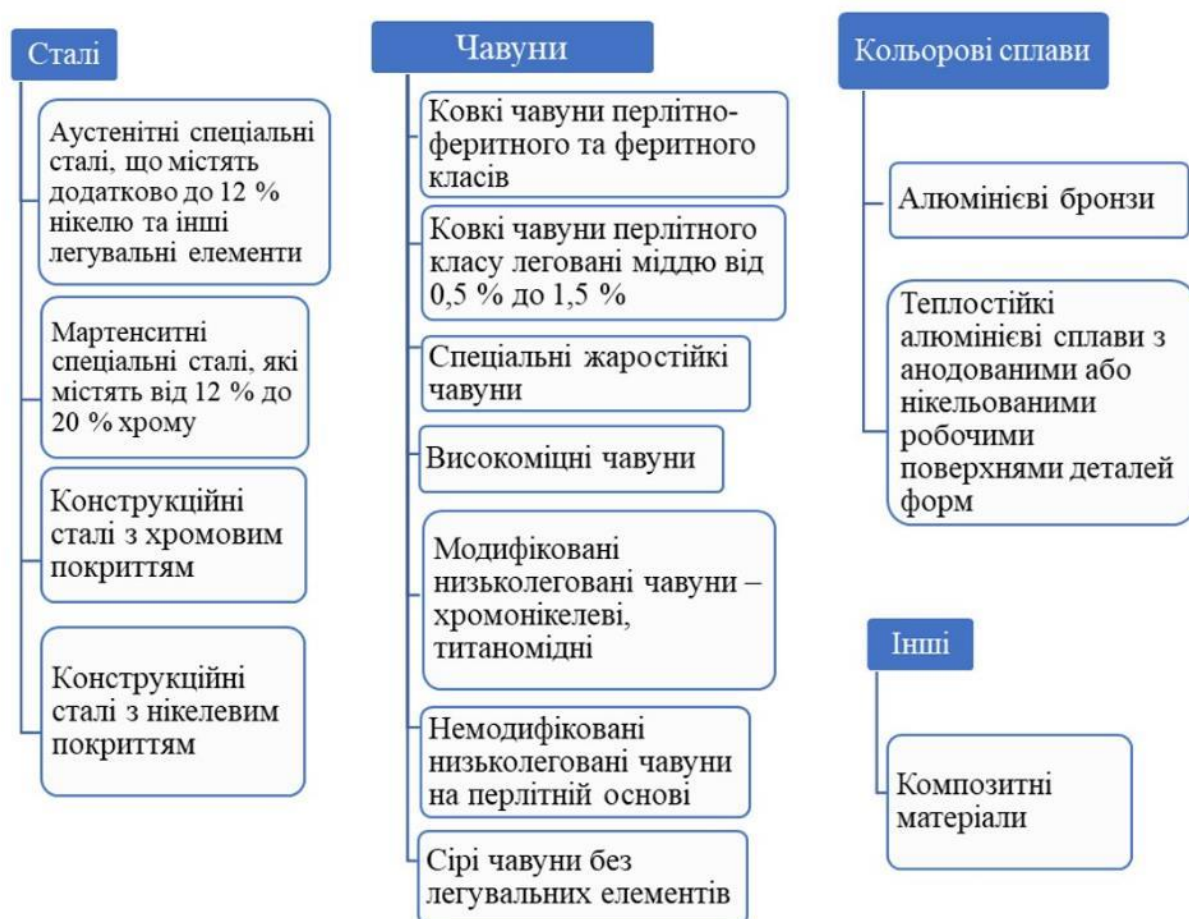


Рисунок 1.11 – Найпоширеніші матеріали для виготовлення деталей формокомплекту

Незважаючи на наявність вітчизняних виробників, таких як Компанія «Техно-Т» [41], ТОВ «Формокомплекти та запчастини» [42] та ТОВ «САЮЗ» [43], потреба внутрішнього ринку українських підприємств у формокомплектах для скляної тари залишається незадоволеною в певному обсязі. Це свідчить про існуючий дефіцит формокомплектів для виготовлення скляних порожнистих виробів на внутрішньому ринку, створює значний потенціал для розвитку вітчизняного скляної промисловості.

Таблиця 1.1 – Приклади імпортних формокомплектів

№	Виробник	Вигляд продукту	Характеристики форми, вказані виробником
1.	Yantai-NFO Special Lubricants Co., Ltd, China [44]	готова деталь	– мідні сплави, неіржавні сталі тощо; – твердість форми від 170 HB до 240 HB
2.	Changshu Lege Mould Technology Co., Ltd, China [45]	готова деталь	– бронзи; – мідні сплави, неіржавні сталі тощо;
3.	Changshu Hongzhou Mold Co., Ltd, China [46]	готова деталь	– чавуни, бронзи
4.	Droigk Formenbau GmbH, Germany [10]	готова деталь	– нікелеві сплави, бронзи, сталі, чавуни
5.	TassoBar, Denmark [47]	заготовка (круглий профіль)	– неіржавні сталі
6.	United Cast Bar Limited, United Kingdom [9]	заготовка (круглий профіль)	– чавуни з пластинчатим та кулястим графітом
7.	Fonderie Valdelsane, Italia [11]	виливок	– чавуни, бронзи
8.	Fima-Olimpia Fonderie, Italia [12]	виливок	– чавуни, бронзи
9.	Italian Glass Moulds, Italia [13]	виливок	– чавуни, бронзи, алюмінієві сплави, сталі
10.	Aegg, United Kingdom [15]	виливок, готова деталь	– чавуни, бронзи

Вирішення технологічних проблем та модернізація виготовлення чавунних формокомплектів дозволять створити конкурентноспроможну науково-технічну продукцію, збільшити кількість робочих місць на підприємствах-виробниках, скоротити витрати виробників скляної тари завдяки зниженню вартості виробництва та підвищенню терміну експлуатації форм, істотно знизити імпорт аналогічної продукції.

## **1.9 Технологічні способи виготовлення чавунних деталей формокомплектів**

Спосіб виготовлення формокомплекту є одним із ключових аспектів у забезпеченні якості скляної продукції. Вибраний спосіб виготовлення деталей формокомплекту повинен забезпечити максимальні експлуатаційні властивості у поєднанні із екологічною та економічною доцільністю.

Поширеним способом виготовлення форм є механічне оброблення готового круглого профілю з наступним поліруванням та нанесенням захисних покриттів. Прикладами виробників таких чавунних заготовок є «United Cast Bar Limited» [9] та «TassoBar» [47] тощо. Однак, цей метод виготовлення призводить до утворення значної кількості металевих відходів, зокрема, складно перероблюваної стружки [48]. Основним способом виготовлення заготовок форм, близько 80 % від загальної кількості [25], є застосування різних технологій ливарного виробництва, використання яких забезпечує необхідну структуру матеріалу та комплекс властивостей. Прикладами компаній, що застосовують технології ливарного виробництва є «Fonderie Valdesane» [11], «Fima-Olimpia Fonderie» [12], «Aegg» [15] тощо.

Виготовлення форм найчастіше відбувається за наступними етапами [38]:

а) лиття заготовки форми – головний етап, адже від його якості залежать усі наступні етапи. Оскільки дефекти литва можуть виявити себе під час подальшого оброблення або навіть експлуатації готового виробу. В даному випадку рекомендовано застосовувати якісні та екологічні формувальні матеріали та зв'язувальні компоненти для виготовлення ливарних форм, що сприятимуть не лише низькому показнику браку під час виробництва, а й впливатимуть на екологічність процесу [49, 50].

б) чорнове оброблення заготовки форми – заготовці надають необхідну геометричну конфігурацію з усіма декоративними, технологічними виступами та отворами. Обробку виконують із використанням якісного металорізального обладнання;

в) доведення внутрішньої поверхні форми до необхідної шорсткості та гладкості. Виконують за допомогою шліфування та полірування;

г) нанесення різного роду покриттів (за необхідності). За рахунок з'єднань компонентів нанесеного покриття та основного матеріалу форми відбувається зміцнення поверхні та підвищення мікротвердості матеріалу в зоні інтенсивного механічного впливу [51, 52].

Відповідно, саме від якості лиття залежить якість кінцевого продукту, оскільки на цьому етапі закладається основна частина властивостей, які будуть забезпечувати експлуатаційні характеристики та довговічність майбутньої деталі.

Розвиток ливарного виробництва сприяє покращенню геометричної точності литих заготовок та зменшенню обсягів необхідного механічного оброблення, що значною мірою впливає на зниження собівартості самої заготовки.

### **1.10 Порівняння властивостей чавунів для формокомплекту**

Параметри вибору матеріалу для основних деталей формокомплекту ґрунтуються на визначенні технічних та технологічних можливостей отримання необхідних заготовок та їх подальшого оброблення. Основними критеріями вибору матеріалу є технологічні, теплофізичні, механічні та експлуатаційні властивості. Аналіз джерел [15, 25], дозволяє стверджувати, що більшість форм виготовляють з графітізованих чавунів завдяки широкому спектру властивостей, а саме: хороші ливарні властивості, легкість механічної обробки, низька чутливість до концентрації напружень, високі показники механічних властивостей, теплопровідності, відносно низька вартість тощо.

Застосування різних марок низьколегованих чавунів значно підвищує стійкість форм порівняно з нелегованими чавунами. Низьколеговані чавуни характеризуються кращими властивостями за твердістю, міцністю, корозійною стійкістю, термостійкістю та теплопровідністю, які регулюються хімічним складом матеріалу.

Як вказують дослідники [53], сірі конструкційні та низьколеговані хромонікелеві чавуни, модифіковані феросиліцієм та силікобарієм, мають набагато

кращі властивості, ніж немодифіковані чавуни, за однорідністю структури, оброблюваністю та експлуатаційними характеристиками.

Ковкі чавуни як і сірі мають хороші теплофізичні властивості та вищу пластичність, зносостійкість, ростостійкість, оброблюваність [54, 55]. Недоліком застосування ковкого чавуну є складність виготовлення товстостінних заготовок форм, тому його застосовують для виготовлення пуансонів, горлових кілець та подібних дрібних деталей.

Високоміцні чавуни з кулястим графітом застосовують як матеріал формокомплекту доволі обмежено. Це пов'язано із його зниженими теплофізичними властивостями порівняно з сірими та ковкими чавунами. Однак підвищений комплекс механічних властивостей, висока ростостійкість, корозійна стійкість, висока здатність до полірування, особливо у легованих високоміцних чавунах, дозволяє застосовувати цей матеріал для деталей чистового формокомплекту, особливо для тонкостінної декорованої, ажурної склотари [25, 56].

Специфічні умови роботи деталей формокомплекту викликають необхідність покращення експлуатаційних властивостей чавунів, застосування різноманітних легувальних елементів, модифікаторів та технологічних прийомів у процесі виготовлення литих чавунних заготовок, які б впливали на кристалізацію і структуроутворення в чавуні та призводили до покращення техніко-економічних показників виробництва.

### **1.11 Аналіз хімічного складу чавунів деталей формокомплекту для виготовлення скляної тари**

Для деталей формокомплекту нині використовують велику кількість чавунів різного хімічного складу (табл. 1.2) однак їх основою є система Fe-C-X. Необхідні характеристики матеріалу, такі як міцність, ростостійкість, жаростійкість та термостійкість, в умовах впливу циклічних термомеханічних навантажень, забезпечують завдяки застосуванню широкого спектру різних легувальних елементів.

Таблиця 1.2 – Хімічний склад найпоширеніших чавунів, що застосовуються для деталей формокомплекту [25, 32, 33, 39, 40, 57]

№	Масова частка елементу, %							
	C	Si	Mn	Ni	Cr	інші елементи	P	S
							не більше ніж	
1	3,25	1,5	0,65	0,5	0,6	-	0,35	0,09
2	3,2	1,2	0,8	0,5	0,8	-	0,35	0,09
3	3,57	2,0	0,6	0,7	0,2	0,1 Ti; 0,05 Mg	0,03	0,04
4	3,65	1,74	0,59	0,13	0,11	0,1 Ti	0,03	0,03
5	3,45	4,45	0,4		0,1	0,05 Mg; 0,1 Al	0,1	0,01
6	3,5	1,95	0,77	0,37	-	0,44 Mo	0,1	0,066
7	3,0-3,3	1,3-1,7	0,8-1,2	0,3-0,8	0,3-0,5	-	0,3	0,15
8	3,0-3,3	1,7-1,8	0,8-1,2	0,6-1,2	0,8-2,4	-	0,2	0,12
9	3,0-3,4	1,7-2,0	1,2-1,5	1,0-1,4	0,4-0,7	0,15-0,3 Mo	0,2	0,12
10	3,0-3,2	1,9-2,4	0,35-0,5	0,2-0,4	0,3-0,5	0,45-0,65 Mo	0,2	0,12
11	3,0-3,4	1,6-2,1	0,6-1,0	-	-	0,03-0,06 Ti; 0,5-1,0 Cu	0,2	0,12
12	3,0-3,4	1,6-2,4	0,8-1,2	-	-	2,0-3,0 Cu	0,2	0,12
13	2,8-3,2	1,9-2,3	0,6-1,0	2,5-2,8	0,3-0,5	-	0,2	0,12
14	2,8-3,2	1,9-2,3	0,5-0,9	0,1-0,6	0,2-0,6	0,1-0,6 Mo	0,14	0,5
15	3,6-3,7	1,2-2,2	0,7-0,8	0,9-1,0	0,3-0,4	0,25-0,3 Mo	0,08	0,12
16	3,25-3,75	1,6-2,1	0,4-0,8	-	-	-	0,4	0,12
17	3,0-3,8	1,5-2,5	1,0	-	0,4-1,0	-	0,3	0,12
18	3,0-3,8	2,8-3,8	1,0	-	2,1-3,0	-	0,3	0,12
19	3,0-3,8	2,0-3,0	0,5	-	0,4-1,0	0,6-1,5 Al	0,1	0,03
20	2,4	1,5-3,0	0,5-1,5	34-36	0,2	0,5 Cu	0,08	-

Аналізуючи основні хімічні складові матеріалів, що застосовують для форм, можна зазначити, що більшість сплавів містять в своєму складі до 4,45 % Si, вплив якого має подвійне значення, тому переважно вміст Si знаходиться на низькому рівні. Такий ефект дослідники [58] пояснюють, що з однієї сторони Si сприяє збільшенню росту чавуну внаслідок розпаду карбідів, збільшенню графіту та розрихленню структури внаслідок окиснення, що значно впливає на зміну об'єму. З іншої сторони,

вміст Si більше 5 % сприяє опору росту за високих температур, який збільшується внаслідок збільшення опору окисненню, підвищує критичний інтервал температури фазових перетворень чавуну та сприяє утворенню фазової структури під час якої первинний ріст графіту усувається. Також дослідження [59, 60] підтверджують, що Si знижує схильність до утворення карбідів, підвищує утворення графіту під час евтектичного та евтектоїдного перетворення та сприяє збільшенню кількості фериту в металевій матриці.

Mn сприяє утворенню перліту в чавунах, підвищує їх механічні властивості та нейтралізує вплив S на Fe, оскільки під час тверднення розплаву утворюються сульфіди заліза (FeS). Однак, Mn негативно впливає на графітизацію та жаростійкість чавуну [58, 61].

Al та Ni в певних кількостях сприяють графітизації, однак не постійно, так це характерно для Ni при вмісті до 9 %, а Al спочатку до 4 %, а потім в інтервалі від 16% до 23% [58]. Також варто зазначити, Ni є дорогим легувальним елементом, особливо при застосуванні його в кількості від 34 % до 36 %, як наведено вище в матеріалах, що використовують для форм. Таким же чином Cr утворює захисний шар оксидних плівок, які запобігають окисненню робочої поверхні форми, та як і Mo, сприяє подрібненню виділеного графіту. Також Cr і Mo утворюють дрібні карбіди, які покращують твердість матеріалу [58, 62, 63].

Підсумовуючи вищенаведені дані, можна зробити висновок, що широкого розповсюдження у якості матеріалів для деталей формокомплекту набули низьколеговані чавуни з вмістом легувальних елементів до 3 %. Основною задачею легування є покращення стійкості чавунів в умовах циклічної роботи за високих температур (жаростійкості) та теплофізичних параметрів, які впливають на швидкість відведення тепла від форми.

## **1.12 Жаростійкість чавунів**

Матеріали форм, які працюють за високих температур, піддаються руйнівному впливу окалиноутворення та росту деталей, що призводить до зменшення міцності.

Термічне розширення матеріалу в умовах термоцикування повністю переходить у пластичну деформацію, яка сприяє розвитку незворотних структурних змін металу (зміни розмірів зерна та утворення тріщин), і надалі призводить до скорочення його довговічності та руйнування виробу в цілому. Тому матеріал, окрім корозійної стійкості, повинен максимально зберігати пластичність та міцність в умовах високих температур та циклічних навантажень [58].

Згідно з фундаментальними роботами [64, 58], основним фактором, що впливає на довговічність форм при виробництві склотари, є їхня здатність протистояти газовій корозії за високих температур, тобто жаростійкість.

За твердженнями сучасних робіт [65, 66] жаростійкість варто розглядати як три основні властивості матеріалу:

а) *окалиностійкість* – характеризується швидкістю зміни питомої маси деталі внаслідок впливу температур експлуатації. Ця властивість значною мірою залежить від хімічного складу матеріалу деталі та наявності захисних оксидних плівок на її поверхні, які утворюються внаслідок легування або нанесення спеціального покриття;

б) *термостійкість* – основними факторами, що впливають на термостійкість: кількість циклів зміни температур та внутрішні трансформації на міжфазних межах, внаслідок наявності впливу великих зерен та карбідів. Особливістю даної властивості є те, що вона знижується зі збільшенням впливу максимальної температури циклу та термічного розширення деталі. Основною ознакою зниження термостійкості є утворення тріщин на поверхні деталі та її руйнування внаслідок термічної втоми;

в) *ростостійкість* – характеризується зміною габаритних розмірів деталі внаслідок кінетики росту та зміни об'єму матеріалу під впливом температур експлуатації.

За твердженнями [58, 61], одним із способів захисту матеріалу від корозії є утворення на його поверхні тонкої щільної самопасивуючої оксидної плівки. З метою утворення таких захисних плівок та, як наслідок, підвищення жаростійкості матеріалу широкого поширення набуло застосування таких легувальних елементів, як Si, Al, Cr тощо. Для цих елементів характерне утворення тонкої оксидної плівки на поверхні



деталі, яка міцно зчеплена з основним металом та хімічно стійка до впливу навколишнього середовища і безпосередньо гальмує подальше окиснення. Однак, якщо плівка має менший коефіцієнт розширення ніж основний метал, то в ній утворюються тріщини, що і сприяють глибокому окисненню основного матеріалу.

Погіршення механічних характеристик форм також обумовлено незворотнім процесом збільшення об'єму матеріалу, що залежить від впливу температури протягом часу. Паралельно із збільшенням об'єму, зменшується питома вага та межа міцності. Кінетика росту та зміна об'єму переважно є наслідком корозійного процесу (окиснення), який поширюється по всьому виливку, здебільшого вздовж включень графіту та внаслідок фазових перетворень. Мінімізування росту графітових включень досягають за рахунок впливу на їх кількість та морфологію – збільшення кількості та зменшення розмірів графітових включень покращують ростостійкість та термостійкість, особливо у поєднанні із легуванням чавуну Si, Al, Ba, Ni, Cr, Mo тощо [63, 67]. Нівелювання впливу фазових перетворень в чавуні можна забезпечити наявністю стабільної структури в усьому діапазоні робочих температур [58].

Опираючись на твердження [58, 63], максимального ефекту щодо опору росту можна досягнути за допомогою виключення процесів графітизації та фазових перетворень у чавунних виливках. Зниження впливу фазових перетворень в чавуні під час експлуатації виробу можна досягнути підвищуючи або знижуючи температурний інтервал фазових перетворень за межі коливання робочих температур. Тому варто врахувати розподіл елементів, які застосовують для підвищення ростостійкості та регулювання температур фазових перетворень:

а) Si, Al – підвищують температурний інтервал фазових перетворень, створюють стабільні структури (феритно-графітна та аустенітно-графітна);

б) Ni, Cu – знижують температурний інтервал фазових перетворень, створюють стабільні структури (феритно-графітна та аустенітно-графітна);

в) Cr – підвищує температурний інтервал фазових перетворень, створює структури з стабільними карбідами;

г) Mn – знижує температурний інтервал фазових перетворень, створює структури з стабільними карбідами.

### **1.13 Способи підвищення експлуатаційних властивостей деталей формокомплекту**

Дослідники [17, 25, 33] відзначають, що для зміцнення поверхневого шару форми та її робочих кромek використовують методи поверхневого зміцнення, зокрема оброблення поверхні та нанесення спеціальних покриттів. Найбільш розповсюджені наступні варіанти:

а) азотування матеріалів – виконується за допомогою імпульсної плазми за температури 550 °C;

б) гальванічне покриття – товщина нанесення до 10 мкм;

в) високотемпературні керамічні фарби – основний компонент  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , призначені для захисту від корозії та зношування;

г) різноманітні багатокомпонентні нітриди та карбіди –  $\text{SiC}$ ,  $\text{BN}$ , які забезпечують відмінний захист від корозії;

д) газополум'яне порошкове напилення – варіант зміцнення набув найбільшого застосування, а найпопулярнішим серед порошків став нікелевий.

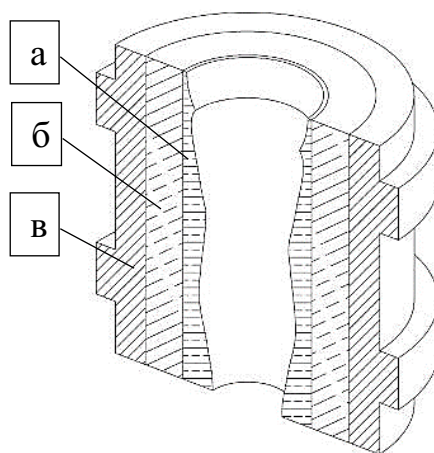
При цьому згідно з [51, 52], нанесення покриття механічним легуванням дозволяє отримати тонке, на рівні наноструктури, зміцнення поверхневого шару, що в подальшому впливає на покращення мікротвердості матеріалу, однак варто врахувати, що це трудомісткий та вартісний процес, який потребує додаткових виробничих потужностей під час виготовлення форми.

### **1.14 Підвищення експлуатаційних властивостей чавунних деталей формокомплекту за допомогою регулювання процесів кристалізації литої заготовки**

Дослідження [20, 28, 30, 31, 54, 67-69] стверджують, що направлена структура матеріалу досягнута за рахунок різних механізмів кристалізації та фазових перетворень у різних частинах виливка, забезпечує підвищення його стійкості. Таку структуру можна отримати за допомогою регулювання хімічного складу чавуну та

застосування різних технологічних прийомів. Підвищення якості матеріалу можливе на стадії випуску розплаву з плавильного агрегату. Зокрема, це досягається шляхом контролю кінетики поглинання хімічних елементів у процесі плавлення матеріалу та ініціювання термічного розкладання оксидів заліза за умов високотемпературного режиму плавлення. Зазначені підходи сприяють покращенню хімічного складу та мікроструктури розплаву, які є основними факторами впливу на формування властивостей виливків [70].

Одним із перспективних способів підвищення терміну експлуатації та стійкості матеріалу форми в умовах впливу циклічних термомеханічних навантажень є забезпечення градієнтної структури за перерізом литої заготовки (рис. 1.12).



а – шар з включеннями графіту кулястої форми; б – шар з включеннями графіту вермикулярної форми; в – шар з шар з включеннями графіту пластинчастої форми

Рисунок 1.12 – Схематичне відображення градієнтного переходу структури матеріалу форми склотарного оснащення

Відповідно градієнт полягає в поступовій зміні морфології структурних складових металевої матриці. У дослідженнях [23, 25, 31, 33, 35, 71] вказано, що особливого зміцнення потребує робочий шар форми (поверхня формувальної порожнини) на глибині від 1 мм до 10 мм. До того ж, науковці [26, 34, 35, 37, 69]

умовно виділяють у виливку три окремі шари, які забезпечуватимуть різні властивості та триваліший термін експлуатації формокомплекту: робочий (приблизно товщиною до 15 мм, безпосередньо контактує зі склом), проміжний (приблизно товщиною від 15 мм до 30 мм) та зовнішній (контактує з атмосферою цеху).

Також, робоча поверхня форми, повинна мати високі міцнісні характеристики, оскільки вона найбільше піддається не лише інтенсивному тепловому впливу, а й механічному [31]. Автори [25, 31, 57, 69] зазначають, що великі металеві зерна на робочій поверхні чавунної форми сприяють її швидкому окисненню та деградації під час роботи формокомплекту. Ефективним способом підвищення стійкості поверхні є формування шару чавуну з дрібнодисперсними включеннями кулястого графіту, які забезпечуватимуть високі механічні та експлуатаційні властивості формувальної поверхні [56]. За даними досліджень [72-74] включенням кулястого графіту властиві низькі показники теплопровідності, тому необхідно забезпечити відведення тепла від них безпосередньо шаром чавуну з графітом, що за теплопровідністю кращий – з включеннями вермикулярного або пластинчастого графіту. При цьому, пластинчастий графіт має найвищі показники теплопровідності [75-77]. Крім того, дослідження [37, 74] підтверджують, що чавун з вермикулярним графітом характеризується підвищеними міцністю та стійкістю до росту під час впливу високих температур, тому такий матеріал є перспективним для склоформувального оснащення в умовах впливу циклічних термічних навантажень.

Забезпечення різного роду зміни структури виливків із залізовуглецевих сплавів можливе різними способами. Прикладами є створення диференційованих властивостей матеріалу, виготовлення біметалевого або шаруватого виробу [58, 78-81], регулювання структури за допомогою позапічного оброблення або ж легування розплаву у ливарній формі [58, 82-84] тощо. З метою утворення на окремих поверхнях виливка легованого дрібнозернистого шару визначеної товщини застосовують метод поверхневого оброблення розплаву дисперсними сумішами у порожнині ливарної форми [79, 85]. Також широкого застосування для виготовлення чавунних виробів із різною структурою за перерізом, набуло використання елементів, які впливають на кінетику затвердіння. Такі елементи забезпечують підвищену

швидкість та направленість кристалізації сплаву в ливарних формах внаслідок високих теплоакумулювальних характеристик [54, 55, 78]. Крім того, автори [20, 30, 57, 76] зазначають, що чавун, який відливають із застосуванням холодильників, на різній глибині виливка може мати мартенситну та/або вибілену структуру, що призводить до погіршення технологічних, механічних та експлуатаційних властивостей форми. Отриману небажану структуру усувають шляхом застосування різного термічного оброблення [25].

Згідно з дослідженнями [25, 31, 37, 39, 57] та характеристиками продукції, представленої виробниками [9, 11, 12, 47], для форм рекомендовано використовувати чавуни з металевою матрицею переважно феритного або феритно-перлітного класу (в різних співвідношеннях). В дослідженні [37] вказано, що позитивні показники роботоздатності проявили феритні чавуни з кулястим або вермикулярним графітом. При цьому, деталям з максимальним терміном експлуатації, внаслідок високих теплофізичних властивостей, характерне поєднання вермикулярного графіту та феритної матриці [37]. Згідно з [25, 33, 39], важливим фактором для деталей склоформувальних комплектів є відсутність структурно вільних та евтектичних карбідів, мінімізація перлітної складової металевої матриці. Як відомо, основним графітизувальним елементом у чавуні є кремній, який запобігає утворенню карбідів під час кристалізації та сприяє підвищенню міцності металевої матриці [59]. Ефективними способами його застосування є легування чавуну у плавильному агрегаті та позапічне оброблення розплаву.

### **1.15 Технологічні методи позапічного оброблення**

За твердженнями праць [73, 86-89] основним способом позапічного оброблення чавунів є модифікування, яке полягає у тому, що в розплав вводять невелику кількість додаткових елементів або речовин, які змінюють умови кристалізації та, як наслідок, впливають на структуру в твердому стані. За своєю дією модифікатори класифікують на два види [58]:

а) модифікатори першого роду – гальмують або зовсім перешкоджають росту кристалів, сприяють заокругленню неметалевих включень та утворенню на їх поверхнях поверхнево-активної плівки;

б) модифікатори другого роду – утворюють додаткові центри кристалізації, подрібнюють та змінюють форму графіту у чавунах.

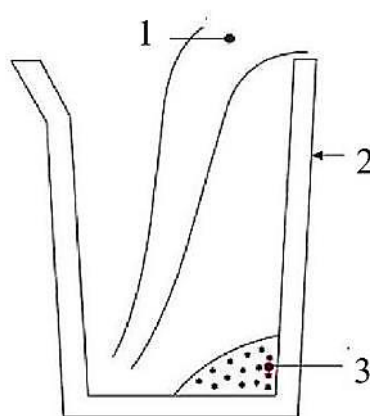
Зміни в матеріалі під час позапічного оброблення залежать від природи самих модифікувальних елементів та добавок які до них входять. Тому згідно з [58, 88, 89] модифікатори поділяють на групи:

1) модифікатори, які зменшують переохолодження та покращують утворення пластинчастого графіту, як приклади – силікокальцій, феросиліцій, графіт, силікокарбід, сплави міді, бору тощо;

2) модифікатори, які збільшують переохолодження та утворення міждендритного графіту – Al, Ti тощо;

3) модифікатори, які збільшують переохолодження та сприяють сфероїдизації графіту – Ce, Mg тощо.

Традиційним та ефективним методом введення в розплав чавуну додаткових елементів, які впливають на умови кристалізації сплаву, є ковшове модифікування. Серед усіх його варіацій найпростішим і найпоширенішим методом є модифікування на дні ковша – pour over метод (рис. 1.13) [61, 86].



1 – розплавлений чавун; 2 – ківш; 3 – модифікатор

Рисунок 1.13 – Схематичне зображення ковшового модифікування чавуну [61]

За рекомендаціями дослідників [53, 82, 90, 91] ефективною альтернативою ковшового є внутрішньоформове оброблення, особливо у якості вторинного модифікування. Такий перехід зумовлено короткотривалістю дії модифікувальних речовин в ковші, ризиком отримання вибілення у виливку та більш ефективним впливом внутрішньоформового модифікування на структуроутворення, графітізацію та дисперсність структури матеріалу. Приклади модифікувальної здатності певних добавок під час ковшового та внутрішньоформового модифікування зображено на рисунку 1.14, з якого можна зробити висновок, що застосування останнього методу збільшує кількість включень графіту від 2,5 до 4,0 разів залежно від швидкості охолодження [53, 87, 92].

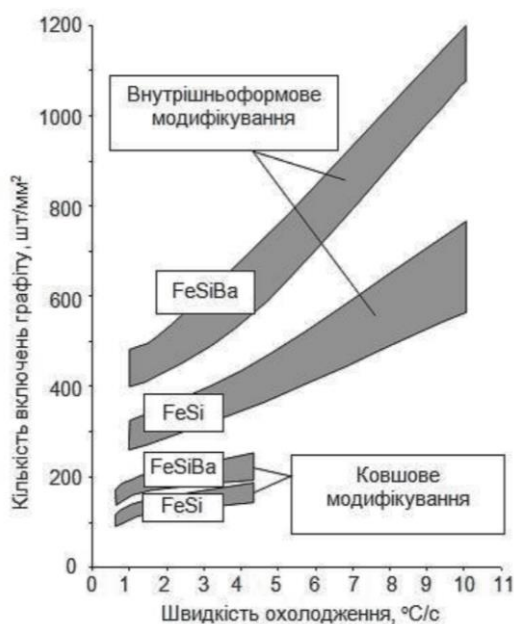
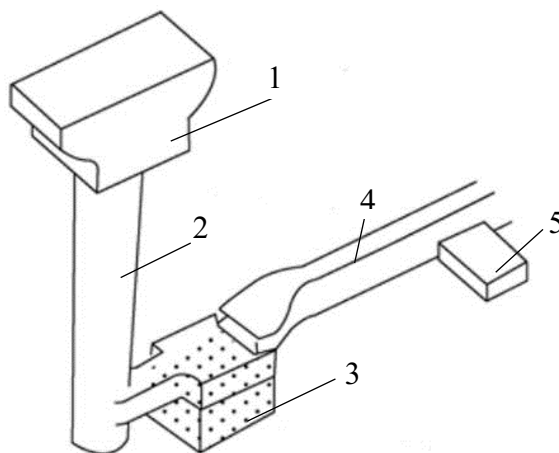


Рисунок 1.14 – Вплив модифікаторів на кількість включень графіту у чавунних виливках під час ковшового та внутрішньоформового модифікування [53]

Метод внутрішньоформового модифікування (inmold) полягає в тому, що воно відбувається в реакційній камері (реакторі) ливникової системи ливарної форми, яка захищає процес від впливу зовнішнього середовища (рис. 1.15). Взаємодія розплаву з модифікатором певної дисперсності відбувається безпосередньо в реакційній камері,

потік промодифікованого чавуну через ливникову систему заповнює порожнину ливарної форми [61, 93].

Результати досліджень [59, 83, 94, 95] свідчать, що модифікування in mold методом сприяє збільшенню кількості центрів кристалізації графіту в чавуні, утворенню дрібнокристалічної структури з підвищеним вмістом фериту в металевій матриці, що надалі впливає на отримання високих технологічних характеристик чавуну в литому стані.



1 – ливникова чаша; 2 – стояк; 3 – реакційна камера з модифікатором;  
4 – ливниковий хід; 5 – живильник

Рисунок 1.15 – Схематичне зображення модифікування чавуну in mold методом в реакційній камері [96]

Одним із способів оброблення розплаву в порожнині ливарної форми є поверхневе легування. Цей метод є перспективним для отримання виливків з диференційованими властивостями [84, 85, 97]. Сутність його полягає в тому, що застосовані дисперсні легувальні суміші, які наносять на визначену поверхню ливарної форми (або стрижня), формують необхідні властивості окремої поверхні виливка на певну глибину. Як зазначено в роботі [84, 98], формування відповідного легованого шару відбувається із застосуванням різних лігатур:

- а) феросплавів різної дисперсності;
- б) порошкоподібних тугоплавких матеріалів;



в) чистих металів та спеціальних лігатур.

Ефективність процесу легування поверхні характеризується температурою заливання розплаву в ливарну форму, інтенсивністю розчинення та взаємодії легувальних компонентів, а також товщиною стінки виливка і шаром легувального покриття [79, 85]. Відповідно, ефективність краща за вищої температури розплаву, тому що розчиняється більше матеріалу покриття та утворюється товстіший легувальний шар із необхідними властивостями. Як стверджують дослідники [84, 97], детальніший механізм поверхневого легування полягає в тому, що під час заливання форми покриття на поверхні спочатку нагрівається, металостатичний тиск розплаву перевищує капілярний, рідкий сплав починає проникати в пори легувального покриття та поступово розплавляє його. Дифузійні процеси за перерізом легованого шару залежать від величини зерна й пористості легувального покриття, тобто від його дисперсності. Як легувальні елементи дослідники [84, 97, 98] рекомендують використовувати феросплави або механічні суміші з розмірами частинок від 0,2 мм до 0,63 мм, які створюватимуть умови для отримання якісного легованого шару із необхідними параметрами.

Використання вищеописаних методів оброблення як окремо так і в комбінації, створює передумови для отримання необхідних чавунних заготовок з градієнтною структурою (зміни морфології металевої матриці та графітових включень) у литому стані.

## **Висновки до розділу 1 та задачі дослідження**

1. Встановлено, що актуальною екологічною проблемою є деструктивний вплив розповсюдженої пластикової продукції, яка має довготривалий час розкладання та токсичний вплив на навколишнє середовище. Зниження шкідливого впливу пластику, підвищення цінності земних ресурсів, зростання якості та безпеки пакування харчових продуктів зумовлюють попит на скляну продукцію, як на екологічну та рециклінгову, що призводить до зростання темпів її виробництва. Особлива частина

– від 75 % до 80 % від загального виробництва скляної продукції, припадає на порожнисту скляну тару.

2. Визначено, що тенденції зростання виробництва порожнистої скляної тари дають поштовх для розвитку нових технологічних моделей виробництва та модернізації вітчизняного оснащення за європейськими стандартами та вимогами. Переважна частка оснащення для виробництва скляної тари на українських підприємствах імпортується, особливо формокомплекти.

3. Значний обсяг виробництва скляної тари української промисловості обумовлює необхідність проведення науково-дослідних робіт щодо створення сучасних матеріалів та технологій для виробництва деталей формокомплектів, а саме форм. Нові матеріали повинні бути конкурентноспроможними та мати властивості на рівні закордонних аналогів з метою імпортозаміщення.

4. Встановлено, що перспективним напрямом до розв'язання даної проблеми є застосування для формокомплекту чавунних литих заготовок із градієнтними структурою та властивостями, які комбінуватимуть в собі комплекс технологічних, механічних та теплофізичних характеристик, який задовольнятиме за стійкістю в умовах роботи під дією циклічних термомеханічних навантажень. Направлена структуризація у виливку для форм повинна містити зміну протяжності та дисперсності сформованих структурних зон та розмірів графітових включень за перерізом виливка. Тобто на робочій поверхні форми повинна знаходитися зона дрібних включень графіту, а найкраще кулястого графіту в м'якій металевій матриці, що забезпечить високу зносостійкість робочої поверхні в умовах термічного впливу. Наступна зміна морфології структури повинна характеризуватися як перехід від вермикулярного до пластинчастого графіту, або як зміну розмірів пластинчастого графіту від дрібних до крупних за перерізом виливка, що відповідно і забезпечить інтенсивне тепловідведення від робочої поверхні.

5. Встановлено, що утворення градієнтної структури у виливку можна забезпечити за допомогою ливарних технологічних прийомів. До таких прийомів віднесено вплив на температурно-кінетичні умови кристалізації, що пояснюється зміною швидкості охолодження за перерізом виливка, яка відповідно, впливає на

розміри та направленість росту як графітових включень, так і металевої матриці. Одночасне застосування оброблення розплаву спеціальними інокуляторами та модифікаторами вплине на морфологію графіту та її розподіл за перерізом виливка.

Враховуючи вищенаведений аналіз інформації, **метою дослідження** є створення комплексу технологічних прийомів формування градієнтної структури та властивостей у виливках з жаростійких чавунів.

Для досягнення поставленої мети в дослідженні необхідно вирішити наступні задачі:

1. Визначити хімічний склад дослідних чавунів на основі комплексного аналізу бази даних жаростійких чавунів, які працюють в умовах термічних навантажень сумісно з урахуванням впливу хімічних елементів на формування їх властивостей.
2. Визначити температури почату фазових перетворень в дослідних чавунах.
3. Визначити показники жаростійкості дослідних чавунів.
4. Розробити комплекс технологічних прийомів для виготовлення виливків із градієнтною структурою та властивостями за перерізом виливків.
5. Дослідити зміни структури за перерізом виготовлених виливків металографічним методом.
6. Визначити механічні та теплофізичні властивості за перерізом виготовлених виливків.

## 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Технологічний процес виплавляння чавунного розплаву

Сплави виплавляли в індукційній печі ІСТ-0,06 з машинним генератором (частота струму 2500 Гц). Місткість тигля – 60 кг, футеровка печі – кисла на основі  $\text{SiO}_2$ . Плавлення здійснювали методом переплаву. Завантаження шихти, плавлення та легування металу здійснено за послідовністю наведеною на рисунку 2.1.

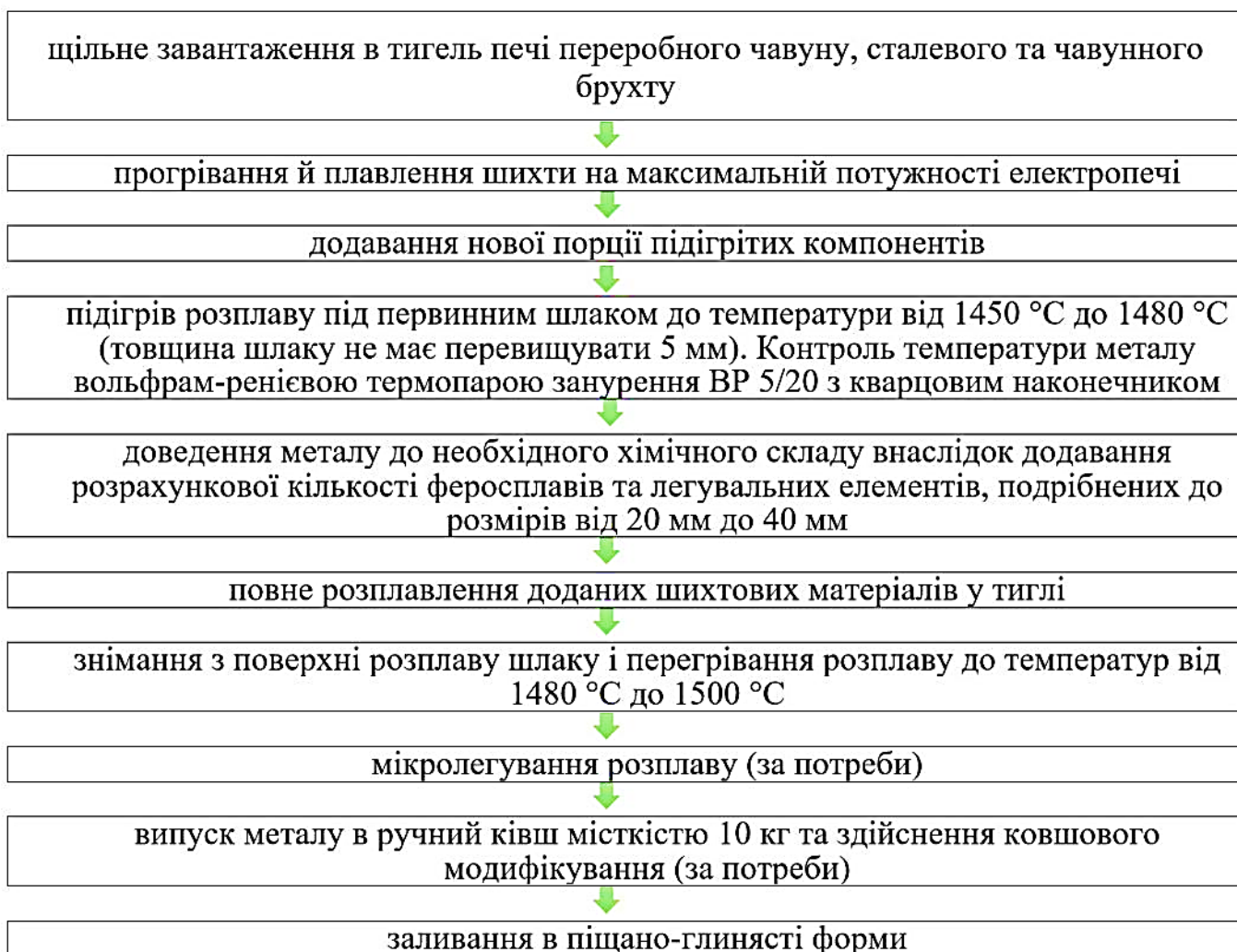


Рисунок 2.1 – Технологічний процес виплавляння чавунного розплаву та заливання в ливарні форми

## 2.2 Характеристики хімічного складу досліджуваних чавунів

Аналіз хімічного складу поширених чавунів, які вказані в пункті 1.11, дозволяє для дослідження сплавів визначити базові елементи та діапазон їх вмісту у чавуні, а саме: С від 2,4 % до 3,8 % , Si від 1,5 % до 3,5 % та такі основні легувальні елементи як Мо, Mn, Ni, Ti, Cr, Al. Легувальні елементи були введені у вигляді первинних елементів та феросплавів: ФС45-5 ДСТУ 4127:2002, FeMo60 ДСТУ ISO 4552-2:2010, Нікель НП-2 ДСТУ ГОСТ 492:2007, FeTi70 ДСТУ ISO 4552-2:2010, FeCrC70 ДСТУ ISO 4552-2:2010, Алюміній А85 ДСТУ ГОСТ 11069-2003.

## 2.3 Характеристики матеріалів та способів оброблення чавуну

З метою забезпечення умов направленої кристалізації у виливках застосовували поверхнєве оброблення інокулятором марки SB5 фракціями 0,315 мм, 0,4 мм та 0,63 мм у кількості 0,4 % від маси виливка, а розплав заливали за температури від 1350 °C до 1390 °C.

Ковшове графітизувальне оброблення розплаву за температури від 1420 °C до 1450 °C проводили за pour over методом, у ковші місткістю 10 кг із використанням інокулятора марки SB5 розміром фракції від 2 мм до 6 мм, кількістю 0,5 % від маси розплаву у ковші.

Сфероїдизувальне оброблення проводили за in mold процесом у реакційній камері (реакторі) ливникової системи із використанням модифікатора марки VL63(M) розміром фракції від 2 мм до 5 мм у кількості 0,4 % від маси виливка. Температура розплаву під час заливання становила від 1350 °C до 1390 °C.

Хімічний склад інокулятора марки SB5 та модифікатора марки VL63(M) наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад використаних лігатур (виробник ASK Chemicals Metallurgy, Німеччина) [99]

Найменування марки лігатури	Вміст елементу, мас. %						
	Si	Al	Ca	Mg	Ba	PЗМ (церій)	Fe
SB5	65-70	1,0-1,5	1,0-1,5	-	2,0-2,5	-	залишок
VL63(M)	45	до 0,5	1,9	6,0-6,5	-	0,7	залишок

## 2.4 Виготовлення ливарних форм та технологічні варіанти виготовлення заготовок

Ливарні форми виготовляли з єдиної формувальної суміші (оборотна суміш від 90 % до 92 %, кварцовий пісок – від 8,0 % до 6,5 %, глина бентонітова – від 2,0 % до 1,5 %). Робочі поверхні ливарних форм покривали фарбою на основі циркону для забезпечення стабільної шорсткості та запобігання пригару на зразках. Розміри вилівка становили 135 мм x 70 мм x 50 мм.

З метою підсилення ефекту направленої структуризації використано холодильники у вигляді чавунної плити із СЧ200 відповідно до ДСТУ 8833:2019 товщинами 10 мм, 20 мм та 30 мм, які було розміщено у нижній напівформі.

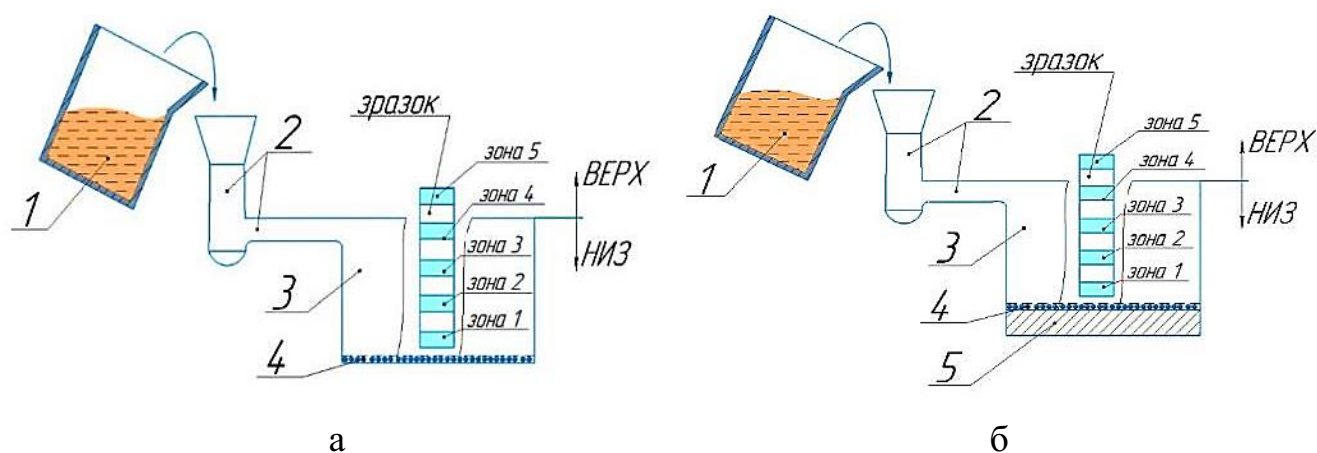
Для дослідження процесу виготовлення чавунних виливків із градієнтною структурою запропоновано та реалізовано чотири різні технологічні варіанти, які умовно розділені на дві групи (рис. 2.2 та рис. 2.3):

1) перший технологічний варіант – поверхнєве оброблення розплаву інокулятором (рис. 2.2, а);

2) другий технологічний варіант – поверхнєве оброблення розплаву інокулятором із литтям на холодильники різних товщин (рис. 2.2, б).

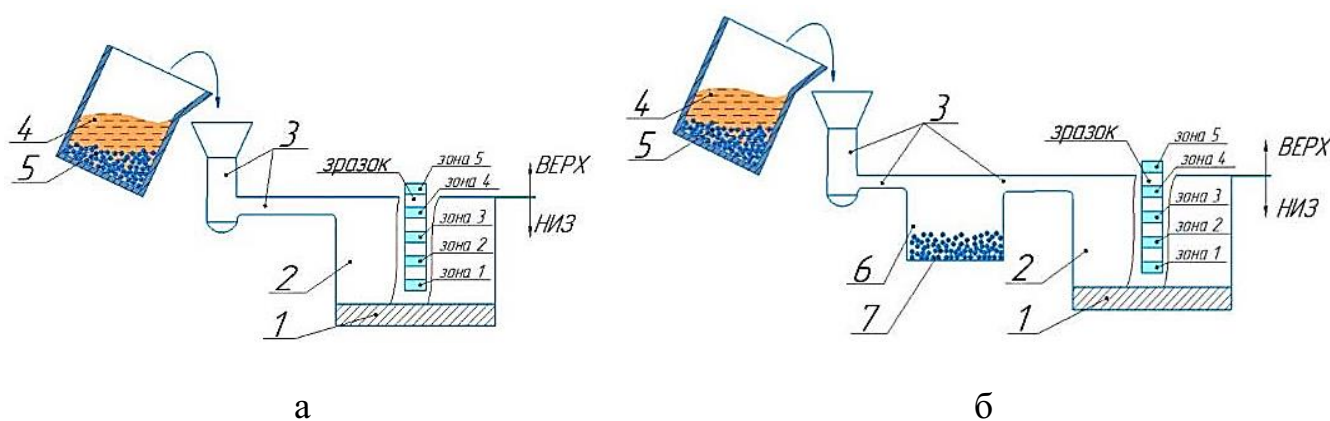
3) третій технологічний варіант – ковшове оброблення розплаву інокулятором з розливанням на холодильники різних товщин (рис. 2.3, а);

4) четвертий технологічний варіант – комбіноване (поступове) ковшове та внутрішньоформове оброблення (inmold методом) розплаву чавуну з розливанням на холодильники різних товщин (рис. 2.3, б).



1 – ківш з розплавленим чавуном; 2 – ливникова система; 3 – порожнина ливарної форми; 4 – інокулятор марки SB5; 5 – холодильник

Рисунок 2.2 – Схематичне зображення першого та другого технологічних варіантів відповідно: поверхневе оброблення інокулятором (а), поверхневе оброблення інокулятором із застосуванням холодильників (б), та зразок із зонами дослідження



1 – холодильник; 2 – порожнина форми; 3 – ливникова система; 4 – ківш з розплавленим чавуном; 5 – інокулятор марки SB5; 6 – реакційна камера; 7 – модифікатор марки VL63(M)

Рисунок 2.3 – Схематичне зображення третього та четвертого технологічних варіантів відповідно: ковшове оброблення чавуну із застосуванням холодильників (а), комбіноване оброблення чавуну із застосуванням холодильників (б) та зразок із зонами дослідження

## 2.5 Підготовка зразків для досліджень

Отримані виливки охолоджували у формі до кімнатної температури. Потім із центральної частини виливків (як показано на рис. 2.2 та рис. 2.3) за допомогою стрічкової пилки вирізали зразки (рис. 2.4). Подальші дослідження структури та властивостей зразків проводили за протяжністю перерізу в п'яти рівновіддалених зонах. Дослідження переважно проводили в центральній частині зон з відступом 3 мм від верху та низу зразка, та з кроком 11 мм між центрами зон.

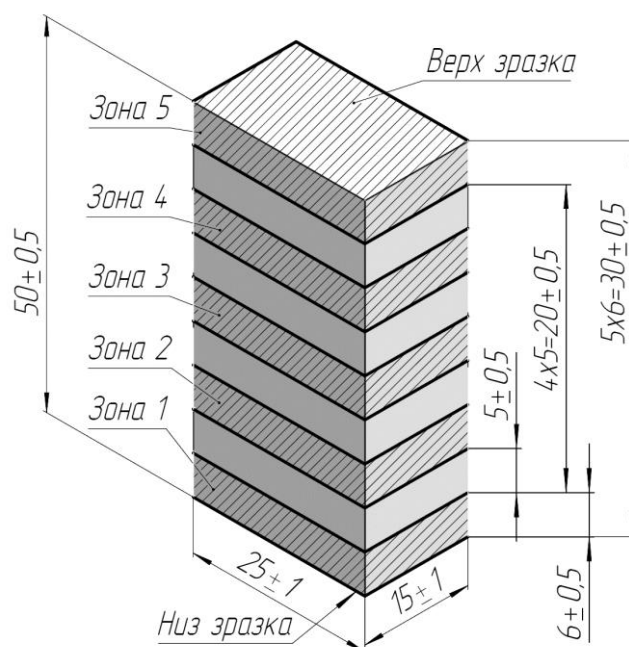


Рисунок 2.4 – Схематичне зображення вирізаного зразка із зонами дослідження

Шліфування та полірування зразків виконували за допомогою шліфувального паперу зернистістю 200, 400, 600, 800, 1000 та фетрового полотна з алмазною пастою зернистістю 1/0 ТУ 2-037-506-85 на шліфувально-полірувальному верстаті Grinder-Polisher beta, від компанії Buehler (Німеччина).



Для визначення структурних складових зразків проводили травлення 5 % спиртовим розчином азотної кислоти. Після травлення зразки промивали під струменем води і просували фільтрувальним папером.

Для визначення за перерізом вилівка значень температуропровідності, дослідження проводили на зразках, які були додатково вирізані із нижньої, середньої та верхньої частин виливків дослідних чавунів, що збігаються із зоною 1, зоною 3, зоною 5 відповідно (див. рис. 2.4). Зразки вирізали на верстаті для різки від компанії Buehler (Німеччина) з ручним та автоматичним управлінням і водяним охолодженням з метою уникнення їх перегрівання, яке може вплинути на зміну властивостей матеріалу.

## 2.6 Металографічні дослідження

Металографічні дослідження площини перерізу зразків проводили у п'яти рівновіддалених зонах (див. рис. 2.4) на мікроскопі iScore, IS.1053-PLMi (Euromex), який відображено на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5 – Мікроскоп iScore, IS.1053-PLMi (Euromex)

Мікроскоп застосовують в матеріалознавстві для спостереження за макро- та мікроструктурою зразків. До мікроскопу входить падаюче освітлення, поляризаційні

та компенсаційні фільтри, поворотний предметний столик, об'єктиви тощо. Всі базові характеристики мікроскопу наведені в [100].

Дослідження металографічних зображень проводили на збільшеннях від 50 до 500. Цифрове оброблення та алгоритмічний аналіз металографічних зображень виконували за допомогою програмного забезпечення ImageJ [101], яке розповсюджується без ліцензійних обмежень.

Визначення геометричних параметрів включень виконували за допомогою програми ImageJ, класифікацію графітових включень здійснювали за методикою візуального аналізу відповідно до ДСТУ EN ISO 945-1:2022.

## **2.7 Дослідження фізико-механічних характеристик зразків**

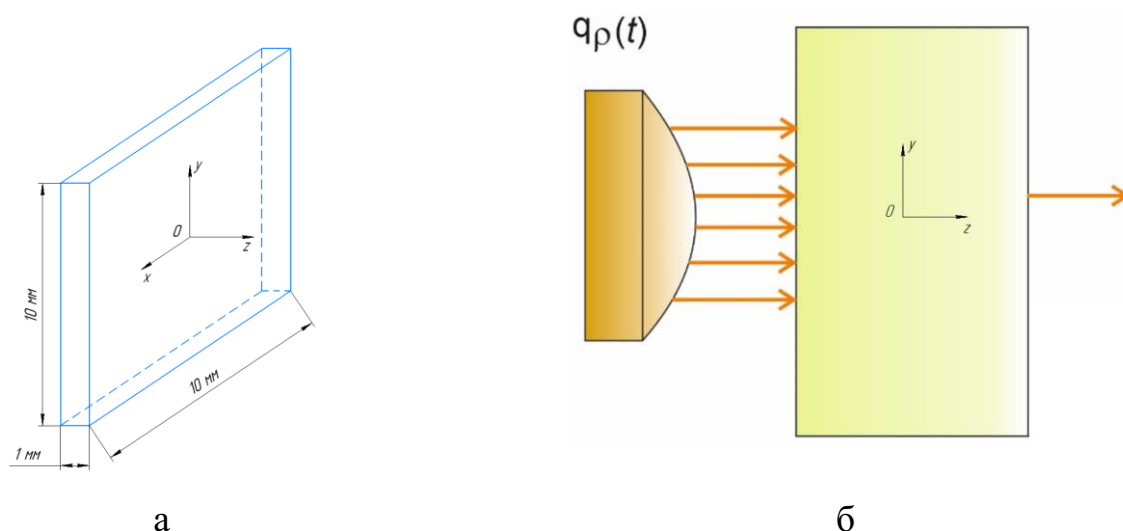
### **2.7.1 Визначення твердості зразків та мікротвердості окремих структурних складових**

Дослідження мікротвердості складових металевої матриці чавунних виливків здійснювали за Віккерсом на мікротвердомірі ПМТ-3 відповідно до [102] (із зусиллям  $F = 1,96 \text{ Н}$ ). Визначення твердості зразків за Брінеллем виконували на напівавтоматичному твердомірі ТШ-2М, керуючись нормативними документами [103, 104].

### **2.7.2 Методика визначення температуропровідності зразків**

Відповідно до розділу 1 (див. підрозділи 1.6, 1.7, 1.10), до основних функцій матеріалу форм також належить відведення теплової енергії від розплавленого скла, яка розсіюється у навколишнє середовище внаслідок теплопереносу безпосередньо через саму форму. Для дослідження було обрано одну із теплофізичних характеристик матеріалу, яка впливає на інтенсивність передачі теплової енергії, а саме температуропровідність.

Вимірювання температуропровідності проводили імпульсним методом, в основі якого лежить вимірювання теплових ефектів під час взаємодії імпульсного випромінювання з досліджуваним зразком, який має характерні форму та розміри (рис. 2.6).



а – розміри та форма зразка; б – моделі процесу перерозподілу теплового потоку через зразок у процесі визначення температуропровідності матеріалу

Рисунок 2.6 – Характерні особливості імпульсного методу вимірювання температуропровідності [51]

Процес імпульсного нагрівання речовини має певні особливості та фізичні обмеження за його використання, оскільки:

- використовують лише об'ємні теплові оптичні джерела для проникнення світла в товщу зразка;
- інтенсивність світла за товщиною зразка зменшується пропорційно до глибини його проникнення, що призводить до нерівномірності виділення енергії у об'ємі зразка.

Остання особливість викликає неоднорідність прогрівання зразка, оскільки створює процеси тепло- та масопереносу між різними частинами матеріалу зразка [105].

Явище теплопереносу в твердих тілах описується рівнянням збереження енергії. Відповідно до [51, 106], нехай:

$$dQ = \rho T dS \quad (2.1)$$

де  $dQ$  – кількість теплоти, яку отримує одиниця об'єму речовини, Дж;

$\rho$  – густина речовини, кг / м<sup>3</sup>;

$T$  – термодинамічна температура, К;

$S$  – ентропія одиниці маси речовини, Дж / К.

Тоді при  $dQ = 0$  теплопередача відбувається адіабатично, тобто без втрат. У зв'язку зі складнощами створення ідеальних термодинамічних процесів в земних умовах (особливо адіабатичного) використовують наближено адіабатні процеси. Їх можна створити, наприклад, за використання значного ізоляційного шару, або так швидко, щоб теплообмін з навколишнім середовищем та всередині системи не встиг відбутися. Одними з причин, що призводять до порушення адіабатичного процесу, є наявність незворотніх процесів (теплопровідності), та наявність зовнішніх джерел теплоти (оптичних). Перенос енергії може відбуватися квантовими частинками такими як фотони, електрони або фонони в залежності від структури середовища [105, 107, 108].

Вважатимемо, що зміна термодинамічних величин проходить за незмінного тиску, а коефіцієнт теплопровідності ( $\kappa$ ), густина ( $\rho$ ) і теплоємність ( $C_\rho$ ) за незмінного тиску, не змінюються від температури та координат у вигляді лінійної постановки задачі. Запишемо закон Фур'є [51, 106]:

$$\vec{q} = -\kappa \vec{\nabla} T \quad (2.2)$$

де  $\vec{q}$  – вектор густини теплового потоку, Вт / м<sup>2</sup>.

$\kappa$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт / (м · К), характеризує здатність речовини проводити теплоту.

$\vec{\nabla} T$  – градієнт температур, К / м.

Тоді вважаємо, що пучки імпульсів світла рухаються вздовж додатного напрямку вісі  $O_z$  (див. рис. 2.6) від джерела та потрапляють по нормалі на поверхню зразка. При цьому в зразку створюються об'ємне джерело теплоти з густиною потоку енергії  $\alpha J(\vec{r}, t)$ , де  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання імпульсного випромінювання;  $J(\vec{r}, t)$  – розподіл інтенсивності світла в матеріалі.

Для гаусовго розподілу інтенсивності пучка розподіл інтенсивності має вигляд [51]:

$$J(\vec{r}, t) = (1 - R)J_0 \exp(-\alpha z) \exp\left\{-\frac{x^2 + y^2}{r^2}\right\} \cdot f\left(\frac{t}{\tau_p}\right) \quad (2.3)$$

де  $J_0$  – інтенсивність імпульсного випромінювання;

$R$  – коефіцієнт відбивання світла поверхнею;

$r$  – радіус світлового пучка;

В рівнянні (2.3) функція  $f\left(\frac{t}{\tau_p}\right)$  описує часову обвідну імпульсу, що має тривалість  $\tau_p$ .

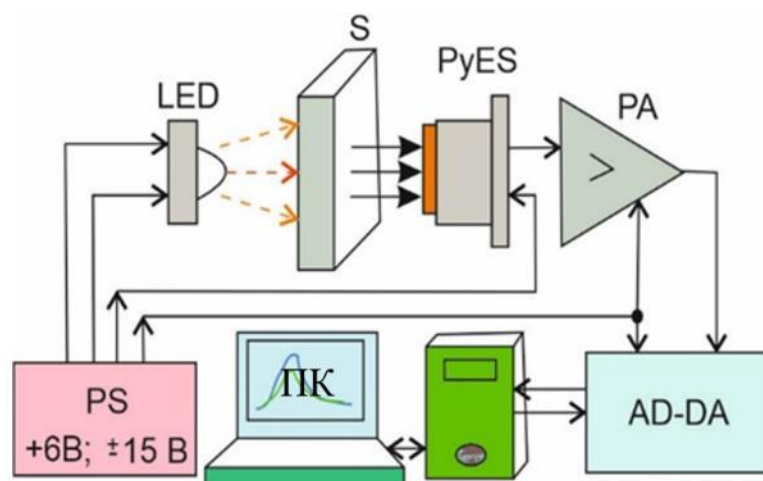
За умов незалежності від температури та координат теплофізичних характеристик використовується нестационарне лінійне рівняння теплопровідності для визначення температури за імпульсного випромінювання, яке має вигляд [51]:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \chi \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \alpha^* \cdot J(x, y, z, t), \quad (2.4)$$

де  $\chi = \kappa / \rho \cdot C_p$  – коефіцієнт температуропровідності,  $\text{м}^2/\text{с}$ , та  $\alpha^* = \alpha / \rho \cdot C_p$ .

Вище описані рівняння (2.1) – (2.4) та межі використання методу дають основу для існування неруйнівного та безконтактного імпульсного методу вимірювання температуропровідності. Під час застосування даного методу поверхня зразка, яка знаходиться у площині  $Oxy$  (див. рисунок 2.6), опромінюється імпульсом світла оптичного діапазону протягом  $\tau = 100$  мс, частина з якого оптично поглинається з перетворенням на теплову енергію з відповідним підвищенням температури, що призводить до поширення температурних хвиль у глибину зразка. Згодом відповідна частина теплового потоку, нерозсіюючись, підвищує температуру на протилежній поверхні зразка, що знаходиться на площині, що паралельна  $Oxy$ , яка в свою чергу починає створювати інфрачервоне теплове випромінювання. Затримку між ІЧ випромінюванням джерела та зразка, яка відповідає дифузії тепла, контролюють ІЧ- детектором. Використання піроелектричного датчику [109] призводить до спрощень, оскільки немає необхідності визначати падіння та поглинання енергії, коефіцієнт поглинання поверхонь, коефіцієнт випромінювання, а також криву зміни температури в часі та інші параметри сенсора [72].

Принципова схема вимірювальної системи ІМБТ у якій світлодіод (LED), як ІЧ випромінювач та піроелектричний детектор у якості теплового датчику (PyES), опромінюють та знімають величину теплового потоку відповідно з чавунних зразків (рис. 2.7).



LED – світлодіод (GREE-XML), S – зразок з чавуну, PyES – піродатчик (IRA- E700ST0), PA – посилювач ( $K_u=10000$ ), AD-DA – блок АЦП-ЦАП ( $\pm 10$  В, 12 розр, 2 канали), PS – блок живлення ( $\pm 15$  В, +6 В), ПК – персональний комп'ютер

Рисунок 2.7 – Блок-схема пристрою імпульсного методу вимірювання теплопровідності [51]

Для імпульсного методу вимірювання теплопровідності використано відповідне рівняння теплопровідності [51, 106]:

$$\frac{c_p dQ(r,t)}{dt} = k \Delta Q(r,t) + W(r,t), \quad (2.5)$$

під час виконання таких граничних умов [51]:

$$-\frac{k \partial Q}{\partial x} \Big|_0 = \alpha_1 Q(0,t), \quad -\frac{k \partial Q}{\partial x} \Big|_1 = \alpha_2 Q(L,t), \quad (2.6)$$

де  $W(r,t)$  – форма проходження теплового імпульсу;

$C_p$  – питома об'ємна теплоємність, Дж / (кг · К);

$k$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт / (м · К);

$L$  – товщина шару, м;

$\alpha_1, \alpha_2$  – коефіцієнти тепловтрат шару, Вт / (м<sup>2</sup> · К).

Теплова крайова задача полягає у визначенні радіаційної щільності випромінювання задньої стінки шару, яке зазнало імпульсне опромінення [72, 110]:

$$q_p(t) = q_{p0} \alpha_1 \{\eta(t) - \eta(t - \tau_U)\}, \quad (2.7)$$

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (2.8)$$

Визначення проходження кількості тепла крізь зразок відбувається за наступним співвідношенням:

$$W_{\rho^{(x=1)}} = \alpha \{Q(L, t) - Q(L, t - \tau_U)\}, \quad (2.9)$$

з граничними умовами наведеними у (2.6). Тоді вирішення задачі має вигляд [51, 106]:

$$\chi = \frac{L^2}{\tau_d} = \frac{C\rho L^2}{k}; \quad \chi = \frac{k}{C\rho}, \quad (2.10)$$

де  $\chi$  – коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup> / с;

$\tau_d$  – зсув у часі максимуму пройденого теплового імпульсу, с;

$C$  – ізобарна теплоємність, Дж / (кг · К);

$\rho$  – густина шару, кг / м<sup>3</sup>.

### 2.7.3 Метод диференційно-термічного аналізу дослідження зразків

Дослідження структурних і фазових перетворень у процесі нагрівання та охолодження зазвичай виконують за допомогою диференційно-темічного аналізу, диференціально скануючої калориметрії (ДСК), а також синхронного термічного аналізу (СТА), що є багатоцільовим аналізом. Саме (СТА) включає два методи – диференційно-термогравіметричний аналіз (ДТГА) та ДСК.

Дослідження проводили на обладнанні СТА фірми NETZSCH (Німеччина) марки STA 449 C Jupiter (рис. 2.8).

*Даний метод дослідження дозволяє:*

а) не враховувати такі фактори як неоднорідність матеріалу, умови проведення дослідження та підготовки зразків і подібні супутні фактори;

- б) дозволяє досліджувати окислення та випаровування металів (чутливість ваг становить  $10^{-7}$  г);
- в) точно визначати величини теплоємності та ентальпії (внаслідок відомого фактичного значення маси);
- г) розділяти внесок зворотних та незворотних процесів у теплові ефекти за рахунок проведення модульованого ДСК;
- д) визначати кількісно теплові ефекти та відповідні температурні показники;
- е) порівнювати результати термічного аналізу зі зміною маси зразка (сушіння, окиснення, розкладання і випаровування в процесі експерименту) та вплив її на теплові ефекти.



Рисунок 2.8 – Синхронний термічний аналізатор STA 449 C Jupiter

*Даний метод дослідження не дозволяє:*

- а) досліджувати всі структурні та фазові перетворення в металах і сплавах;
- б) фіксувати процеси тривалі у часі, або такі, що супроводжуються різкою зміною теплофізичних характеристик (гомогенізації, рекристалізації, структурної релаксації, розпад твердих розчинів, перехід метастабільних фаз в стабільні).

Термоаналізатор STA 449 C Jupiter дозволяє проводити дослідження в двох режимах:

- 1) «зразок» – режим не враховує теплофізичні властивості тигельної системи та виконують порівняння з інертним еталоном, що має близькі за значенням характеристики до досліджуваного зразка;



2) «зразок з корекцією» – режим враховує теплофізичні властивості тигельної системи. Задля виключення впливу тигля на результати дослідження, виконують попереднє визначення зміни теплоємності тигельної системи та еталону в аналогічних експериментальних умовах для дослідження зразка й подальше автоматичне враховування показників приладом під час вимірів.

Однак, у будь-якому випадку абсолютна чистота дослідження відсутня, адже існує деяке спотворенню кривих ДСК та нахил базової лінії, оскільки, підбір фактично ідеального еталону з того самого матеріалу, що і досліджуваний зразок практично неможливий. Навіть якщо структурні зміни в зразку відсутні (після термооброблення), вплив еталону в тиглі буде відчутним (різне розміщення та масово-габаритні властивості).

Дослідження зразків за допомогою СТА виконували за наступних умов:

- а) калібрування приладу виконували перед проведенням дослідження за еталонними речовинами згідно інструкції до приладу;
- б) застосовували інертне середовище;
- в) точність вимірювання температур термопарою типу S (ПП1) складала  $\pm 0,5$  °C;
- г) провели нагрівання зі швидкістю 20 °C / хв, невиймаючи зразок із приладу.

#### **2.7.4 Дослідження окалиноостійкості чавунів**

Досліджувані зразки піддавали випробуванню на окалиноостійкість відповідно до вимог [40] і ваговим методом за збільшенням маси зразків за стандартною нормативною методикою та дослідженнями [66].

Головним показником окалиноостійкості є величина  $q$ , яка характеризує зміну маси зразка на одиницю його поверхні протягом певного часу ( $\text{г} / (\text{см}^2 \cdot \text{год})$ ). За різницею маси зразка до та після випробування визначали зміну маси  $\Delta P$ , за якою, з урахуванням площі поверхні зразка, розраховували за формулою питому зміну маси  $q$ , яка є характеристикою окалиноостійкості:

$$q = \frac{\Delta P}{\tau \cdot S}, \quad (2.11)$$

де  $\Delta P$  – різниця маси зразка до та після випробовування, г;

$\tau$  – час витримування зразка за температури випробовування, год;

$S$  – площа поверхні зразка, см<sup>2</sup>.

Основні характеристики зразків та процесу випробування на окалинотійкість:

а) для дослідження використовували циліндричні зразки діаметром  $10 \pm 0,1$  мм та висотою  $20 \pm 0,2$  мм (рис. 2.9, а);

б) використано спеціальні прожарені алундові човники, з якими зразки контактували двома повздовжніми лініями по бічних поверхнях (рис. 2.9, а);

в) поверхня зразків в алундових човниках вільно контактувала з повітрям, забезпечено зберігання окалини, а матеріал човника не контактував з утвореними оксидами;

г) випробування проводили за максимальної температури  $1000 \pm 20$  °С (на  $150$  °С вища за максимально можливу температуру експлуатації досліджуваного матеріалу) до сталої маси в печі СНОЛ 1,6.2,5.1/11-И24;

д) середовище в якому проводили випробування – повітря;

е) початок випробовування – час досягнення в робочій зоні печі необхідної температури (рис. 2.9, б);



а



б

Рисунок 2.9 – Зовнішній вигляд зразків підготовлених до досліджень (а) та у пічній атмосфері (б)

ж) після закінчення терміну випробовування зразки видаляли із печі, охолоджували на повітрі й зважували;

з) для кожного хімічного складу випробовували одночасно три зразки з подальшим усередненням результатів випробовувань.

Визначена зміна маси зразків дає можливість оцінити схильність металу до окиснення, тобто його окалиностійкість.

### 2.7.5 Дослідження термостійкості та ростостійкості чавунів

Особливість методики випробовувань термостійкості та ростостійкості матеріалу базувалася на дослідженнях [65]. Методика полягає у виявленні на зразках тріщин термічної втоми внаслідок дії циклічних нагрівань та охолоджень, зміни їх зовнішньої форми та геометрії відповідно, що дає можливість оцінювати зміну щільності поверхневих шарів зразка та його експлуатаційної здатності в умовах термічних навантажень.

Умови проведення досліджень термостійкості та ростостійкості матеріалів були однаковими для всіх зразків.

Основні умови та особливості для дослідження термостійкості та ростостійкості наступні:

а) габаритні розміри зразків – довжина 60 мм, діаметр – 10 мм (рис. 2.10);



Рисунок 2.10 – Зовнішній вигляд підготовлених зразків перед дослідженням термостійкості та ростостійкості

- б) інтервал термоцикування в діапазоні температур  $25 \pm 3 \leftrightarrow 1000 \pm 20$  °C;
- в) нагрівання в індукційній печі до  $1000 \pm 20$  °C;
- г) різке охолодження в проточній воді з температурою  $25 \pm 3$  °C;
- д) вимірювання та реєстрація змін лінійних розмірів зразків у процесі випробування;
- е) фіксація циклу виникнення тріщин термічної втоми на будь-якій з поверхонь зразків до моменту їх повного руйнування.

## 2.8 Оброблення отриманих результатів

Оцінка точності отриманих даних проведених експериментів визначено за такими показниками [111]:

- а) середнє арифметичне значення:

$$\langle X \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (2.12)$$

де  $\langle X \rangle$  – середнє значення отриманих результатів під час випробування;

$X_i$  – значення  $i$ -го виміру;

$n$  – кількість вимірів.

- б) відносна похибка вимірювання:

$$\delta = \frac{\Delta X_{\text{вип}}}{\langle X \rangle} \cdot 100 \%, \quad (2.13)$$

Відповідне застосування обробки отриманих експериментальних даних зменшує вплив випадкових похибок під час проведення досліджень.

## Висновки до розділу 2

1. Визначено шихтові матеріали та режими технологічного процесу приготування розплаву чавуну для виготовлення дослідних виливків.

2. Розроблено чотири технологічні варіанти виготовлення виливків з метою створення та регулювання градієнтної структури й властивостей:

2.1) поверхнєве оброблення розплаву у формі зі застосуванням інокулятора різної дисперсності;

2.2) застосування теплоакумулюваних елементів різних товщин у поєднанні із поверхневим обробленням дисперсним інокулятором;

2.3) ковшове оброблення розплаву інокулятором та застосування теплоакумулюваних елементів різних товщин;

2.4) ковшове та внутрішньоформове оброблення чавуну у комбінації із застосуванням теплоакумулюваних елементів різних товщин.

3. Описано способи відбирання та підготовлення зразків до досліджень.

4. Обрано методики та устатковування для проведення металографічних досліджень, визначення фізико-механічних властивостей, що дозволяє отримати високу відтворюваність результатів та відповідають вимогам чинної нормативної документації.

### 3 ВИЗНАЧЕННЯ ХІМІЧНИХ ТА ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДОСЛІДНИХ ЧАВУНІВ

#### 3.1 Підбір хімічного складу дослідних чавунів

Однією із важливих характеристик, що формує термостійкість, теплофізичні та технологічні властивості чавуну, є його хімічний склад. Відповідно такі властивості формують роботоздатність матеріалу формокомплекту для виготовлення скляної тари. Стійкість матеріалу під час температурних коливань значною мірою залежить від його структури. Зокрема, відсутність фазових перетворень у діапазоні робочих температур, характерна для кремнистих, високохромистих та високонікелевих чавунів, що сприяє підвищенню їхньої стійкості.

Для забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей дослідних матеріалів, у тому числі, використано рекомендації наукових робіт наведених у першому розділі роботи (див. підрозділи 1.11, 1.12).

Вміст С в найбільш поширених чавунах, що застосовують для виробництва формокомплектів (див. табл. 1.2), знаходиться переважно від 2,4 % до 3,8 %. Крім того, у роботі [37, 112] стверджують, що даний діапазон вмісту С у чавуні зумовлює процес утворення стабільних фаз  $\alpha$ -заліза та графіту під час повільного охолодження виливка. Перевищення вмісту С понад 3,8 % призводить до погіршення механічних властивостей виливка внаслідок надмірної кількості графітових включень та значного збільшення їх розмірів. Зниження вмісту С менше 2,4 % суттєво погіршує ливарні властивості чавунного розплаву та збільшує його схильність до вибілення. Тому, для подальших досліджень вміст С у чавуні забезпечували в діапазоні від 2,4 % до 3,8 %.

Для додаткової графітизувальної дії у чавун рекомендовано [59, 60, 112] вводити від 1,5 % до 3,5 % Si. Досить широкий діапазон вмісту Si у чавунах, які використовують для деталей формокомплекту, зумовлений позитивним впливом на утворення феритної матриці та неоднозначним впливом на жаростійкість [59, 93, 113]. Висока спорідненість Si до O негативно впливає на зміну об'єму чавуну та, як наслідок, на його ріст у процесі експлуатації, особливо за

високих температур [37, 58, 88]. Тому для проведення подальших досліджень було прийнято рішення звужити діапазон та розділити його на два: від 1,8 % до 2,6 % Si та від 3,0 % до 3,3 % Si.

Як зазначено джерелами [58, 61], Mn необхідний для нейтралізації впливу S на Fe, яка під час затвердіння чавуну утворює сульфід заліза (FeS), що випадають на межах зерен та створюють у залізобуглецевих сплавах негативний ефект червоноламкості. Однак, Mn сприяє перлітизації та зниженню термостійкості чавунів, особливо таких, які піддаються високому термічному впливу. Як було зазначено вище, для деталей формокомплекту необхідна переважно або повністю феритна матриця та висока термостійкість, тому що вони працюють за циклічного впливу високих температур. Отже, керуючись [58, 61, 63], вміст Mn у дослідних чавунах обмежено на рівні 0,8 %.

Наявність підвищеного вмісту P призводить до утворення фосфідної евтектики у чавуні, що різко знижує його термічні та окремі механічні властивості. Підвищений вміст S значно погіршує міцнісні характеристики матеріалу за високих температур та сприяє утворенню тріщин. Отже, необхідно забезпечити низький вміст P та S – до 0,04 % P та 0,02 % S [58, 61].

Такий елемент як Al має непостійний вплив на проходження процесу графітизації в чавуні. Позитивно впливає на графітизацію лише вміст Al до 4 %. Однак, Al активно утворює самопасивуючу оксидну плівку, яка діє як захисний шар на поверхні виливка та попереджає його окиснення [58, 62]. Тому для одного дослідного діапазону обрано вміст Al до 0,1 %, а в іншому, з метою формування не лише оксидної плівки, а й графітизувального впливу – в діапазоні від 0,6 % до 1,5 %.

З метою підвищення жаростійкості та механічних властивостей досліджуваного матеріалу, доцільно застосовувати не лише Al, а й елементи, що мають високий потенційний вплив на створення міцних оксидних захисних плівок та подрібнення розмірів зерен металевої матриці й графітових включень – Mo, Ni, Cr, Ti [37, 62, 63, 114].

Вміст Mo має негативний вплив на графітизацію, оскільки стабілізує існуючі та утворює стійкі власні карбіди, що однак, підвищують механічні властивості чавуну.

При цьому, Мо має вищу спорідненість до кисню, тому покращує жаростійкість за рахунок оксидних плівок, які утворюються на поверхні виливка. Однак, за невеликого вмісту від 0,01 % до 2,0 % Мо не перешкоджає процесу графітизації, що обумовлено його високою спорідненістю до Fe. З огляду на це, для подальших досліджень обрано вміст Мо від 0,5 % до 0,7 % [58, 62].

Такий елемент як Cr більш інтенсивно перешкоджає процесу графітизації в чавуні. Зазвичай його достатньо до 3,0 % для утворення вибілення, що є дефектною ознакою у товстостінних виливках, особливо таких як форма. Однак, Cr позитивно впливає на розміри графіту та зерен металевої матриці, а саме, подрібнює їх [58, 63]. Також цьому елементу характерне утворення самопасивуючої міцної та тонкої оксидної плівки, яка служить захисним бар'єром від корозії матеріалу [62]. Отже, з огляду на зазначену інформацію, вміст Cr в дослідних чавунах обрано на рівні до 0,1 % Cr в одному дослідному діапазоні та від 0,3 % до 0,8 % Cr в іншому дослідному діапазоні.

Ti позитивно впливає на подрібнення структури та утворення захисної оксидної плівки. Цей елемент утворює спеціальні карбіди та інші фази, які є зародками для графіту в процесі затвердіння чавуну. Також, не дивлячись на сильну карбідоутворювальну дію, за обмеженої кількості Ti сприяє графітизації. Тому, опираючись на рекомендації [58], його вміст в другому дослідному діапазоні визначено від 0,1 % до 0,2 % Ti.

Згідно з [58] Ni підвищує жаростійкість чавуну та однією з його особливостей є вплив на графітизацію структурно-вільних карбідів. Відповідно до [58], зі зростанням вмісту Ni до 9 % кількість графіту збільшується, а при вмісті більше 9 % – зменшується. Тому, вміст Ni обрано в діапазоні від 0,2 % до 0,5 %. Подібний вплив на графітизацію має Cu, але лише до межі розчинності у рідкому стані 3,5 %, позитивно впливає на подрібнення графіту як в першій, так і в другій стадії графітизації [58, 63], тому обрано низький вміст Cu до 0,3 %.

Аналізуючи вищезазначену інформацію, у роботі попередньо підібрано хімічний склад двох досліджуваних чавунів (табл. 3.1). Для подальших досліджень чавунам присвоєно найменування 310СМ та 350СМХАН.



Таблиця 3.1 – Хімічний склад дослідних чавунів

Хімічний елемент	Найменування чавуну	
	310СМ	350СМХАН
	Вміст хімічного елементу в дослідному чавуні, мас. %	
C	3,0-3,2	3,3-3,6
Si	3,1-3,5	1,8-2,6
Mo	0,5-0,7	0,5-0,7
Cr	до 0,1	0,3-0,8
Al	до 0,1	0,6-1,5
Ni	–	0,2-0,5
Ti	–	0,1-0,2
Cu	–	до 0,3
Mn	до 0,8	
P	до 0,04	
S	до 0,01	
Fe	основа	

Подальші визначені теплофізичні властивості дослідних чавунів порівнювали з властивостями чавуну з В.З. (3,2 % C, 2,9 % Si, 0,4 % Mo, 0,1 % Mn, 0,06 % P, 0,1 % S). Дана форма за візуальним контролем не мала критичних дефектів та була відбракована внаслідок потрапляння скломатеріалу до вентиляційних каналів під час налаштування процесу виробництва скляного порожнистого виробу.

З метою дослідження значень температур початку структурних перетворень, що супроводжуються тепловими ефектами, підбраного хімічного складу чавунів 310СМ та 350СМХАН проведено дослідження за методикою диференційно-термічного аналізу (ДТА).

### 3.2 Результати досліджень матеріалів за допомогою методу ДТА

З метою визначення структурних та фазових трансформацій в дослідних чавунах було проведено ДТА. З метою підтвердження адекватності значень отриманих графіків, проводили порівняння із значеннями критичних точок діаграми стану рівноваги двокомпонентних систем Fe-C та Fe-Fe<sub>3</sub>C [112, 114] (рис. 3.1). Також

отримані результати ДТА дослідних чавунів порівнювали з графіками ДТА чавуну В.3..

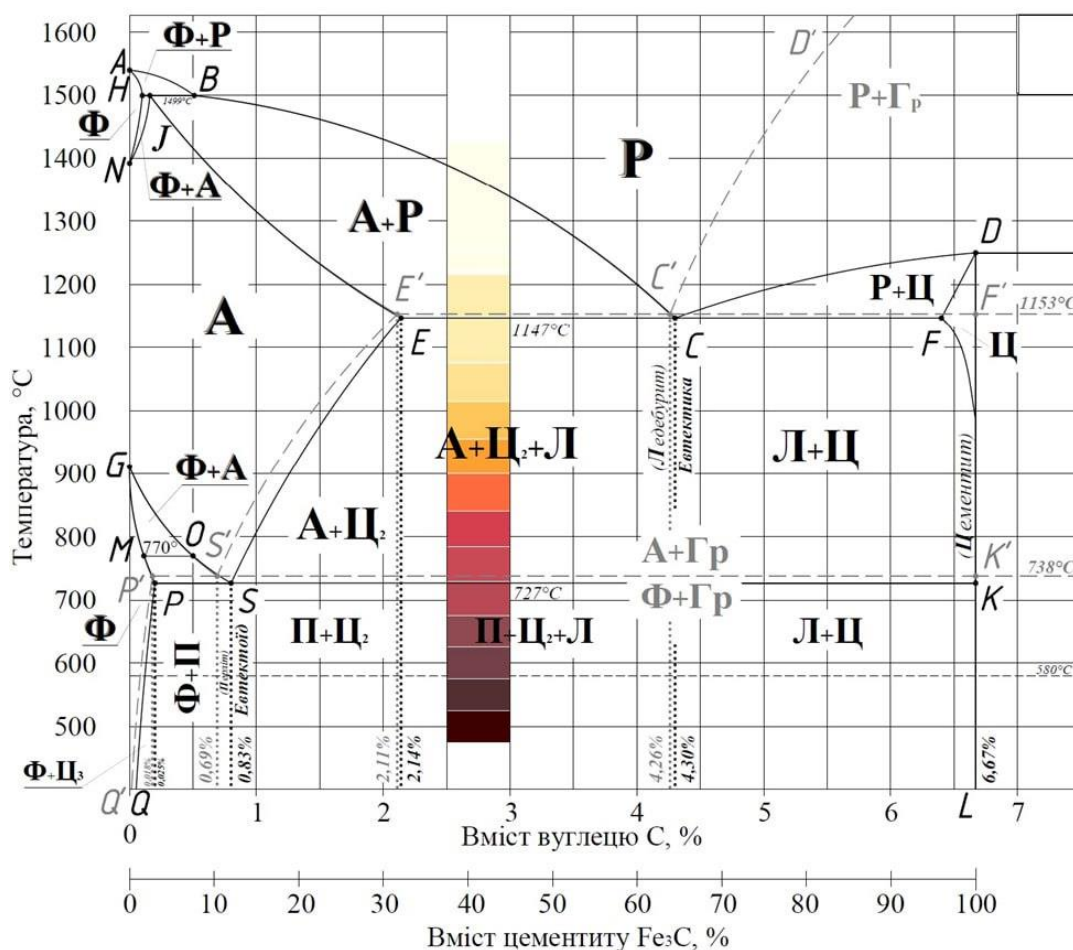


Рисунок 3.1 – Подвійна діаграма стану залізовуглецевих сплавів [112]

### 3.2.1 Дослідження чавуну 310СМ методом ДТА

В досліджуваному матеріалі 310СМ спостерігаємо (рис. 3.2), що під час нагрівання початок фазових перетворень відбувається за температури 733,6 °C до температури 826,2 °C, та аж до температури плавлення, що відповідає діапазону температур евтектоїдного перетворення. В свою чергу, температура 733,6 °C відповідає точкам  $S'$  ( $P'$ ) діаграми стану рівноваги хімічно чистого Fe-C сплаву (див. пункт 3.2) та близька точці Кюрі (738 °C). Температура 886,5 °C відповідає точці  $G$  (922,5 °C) та свідчить про трансформації в кристалічній ґратці від

об'ємноцентрованої кубічної ґратки до ґранецентрованої кубічної ґратки. Температурний інтервал від 1158,7 °C до 1195,3 °C ілюструє евтектичне перетворення, наявність значної частини рідкої фази в розчині та відповідає точкам E' та C' (1153 °C) відповідно.

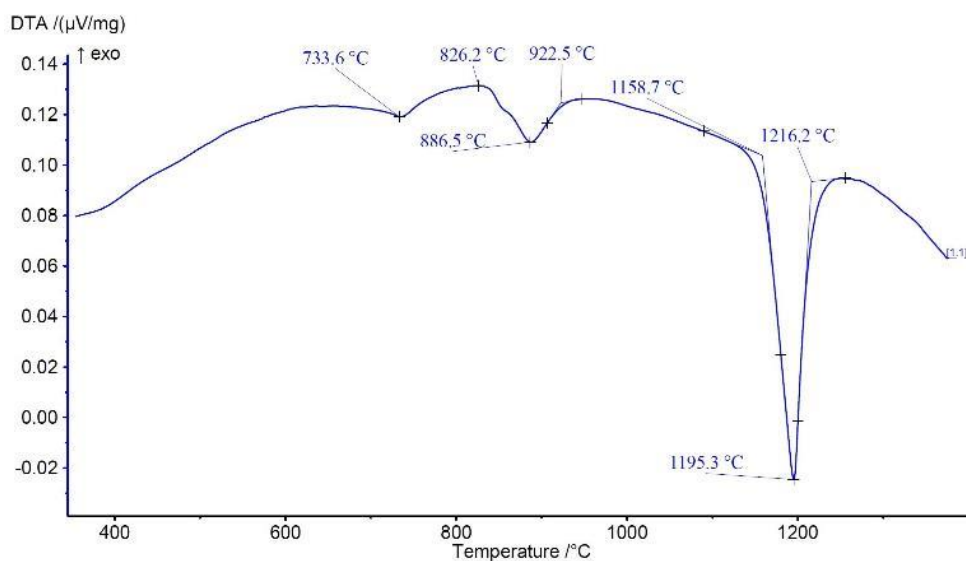


Рисунок 3.2 – Диференційно-термічний аналіз зразків чавуну 310СМ після нагрівання

Обов'язково, під час порівняння та аналізу враховуємо, що значення критичних температур системи Fe-C характеризують хімічно чистий сплав (див. рис. 3.1), а в досліджуваному – зміщення критичних точок зумовлено впливом основних (Fe, C, P, S, Mn, Si, H, N, O) та легувальних елементів (Cr, Ni, Al, Cu, Ti, Mo тощо). Легувальні елементи змінюють не лише параметри фазових рівноваг, а й склад сплаву за рахунок утворення нових фаз [112, 114]. Навіть в невеликих концентраціях домішки зміщують координати точок та лінії діаграми. Наприклад, Si, Mn, Ni зменшують значення критичних точок E' та S', а значення температури точки C' навпаки зростає [112, 114].

### 3.2.2 Дослідження чавуну 350СМХАН методом ДТА

Аналогічно попередньому матеріалу було проведено ДТА матеріалу 350СМХАН (рис. 3.3). Встановлено, що початок фазових перетворень відбувається за температури від 719,4 °С до температури 788,1 °С, яка відповідає точці Кюрі стану рівноваг хімічно чистого Fe-C сплаву. Температурний інтервал від 820 °С до 910,2 °С з піком за 843,6 °С свідчить про фазові зміни, що можна співставити з процесами в точці G (922,5 °С) чистого Fe-C сплаву.

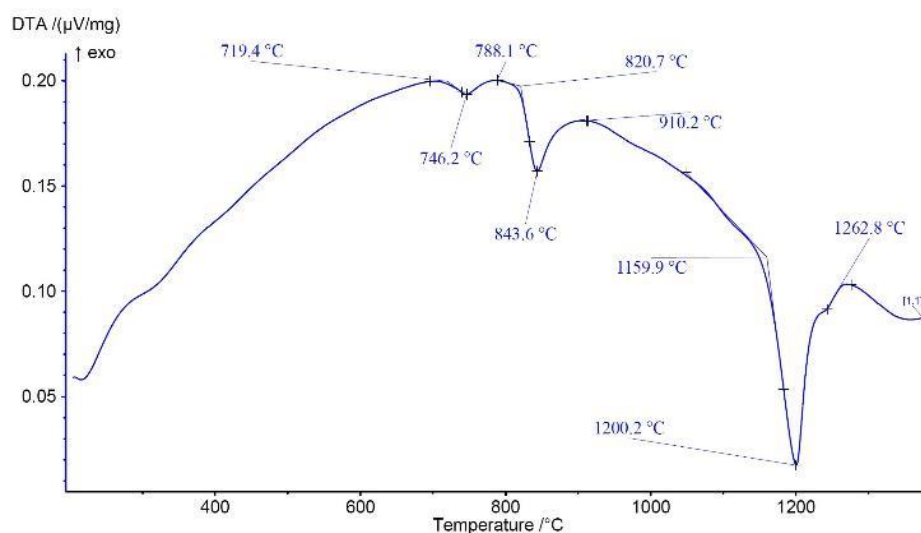


Рисунок 3.3 – Диференційно-термічний аналіз матеріалу 350СМХАН після нагрівання

Температура 1159,9 °С вказує на початок евтектичного перетворення, перехід до рідкої фази розплаву та відповідає точкам E' та C' (1153 °С) системи Fe-C. В даному дослідному матеріалі зміщення точок зумовлено застосуванням значно більшої кількості легувальних елементів, а саме Mo, Cr, Ni, Al та Cu, Ti.

З огляду на отримані результати, можна стверджувати, що кількість підібраних легувальних елементів в чавуні 350СМХАН не знижують температурний діапазон ектектійного перетворення, а матеріал витримує умови експлуатації без суттєвих фазових трансформацій.

### 3.2.3 Дослідження чавуну В.З. методом ДТА

Для підтвердження того, що температури фазових перетворень в дослідних матеріалах 310СМ та 350СМХАН достатні, щоб працювати в температурах експлуатації форми, було проведено ДТА зразка чавуну В.З. (рис. 3.4).

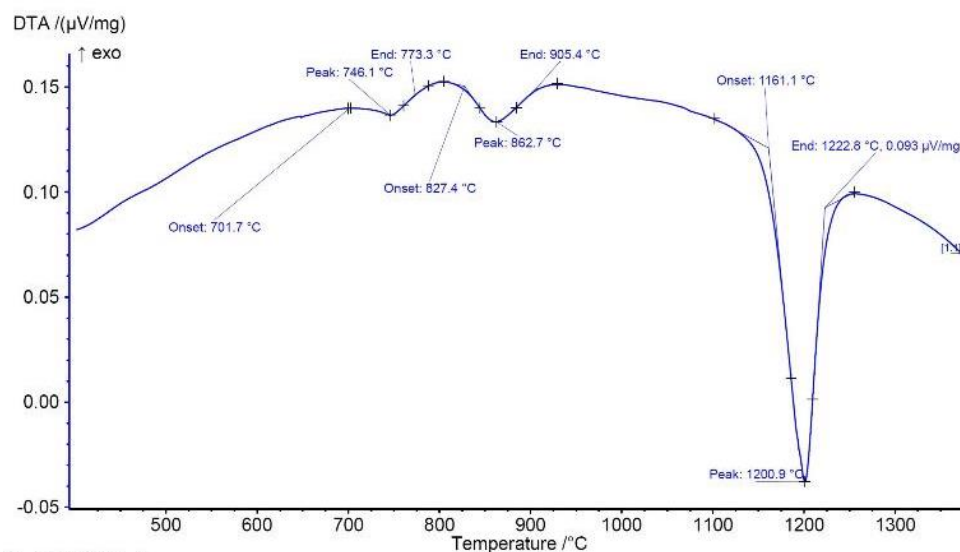


Рисунок 3.4 – Диференційно-термічний аналіз чавуну В.З. після нагрівання

Визначено, що в чавуні з В.З. початок фазових перетворень відбувається за температури 701,7 °С до 773,3 °С, а наступні зміни в інтервалі від 827,4 °С до 905,4 °С з вираженим піком при 862,7 °С свідчать про зміни кристалічної ґратки. Температурний інтервал від 1161,1 °С до 1222,8 °С з піком в 1200,8 °С вказує на проходження евтектичного перетворення та появу рідкої фази розплаву.

Температура початку фазового перетворення для чавуну В.З. становить 701,7 °С, а для чавунів 310СМ та 350СМХАН – відповідно 733,6 °С і 719,4 °С. Таким чином чавуни 310СМ і 350СМХАН мають вищі температури початку фазових перетворень порівняно з чавуном В.З.. Це свідчить про більшу термостійкість досліджуваних чавунів 310СМ та 350СМХАН. Завдяки цьому, при використанні чавунів 310СМ та 350СМХАН для виготовлення форм (деталей формокомплекту склотарного оснащення), можна очікувати зменшення відбракування через дефекти,

спричинені високотемпературним впливом та структурними змінами в матеріалі (викришування включень, окиснення, тріщини тощо).

### **3.3 Результати дослідження жаростійкості дослідних зразків чавунів**

Деталі формокомплекту працюють в умовах високих температур, піддаються газовій корозії, тому доцільним є проведення досліджень жаростійкості зразків з дослідних чавунів 310СМ, 350СМХАН та зразків чавуну з відпрацьованої форми. Для цього керувалися твердженнями наукових робіт, які вказані в підрозділі 1.12.

Жаростійкість, яку поділяють на окалиностійкість, ростостійкість та термостійкість [65, 66], є одним з найважливіших властивостей деталей формокомплекту. Оскільки, під час експлуатації форма піддається не лише знакозмінним циклічним навантаженням, а й агресивному впливу скломатеріалу, тому температури випробувань на жаростійкість дослідних чавунів були підвищені вдвічі, порівняно з робочими температурами. Такий підхід дозволив більш точно оцінити поведінку матеріалів в умовах циклічного температурного впливу.

#### **3.3.1 Дослідження окалиностійкості дослідних зразків**

За методикою, вказаною в пункті 2.7.4, проведено дослідження на окалиностійкість матеріалів, а зовнішній вигляд зразків після витримування за високих температур представлено на рисунку 3.5.

У результаті проведених досліджень встановлено, що зміна маси зразків має лінійну залежність. Ця закономірність зумовлена утворенням і затримкою окалини на поверхні зразків, що виникає через незначну різницю коефіцієнтів термічного розширення між окалиною та матеріалом основи [58]. Отримані дані відображено на гістограмі зміни питомої маси зразків після витримування за температури  $1000 \pm 20$  °С впродовж 30 год та 50 год (рис. 3.6).

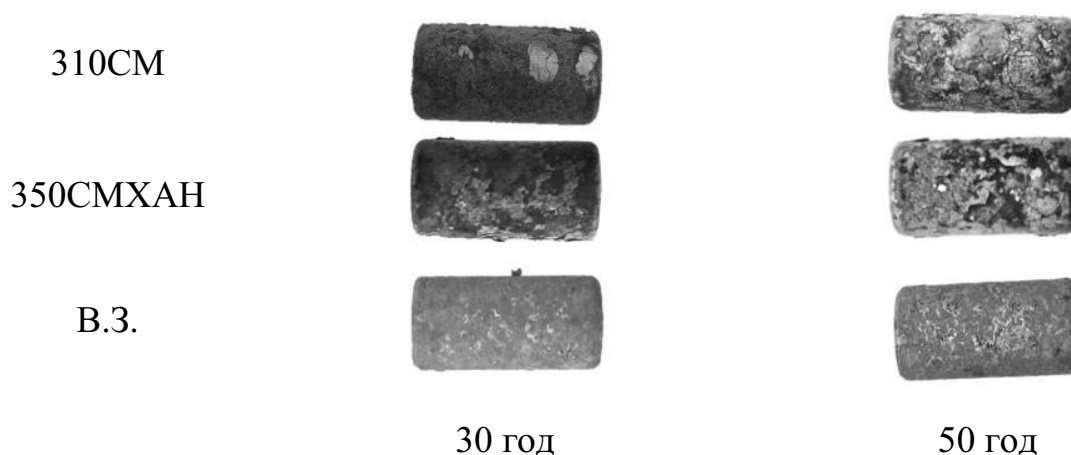


Рисунок 3.5 – Зовнішній вигляд зразків із чавунів 310СМ, 350СМХАН та В.З. після витримування на окисністійкість через 30 год та 50 год

За результатами розрахунків зміни питомої маси зразків встановлено, що після максимальних 50 год показник знаходиться на рівні  $1,60 \text{ кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{год})$  для зразків із чавуну 310СМ та  $1,64 \text{ кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{год})$  – для 350СМХАН. Отримані показники окисністійкості дослідних чавунів знаходяться на достатньому рівні, оскільки, зміна питомої маси чавунного зразка з В.З. становить  $1,67 \text{ кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{год})$ .

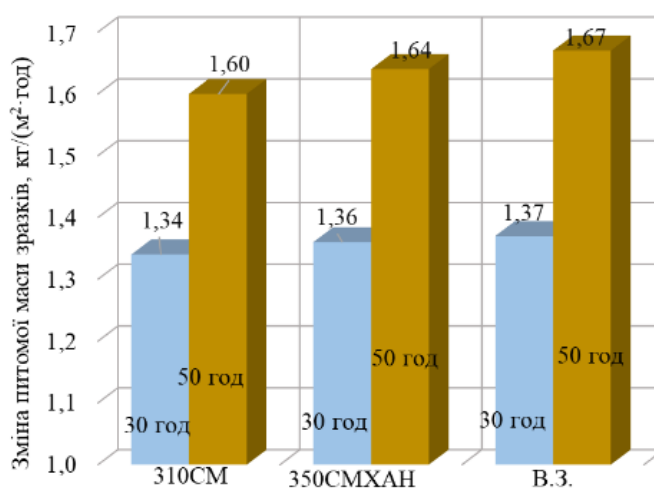
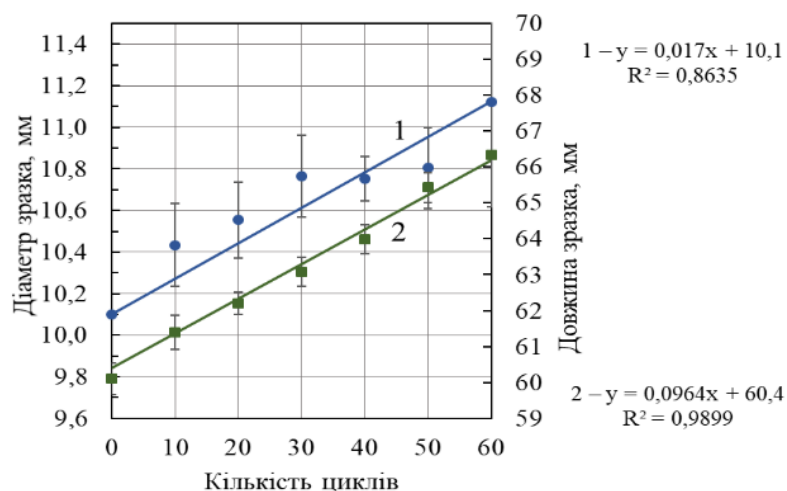


Рисунок 3.6 – Зміна питомої маси зразків із чавунів 310СМ, 350СМХАН та В.З. після витримування впродовж 30 год та 50 год

Отримані значення показників окислювостійкості дослідних чавунів 310СМ та 350СМХАН, свідчать про здатність матеріалів утворювати захисну плівку. Формування плівки зумовлено активністю легувальних елементів (Ni, Al, Cr, Ti, Si, Mo), про що також вказано у роботах [65, 66]. Згідно з [58, 61, 115], мінімальні показники зміни питомої маси матеріалу зразків, можна пояснити наявністю самопасивуючих плівок, які стійкі до впливу навколишнього середовища та міцно зчеплені з основним металом. Такі властивості формують позитивні характеристики окислювостійкості дослідних матеріалів за умов впливу високих температур експлуатації.

### 3.3.2 Дослідження ростостійкості та термостійкості зразків

Одним із факторів руйнування матеріалів за високих температур є термічні напруження, які призводять до незворотних структурних змін та тріщин. Пластична деформація, яка супроводжує ці процеси, зменшує довговічність та прискорює руйнування. У результаті дослідження дії циклічного нагрівання та охолодження на зміну габаритних розмірів зразків чавуну з В.З., встановлено лінійний взаємозв'язок цих параметрів (рис. 3.7).



1 – зміна діаметру зразка; 2 – зміна довжини зразка

Рисунок 3.7 – Зміни розмірів зразків із чавуну з В.З. після термоциклування



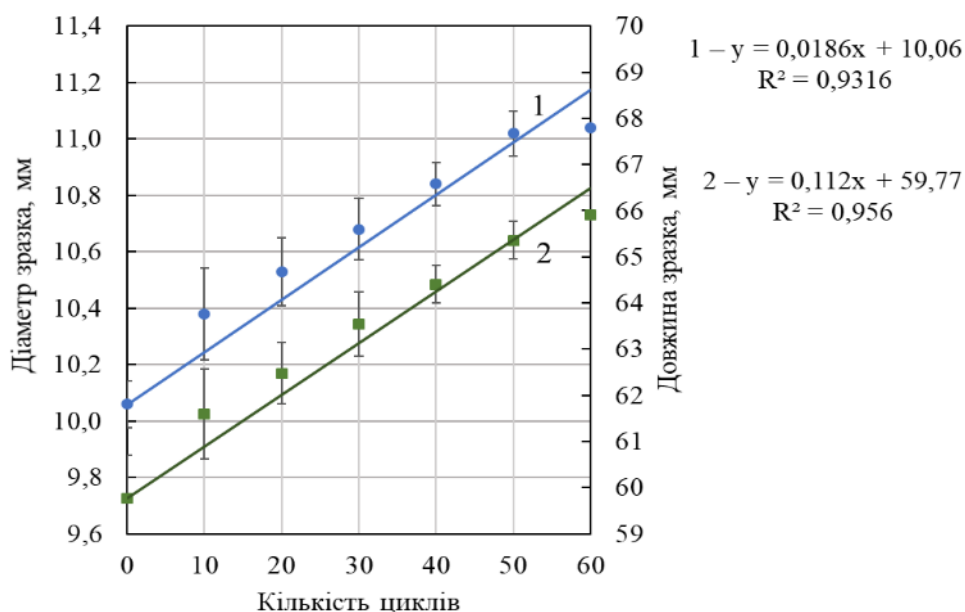
Після 60-ти циклів випробувань отримані наступні максимальні збільшення габаритних розмірів зразків: діаметр на 1 мм (на 10,1 %), довжина на 6,2 мм (на 10,4 %). У результаті дослідження встановлено, що під час циклічних випробувань нагрівання-охолодження перші тріщини у зразках чавуну В.З. з'явилися на 17-му циклі випробувань, а їх повне руйнування відбулося на 55-му циклі. Встановлено, що хоч показники ростостійкості чавуну В.З. змінюються лінійно, однак збільшення розмірів є значним, що негативно впливає на експлуатаційні характеристики матеріалу.

У результаті дослідження встановлено, що циклічні нагрівання-охолодження на зразки чавуну 310СМ спричинили появу тріщин на поверхні зразків, що зумовлено утворенням внутрішніх напружень (рис. 3.8).



Рисунок 3.8 – Зовнішній вигляд зразка із чавуну 310СМ після циклічних випробувань від 10 циклів до 60 циклів

За результатами оброблення експериментальних даних та побудови графічних залежностей, встановлено, що габаритні розміри зразків із чавуну 310СМ під час випробувань змінювалися лінійно (рис. 3.9).



1 – зміна діаметру зразка; 2 – зміна довжини зразка

Рисунок 3.9 – Зміни розмірів зразків із чавуну 310СМ після термоцикування

Після 60-ти циклів габаритні розміри зразків чавуну 310СМ змінилися наступним чином: максимальне збільшення діаметру на 0,9 мм (на 8,9 %), максимальне збільшення довжини – на 6,1 мм (на 10,2 %). Лінійний взаємозв'язок показників зміни розмірів зразків та кількості циклічних випробувань дозволяє стверджувати, що під час нагрівання-охолодження в зразках відсутні різкі фазові зміни та наявні поступові процеси перетворення.

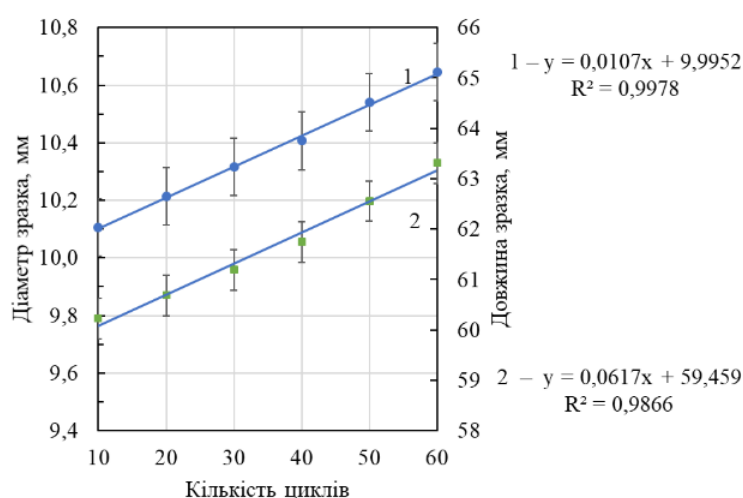
У зразках із чавуну 310СМ появу перших тріщин на поверхні спостерігали на 15-му циклі випробування, а повне руйнування зразків на 58-му. Наявність тріщин внаслідок термічної втоми, за відносно невеликої кількості циклів випробувань, зумовлено розмірами утворених структурних складових та підвищеною температурою випробувань. Утворення тріщин відбувається на межі зерен матриці та на межі поділу фаз, а також залежить від перерозподілу графіту та його морфології [67].

Встановлено, що після циклічних випробувань нагрівання-охолодження на поверхні зразків чавуну 350СМХАН утворилася поверхнева сітка розгару (рис. 3.10).



Рисунок 3.10 – Зовнішній вигляд зразка із чавуну 350СМХАН після циклічних випробувань від 10 циклів до 60 циклів

У результаті дослідження встановлено, що зразки з чавуну 350СМХАН під час термоциклування, демонструють лінійну залежність зміни розмірів від кількості циклів (рис. 3.11). При цьому, діаметр максимально збільшився на 0,6 мм (на 6,1 %), а довжина максимально – на 3,5 мм (на 5,5 %). Причини лінійної зміни розмірів зразків із досліджуваного чавуну 350СМХАН аналогічні причинам росту зразків з чавуну 310СМ.

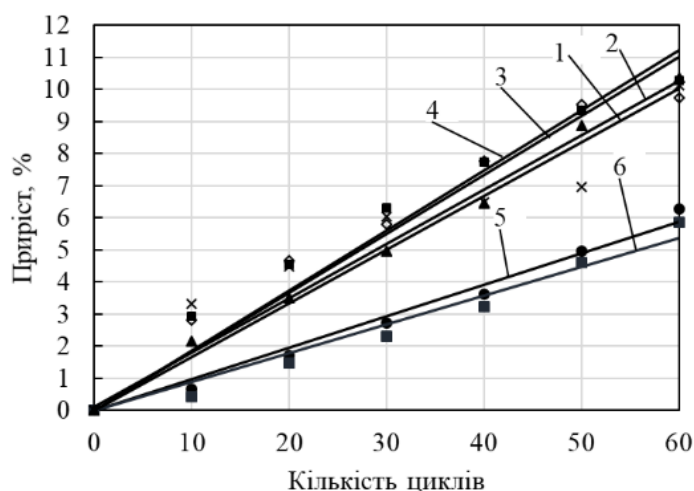


1 – зміна діаметру зразка; 2 – зміна довжини зразка

Рисунок 3.11 – Зміни розмірів зразків із чавуну 350СМХАН під час термоциклування залежно від кількості циклів

Появу перших тріщин на поверхні зразків із матеріалу 350СМХАН спостерігали після 41-го циклу випробувань, а руйнування зразків – на 60-му циклі, що свідчить про наявність більш стійкої структури матеріалу до утворення термічних тріщин. Відповідно до [63, 65-67], дані показники термостійкості зумовлені відсутністю великих зерен та карбідів, які впливають на утворення внутрішніх трансформацій на міжфазних межах. Це також пояснюється наявністю більшої кількості легувальних елементів в чавуні 350СМХАН – Si, Al, Cr, Ni, Ti, Mo, які сприяють подрібненню розмірів структурних складових.

Динаміку зміни приросту розмірів зразків досліджуваних чавунів 310СМ та 350СМХАН і чавуну В.З. після термічного циклічного випробування наведено на рисунку 3.12. Згідно з [58], розміри зразків збільшуються зі зростанням кількості та температури випробувань, особливо під час багатократного проходження через критичний температурний інтервал фазових перетворень. Приріст розмірів має лінійну залежність, що демонструє поступові перетворення та відсутність динамічних змін у структурі матеріалів під впливом циклічних термічних навантажень.



1 – приріст діаметру зразка із В.З.; 2 – приріст довжини зразка із В.З.; 3 – приріст діаметру зразка із 310СМ; 4 – приріст довжини зразка із 310СМ; 5 – приріст діаметру зразка із 350СМХАН; 6 – приріст довжини зразка із 350СМХАН

Рисунок 3.12 – Динаміка зміни середнього приросту розмірів зразків із досліджуваних чавунів після термоцикування

Як стверджує [58], проникнення окиснювальних газів під час дії високої температури відбувається вздовж графітових включень, це відповідно впливає на зміну об'єму чавунних деталей. Згідно з [58], максимального ефекту протидії росту можна досягнути шляхом повного виключення процесів графітизації та фазових перетворень. Це можливо внаслідок забезпечення стабільної структури та регулювання температури початку фазових перетворень матеріалу залежно від температури експлуатації деталі. Також, дослідники [63, 67] стверджують, що морфологія та кількість графітових включень визначає поведінку та властивості матеріалу під дією високих температур, тому подрібнення їх розмірів та зміна форми вплине на покращення показників жаростійкості чавуну.

### **Висновки до розділу 3**

Підібрано хімічний склад дослідних низьколегованих чавунів 310СМ та 350СМХАН з урахуванням впливу легувальних елементів на критичні точки фазових перетворень та жаростійкість матеріалів. Основними легувальними елементами обрано: Si, Mo, Cr, Al, Ni.

За результатами проведення ДТА встановлено, що температури початку евтектоїдного перетворення у дослідних чавунах вищі, ніж у чавуні В.З.. Фазові перетворення дослідного чавуну 310СМ починаються за температури 733,6 °С, а чавуну 350СМХАН – 719,4 °С, що на 31,9 °С та 17,7 °С перевищують значення зразків із В.З. – 701,7 °С. Такі значення свідчать, що дослідні матеріали 310СМ та 350СМХАН мають вищі температури початку фазових перетворень ніж чавун з В.З.. Тому чавунам 310СМ та 350СМХАН властивий більший період експлуатації без структурних трансформацій та утворення внутрішніх і зовнішніх деформацій внаслідок дії температурних впливів.

Встановлено, що після 50 год витримування за температури 1000±20 °С окалиностійкість дослідних чавунів 310СМ та 350СМХАН становить відповідно 1,60 кг / (м<sup>2</sup> · год) та 1,64 кг / (м<sup>2</sup> · год). При цьому окалиностійкість чавуну з В.З. становить 1,67 кг / (м<sup>2</sup> · год). Отже, чавуни 310СМ та 350СМХАН продемонстрували

вищу окислювальність на 4,2 % та 1,8 % відповідно, порівняно з чавуном В.З.. Такі значення свідчать про підвищену стійкість чавунів 310СМ та 350СМХАН до окислення в умовах високих температур.

Встановлено, що ріст зразків з чавунів 310СМ та 350СМХАН зі збільшенням кількості циклів нагрівання-охолодження (за температури  $1000 \pm 20$  °С та охолодження за  $25 \pm 3$  °С) змінюється лінійно. За 60 циклів відносний приріст діаметра зразків 310СМ становить 9,7 %, зразків 350СМХАН – 6,3 %, а зразків з чавуну В.З. – 10,1 %. При цьому, відносний приріст довжини зразків із 310СМ становить 10,2 %, зразків із 350СМХАН – 5,8 %, а зразків чавуну з В.З. – 10,4 %.

Встановлено, що після 60-ти циклів випробовувань на ростостійкість визначено, що зміни геометричних розмірів зразків чавуну 310СМ на рівні зразків чавуну В.З., а показники чавуну 350СМХАН вдвічі менші порівняно з показниками В.З..

За термостійкістю після 60 циклів нагрівання-охолодження чавуни 310СМ (руйнування на 58-му циклі) та 350СМХАН (руйнування на 60-му циклі) знаходяться на рівні В.З. (руйнування на 55-му циклі).

З огляду на результати чавунам 310СМ та 350СМХАН властива підвищена стійкість до утворення окалини, внутрішніх і зовнішніх деформацій в умовах впливу циклічного температурного навантаження.

#### 4 ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ ОТРИМАННЯ ЧАВУННИХ ВИЛИВКІВ З ГРАДІЄНТНОЮ СТРУКТУРОЮ ТА ВЛАСТИВОСТЯМИ

З метою отримання необхідної феритної матриці чавунних заготовок у литому стані, градієнтної структури та направленості росту графіту розроблено та досліджено чотири технологічні варіанти (див. підрозділ 2.4) виготовлення виливків з дослідних чавунів 310СМ та 350СМХАН. З метою дослідження властивостей за перерізом отриманих виливків вирізано зразки (див. підрозділи 2.4 та 2.5). Відповідно до зміни параметру в технології кожному зразку надано номер цифровим та літерним позначенням залежно від чавуну (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Класифікація дослідних зразків залежно від технологічного варіанту оброблення розплаву

Найменування технологічного варіанту (схема)	Характеристика технологічного варіанту	Найменування чавуну	
		310СМ	350СМХАН
		Номер зразка	
перший (рис. 2.2, а)	поверхнєве оброблення розплаву силікобарієвим інокулятором марки SB5, розміром фракцій 0,315 мм, 0,4 мм та 0,63 мм	1-А	1-Б
		2-А	2-Б
		3-А	3-Б
другий (рис. 2.2, б)	поверхнєве оброблення розплаву силікобарієвим інокулятором марки SB5, розміром фракції 0,315 мм із литтям на холодильники з СЧ200 товщинами 10 мм, 20 мм та 30 мм	1-В	1-Г
		2-В	2-Г
		3-В	3-Г
третій (рис. 2.3, а)	ковшове оброблення розплаву силікобарієвим інокулятором марки SB5 із литтям на холодильники з СЧ200 товщинами 10 мм, 20 мм та 30 мм	1-Д	1-Е
		2-Д	2-Е
		3-Д	3-Е
четвертий (рис. 2.3, б)	комбіноване (поступове) оброблення: ковшове оброблення силікобарієвим інокулятором марки SB5 та внутрішньоформове оброблення магнієвмісним модифікатором марки VL63(М) розплаву чавуну із литтям на холодильники з СЧ200 товщинами 10 мм, 20 мм та 30 мм	1-Є	1-Ж
		2-Є	2-Ж
		3-Є	3-Ж

#### **4.1 Перший технологічний варіант – поверхневе оброблення розплаву чавуну інокулятором різної дисперсності**

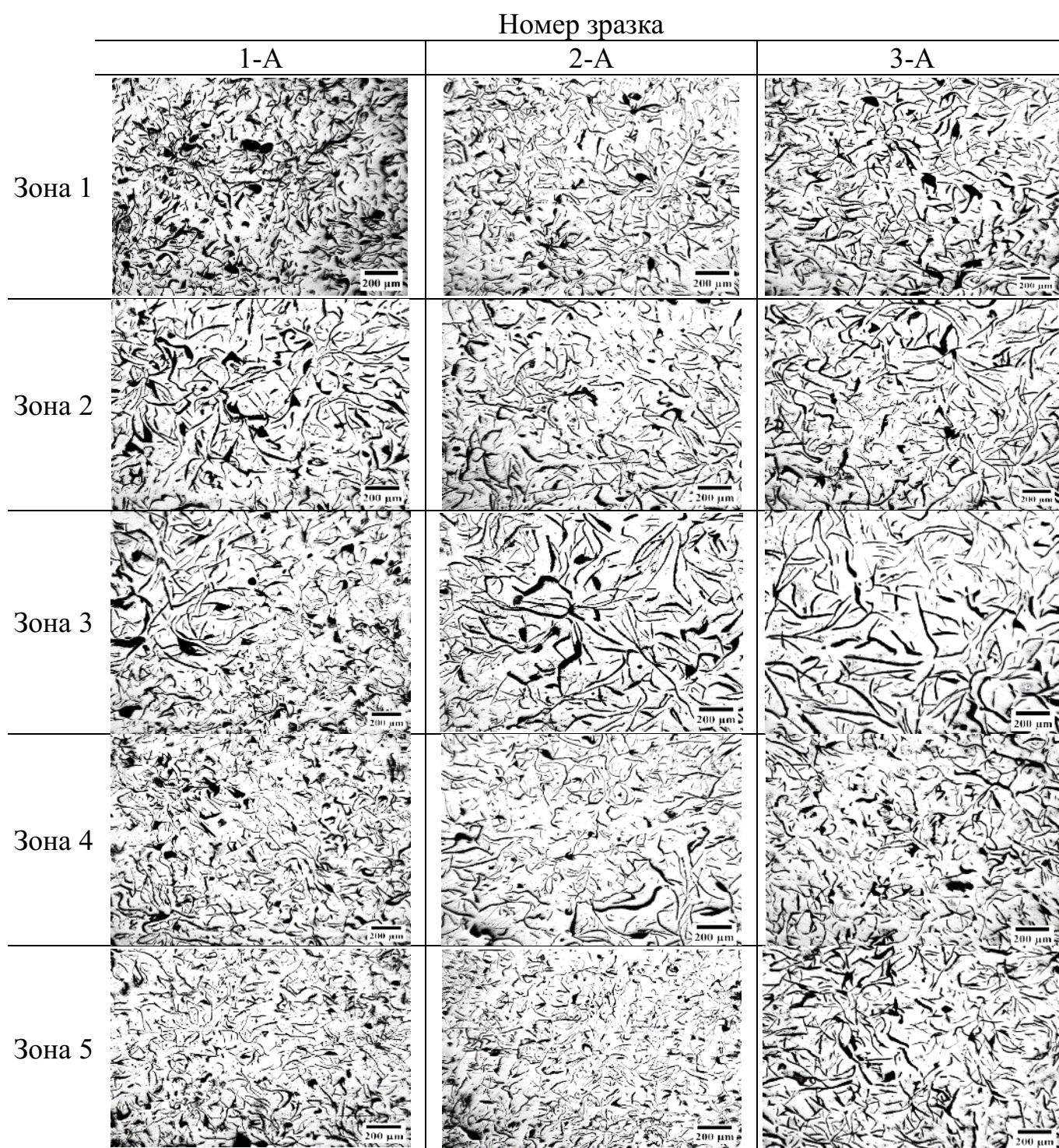
В першому технологічному варіанті (див. рис. 2.2, а) застосовано поверхневе оброблення інокулятором різної дисперсності з метою утворення у виливку поверхневого шару, що матиме відмінну від основної частини структуру металевої матриці та графітових включень. Інокулятором слугував силікобарій марки SB5, подрібнений до фракцій 0,315 мм, 0,4 мм та 0,63 мм. Вибір фракції базувався на результатах досліджень [79, 84, 85], кількість інокулятора становила 0,5 % від маси виливка. Вибір марки інокулятора SB5 ґрунтувався на тому, що до його складу, крім кремнію, входять сильні графітізуювальні елементи, такі як Ва, Са та Al, роль яких полягає у графітізуювальній дії, створенні додаткових центрів кристалізації в розплаві, подрібненні графітових включень та зерен металевої матриці.

##### **4.1.1 Властивості виливків із чавуну 310СМ**

У результаті металографічного дослідження зображень за перерізом зразків чавунних виливків із сплаву 310СМ встановлено зміну структури та морфології графітових включень (рис. 4.1). Це дозволяє визначити вплив інокулятора різних фракцій на формування мікроструктури, яка характеризується складом металевої матриці та параметрами графітної фази (розміри графітових включень та площа, яку вони займають).

Аналіз металографічних зображень зразків, за допомогою візуального аналізування згідно до [116], дозволяє зонально класифікувати включення пластинчастого графіту за формою як евтектичний пластинчатий графіт та за розподілом – як сукупність пластинчастого графіту, оточеного хаотично орієнтованими меншими графітовими пластинками (табл. 4.2).





1-А – фракція 0,315 мм; 2-А – фракція 0,4 мм; 3-А – фракція 0,63 мм

Рисунок 4.1 – Металографічні зображення за зональним перерізом зразків із чавуну 310СМ, які виготовлені за першим технологічним варіантом

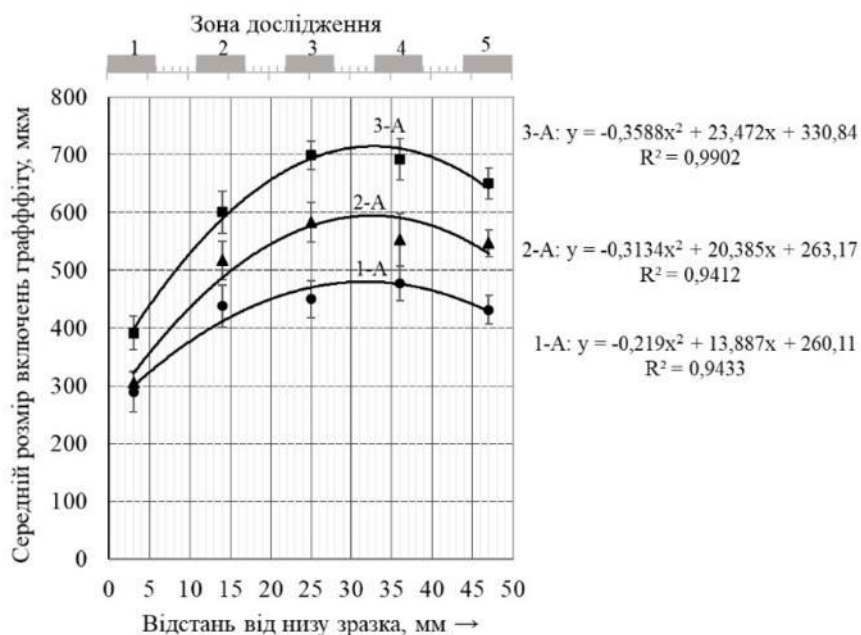
Таблиця 4.2 – Класифікація графітових включень за зональним перерізом зразків із чавуну 310СМ, які виготовлені за першим технологічним варіантом

№ зразка	Фракція інокулятора, мм	Класифікація графіту за переважною ознакою					
		ознака класифікації	зона				
			1	2	3	4	5
1-А	0,315	тип за формою	I	I	I	I	I
		тип за розподілом	A	A	C'	A	A
2-А	0,4	тип за формою	I	I	I	I	I
		тип за розподілом	A	A	C	C	C'
3-А	0,63	тип за формою	I	I	I	I	I
		тип за розподілом	A	A	C	C'	C'

У результаті аналізу графітових включень за перерізом зразків (див. рис. 4.1), спостерігаємо зміну середніх розмірів графітових включень (рис. 4.2). Розміри включень поступово зростають за перерізом зразків, а саме від місця контакту розплаву з інокулятором зони 4. За перерізом зразків (1-А, 2-А, 3-А), середнє значення розмірів графітових включень зростає від 290 мкм до 390 мкм в зоні 1 та досягає значень від 477 мкм до 700 мкм в зонах 3 та 4. У зоні 5 спостерігаємо зменшення розмірів графіту від 432 мкм до 650 мкм, порівняно із зонами 3 та 4. Таке зменшення обумовлене контактом розплаву чавуну з верхньою напівформою, де відбувається інтенсивніше охолодження порівняно з центральною частиною виливка.

Швидке охолодження призводить до прискорення кристалізації внаслідок інтенсивнішого тепловідведення та, як наслідок, до утворення дрібніших структурних складових виливка. Встановлено, що зразку 1-А, який отримано із використанням інокулятора фракції 0,315 мм властиві найдрібніші включення графіту, які зростають від місця контакту з інокулятором. В зоні 1 спостерігаємо найдрібніші включення розмірами 290 мкм, які поступово зростають до 477 мкм у зоні 4. В зоні 5 спостерігаємо незначне зменшення розмірів включень графіту до 432 мкм, яке зумовлене вищеописаним впливом верхньої напівформи.





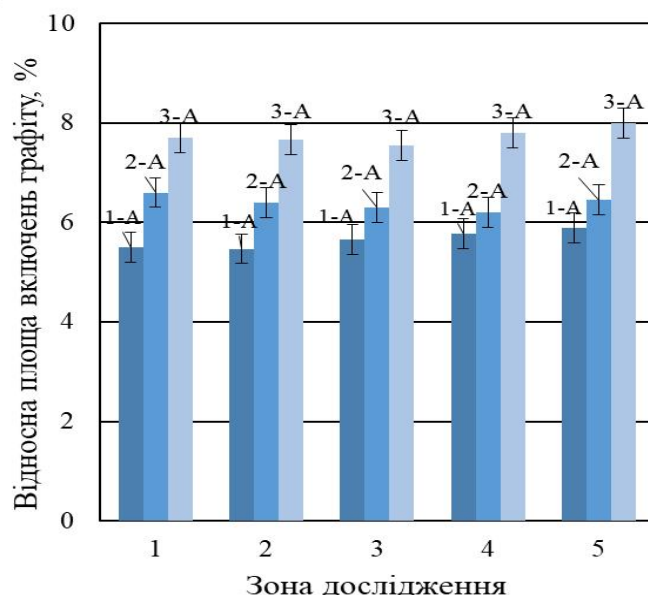
1-А – фракція 0,315 мм; 2-А – фракція 0,4 мм; 3-А – фракція 0,63 мм

Рисунок 4.2 – Середній розмір включень графіту за перерізом зразків матеріалу 310СМ, які виготовлені за першим технологічним варіантом

Застосування інокулятора 0,315 мм сприяє утворенню дрібнодисперсних графітових включень, які підвищують механічні властивості матеріалу під час впливу термомеханічних ударів. Взаємодія рідкого чавуну з інокулятором 0,315 мм підтверджується дослідженнями [84, 97], які пояснюють цей механізм наступним чином: відбувається проникнення розплаву чавуну в пори покриття, яке нагрівається до температури плавлення, після чого шар інокулятора розплавляється, що призводить до початку повільних дифузійних процесів. Ці процеси впливають на взаємодію розплаву із елементами інокулятора та сприяють формуванню більш дрібнозернистої структури матеріалу, що позитивно впливає на його властивості.

Аналіз площ, яку займають графітові включення за перерізом зразків показав, що в зразках 1-А, які отримані за допомогою інокулятора фракції 0,315 мм, значення відносної площі зайнятої графітовими включеннями становить від 5,5 % до 5,9 % (рис. 4.3). Для зразків 2-А (інокулятор фракції 0,4 мм) відносна площа зайнята графітом становить в середньому 6,5 % із незначним зниженням до 6,2 % у центральних зонах зразків, що пов'язано з більш інтенсивною дією інокулятора.

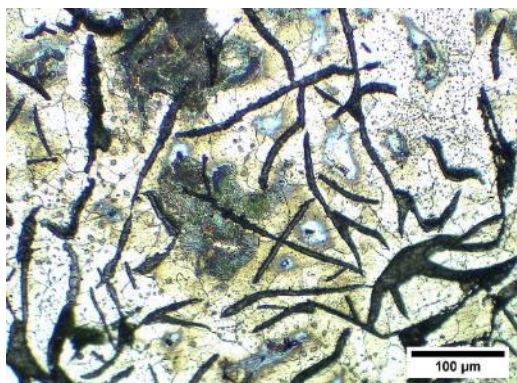
Найбільше значення площі графітових включень спостерігаємо у зразках 3-А – від 7,7 % до 8,0 %. Таке різке зростання можна пояснити появою іншої домінуючої структурної складової (перліту).



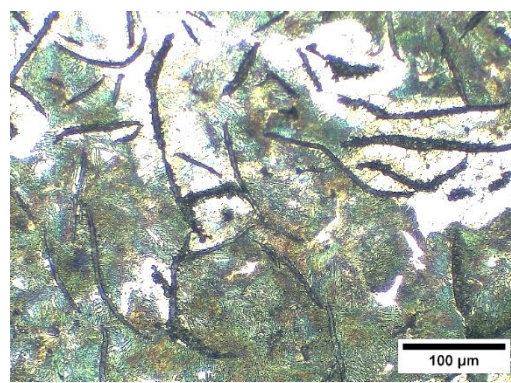
1-А – фракція 0,315 мм; 2-А – фракція 0,4 мм; 3-А – фракція 0,63 мм

Рисунок 4.3 – Відносна площа, зайнята включеннями графіту за перерізом зразків з чавуну 310СМ, які виготовлені за першим технологічним варіантом

У результаті металографічного дослідження за перерізом травлених зразків встановлено, що для металевої матриці, характерна наявність феритної та перлітної складової у литому стані. Кількість фериту зростає із збільшенням фракції інокулятора та доходить до 95 % у зразках 3-А, що узгоджується із даними відносної площі, зайнятої графітовими включеннями. При цьому слід зазначити, що збільшення частки фериту у зонах 1 та 2 зразків пов'язане із більш інтенсивною дією інокулятора в обмеженому шарі вилівка від поверхні нижньої напівформи (рис. 4.4).



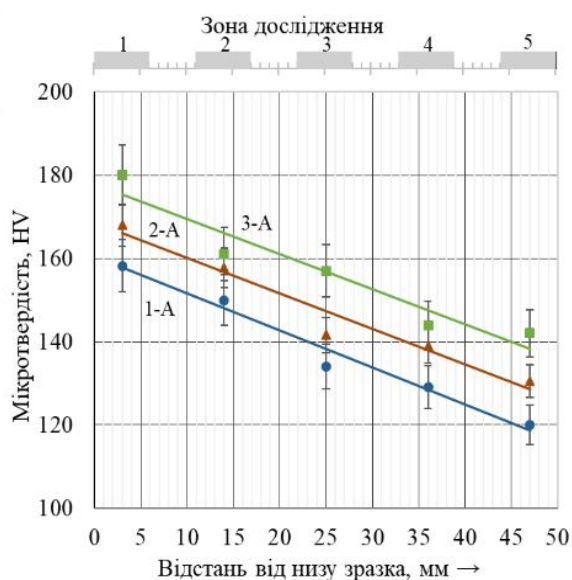
зона 1



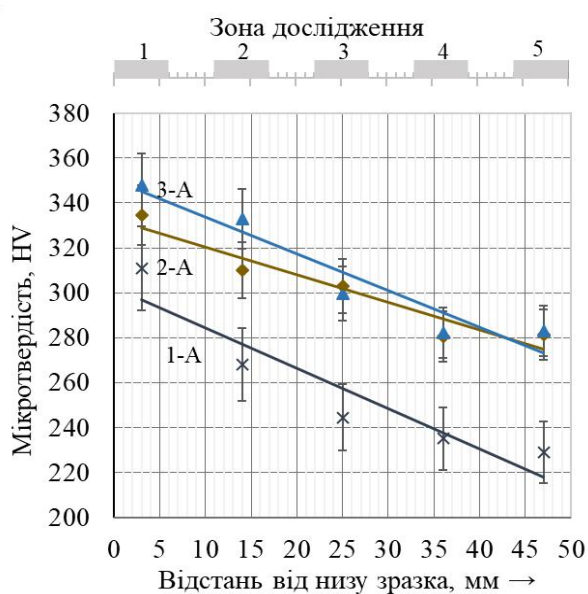
зона 3

Рисунок 4.4 – Металева матриця у різних зонах зразків із чавуну 310СМ, які виготовлені за першим технологічним варіантом

Проведені дослідження мікротвердості феритної складової металевої матриці свідчать про наявність легованого фериту із підвищеними механічними властивостями, що повинно сприятливо впливати на експлуатаційну стійкість виливка (рис. 4.5, а) та підтверджується роботами [59, 83].



а



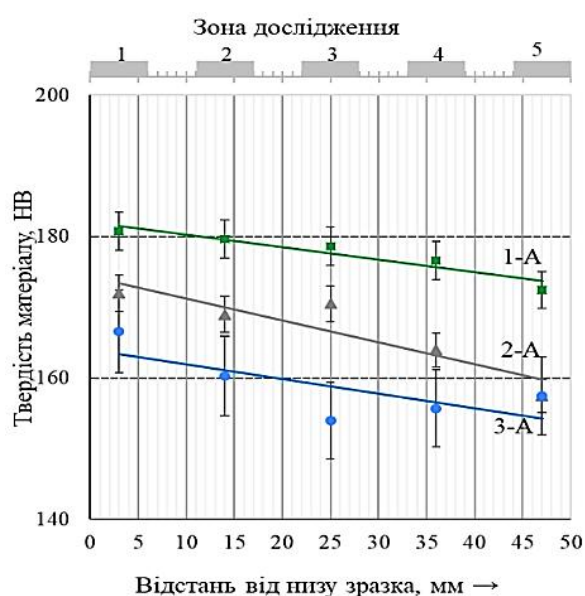
б

1-А – фракція 0,315 мм; 2-А – фракція 0,4 мм; 3-А – фракція 0,63 мм

Рисунок 4.5 – Мікротвердість фериту (а), перліту (б) зразків із чавуну 310СМ, які виготовлені за першим технологічним варіантом

Встановлено, що мікротвердість легованого фериту за перерізом зразків в зоні 1 змінюється в діапазоні від 158 HV до 180 HV, поступово знижується до зони 5 в діапазоні значень від 120 HV до 142 HV. Встановлені значення значно перевищують аналогічні показники для нелегованого фериту у конструкційних чавунах. Окрім характеристик фериту, встановлено мікротвердість перлітної складової металевої матриці за перерізом зразків. Мікротвердість перліту в зоні 1 становить від 310 HV до 347 HV та зменшується до зони 5 в інтервалі від 230 HV до 283 HV (див. рис. 4.5, б). Підвищення мікротвердості фериту та перліту в зоні 1 зумовлене подрібненням зерна матриці. Утворення дрібнозернистої структури спричинене впливом інокулятора на утворення додаткових центрів кристалізації та дією шару інокулятора як тонкого холодильника на пришвидшення кристалізації розплаву [84]. Слід відзначити, що характер розподілу значень мікротвердості між окремими зразками обумовлено використанням інокулятора різної фракції та створенням різних умов кристалізації.

У процесі дослідження також проаналізовано твердість матеріалу за Брінеллем (рис. 4.6). Характер залежності значень твердості за перерізом вилівка для усіх зразків корелює із значеннями мікротвердості.



1-А – фракція 0,315 мм; 2-А – фракція 0,4 мм; 3-А – фракція 0,63 мм

Рисунок 4.6 – Твердість зразків із чавуну 310СМ, які виготовлені за першим технологічним варіантом

Твердість зразків за Брінеллем зменшується від зони 1 в інтервалі значень від 167 НВ до 181 НВ до зони 5 в інтервалі значень від 157 НВ до 173 НВ. Ці показники дещо більші (від 40 НВ до 50 НВ) рівня твердості чавунних заготовок провідних світових виробників [9, 11] внаслідок наявної більш твердої перлітної складової. При цьому, лише в досліджуваних зразках 3-А присутня переважаюча кількість легованого фериту, що забезпечує покращені властивості та позитивно впливає на термін служби матеріалу. В зразках 1-А та 2-А домінуючою є термодинамічно нестабільна перлітна складова, яка негативно впливає на експлуатацію в умовах циклічних термічних навантажень.

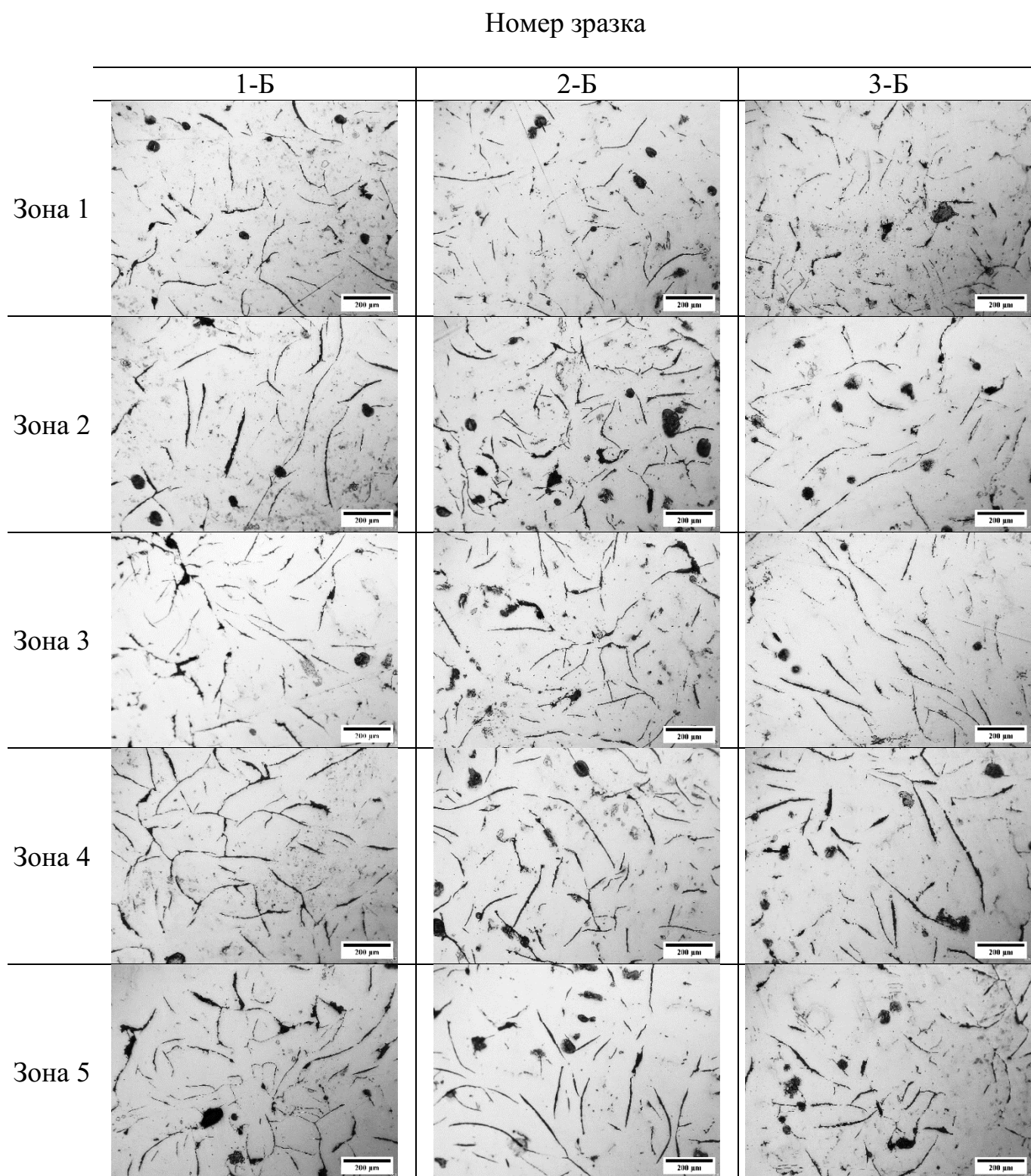
В свою чергу, формування властивостей в поверхневій зоні вилівка залежить не тільки від марки та фракції інокулятора, а також від хімічного складу дослідного чавуну, тому було визначено ефект поверхневого оброблення інокулятором дослідного чавуну 350СМХАН.

#### **4.1.2 Властивості виливків із чавуну 350СМХАН**

Аналогічно сплаву 310СМ результатом дослідження морфологічних змін графітових включень за допомогою аналізу металографічних зображень зразків з сплаву 350СМХАН (рис. 4.7) є встановлена зональна класифікація графітових включень за формою та розподілом.

Класифікація графіту аналогічна чавуну 310СМ – за формою пластинчатий графіт, а за розподілом – графіт рівномірний. Включення графіту можна охарактеризувати як сукупність пластинчатого графіту, який утворений з невеликим ступенем переохолодження, що поступово змінюється на евтектичний графіт у вигляді великих рівномірних пластинок (табл. 4.3).





1-Б – фракція 0,315 мм; 2-Б – фракція 0,4 мм; 3-Б – фракція 0,63 мм

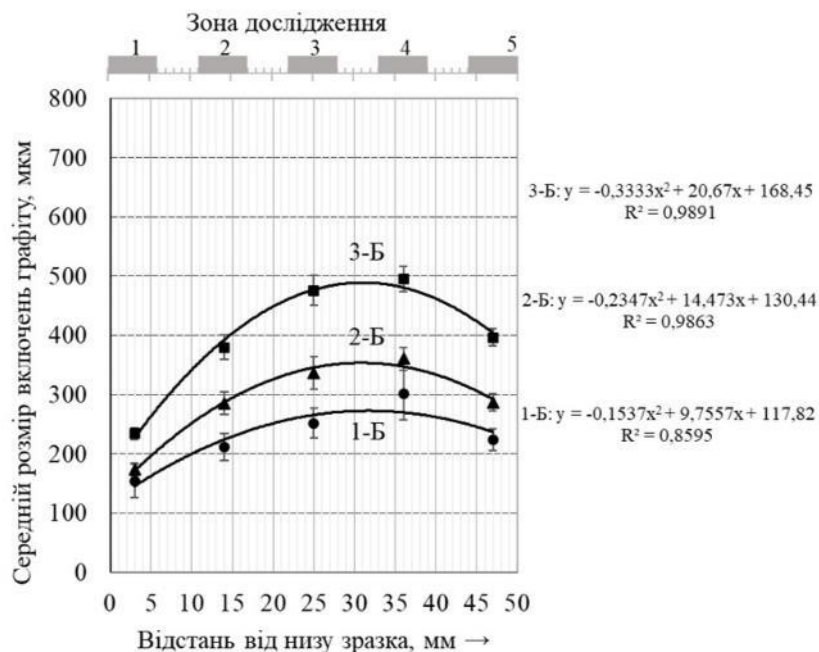
Рисунок 4.7 – Металографічні зображення за зональним перерізом зразків із чавуну 350СМХАН, які виготовлені за першим технологічним варіантом



Таблиця 4.3 – Класифікація графітових включень за перерізом виливків зі чавуну 350СМХАН, які виготовлені за першим технологічним варіантом

№ зразка	Фракція інокулятора, мм	Класифікація графіту за переважною ознакою					
		ознака класифікації	зона				
			1	2	3	4	5
1-Б	0,315	тип за формою	I	I	I	I	I
		тип за розподілом	A	A	C	C	C
2-Б	0,4	тип за формою	I	I	I	I	I
		тип за розподілом	A	A	C	C	C
3-Б	0,63	тип за формою	I	I	I	I	I
		тип за розподілом	A	A	C	C	C

Відповідно до зонального розподілення було визначено зміну середнього значення розмірів графітових включень (рис. 4.8), де спостерігаємо, що розміри включень в зоні 1 дослідних зразків знаходяться в діапазоні від 155 мкм до 244 мкм та від 223 мкм до 397 мкм в зоні 5.

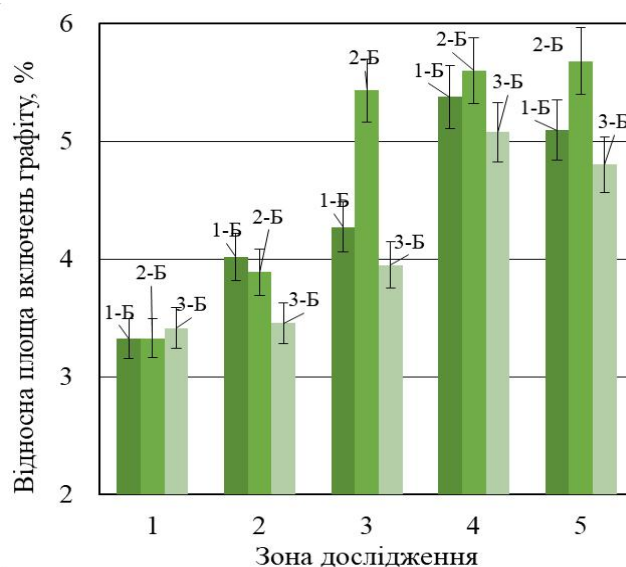


1-Б – фракція 0,315 мм; 2-Б – фракція 0,4 мм; 3-Б – фракція 0,63 мм

Рисунок 4.8 – Середній розмір включень графіту за перерізом зразків із чавуну 350СМХАН, які виготовлені за першим технологічним варіантом

Такий характер зміни в зоні 1 зумовлений впливом інокулятора і нижньої напівформи, а в зоні 5 впливом верхньої напівформи в процесі затвердіння. Відповідно, найбільші графітові включення, а саме від 300 мкм до 512 мкм, знаходяться в зоні 4 дослідних зразків. Порівняно із сплавом 310СМ, розміри графітових включень в зразках чавуну 350СМХАН в показових зонах мають менші значення. Наприклад для зони 1 середні розміри менші в діапазоні значень від 130 до 150 мкм, а для зон 3 та 4 досягає різниці в діапазоні від 240 мкм до 300 мкм. Таку відмінність у розмірах графітових включень, порівняно із зразками чавуну 310СМ, спричинено дією більшої кількості легувальних елементів в складі сплаву 350СМХАН, які впливають на подрібнення розмірів графіту і зерен металевої матриці. За твердженнями авторів [58, 63] такий характер впливу особливо притаманний для елементів Cr та Mo.

Аналогічно попередньому дослідженню встановлено площу, яку займають графітові включення за перерізом зразків, відповідно до застосованої фракції інокулятора (рис. 4.9).

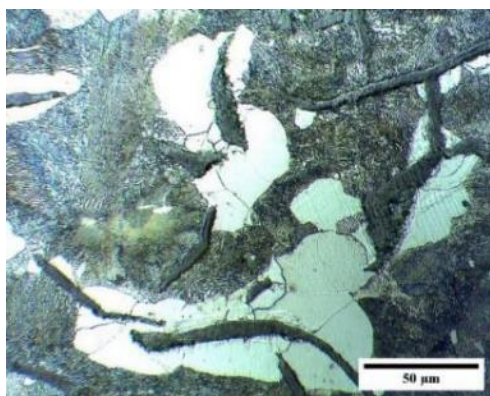


1 – фракція 0,315 мм; 2 – фракція 0,4 мм; 3 – фракція 0,63 мм

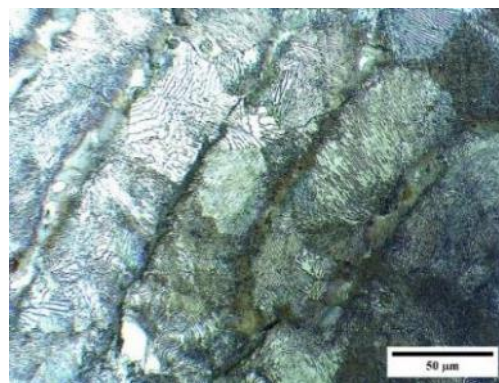
Рисунок 4.9 – Відносна площа, зайнята включеннями графіту в зразках із чавуну 350СМХАН, які виготовлені за першим технологічним варіантом

Визначено, що для всіх зразків, незалежно від фракції інокулятора, відносна площа зайнята графітом складає від 3,2 % до 4 %, що у 1,3-2,0 рази менше порівняно із значеннями чавуну 310СМ. Така зміна може бути пов'язана з тим, що, не зважаючи на підвищений вміст С, легувальні елементи в чавуні 350СМХАН гальмують процес графітізації та переважають над елементами, які цьому процесу сприяють. Також можна зробити висновок, що зміна розміру фракції інокулятора у дослідженому діапазоні не впливає на відносну площу зайняту графітом з вищенаведених причин.

У результаті металографічного дослідження травлених зразків встановлено, що для зразків чавуну 350СМХАН характерна яскраво виражена перлітно-феритна металева матриця з домінуючою перлітною складовою (рис. 4.10). Утворення феритної складової відбулося у вигляді оторочки навколо включень графіту.



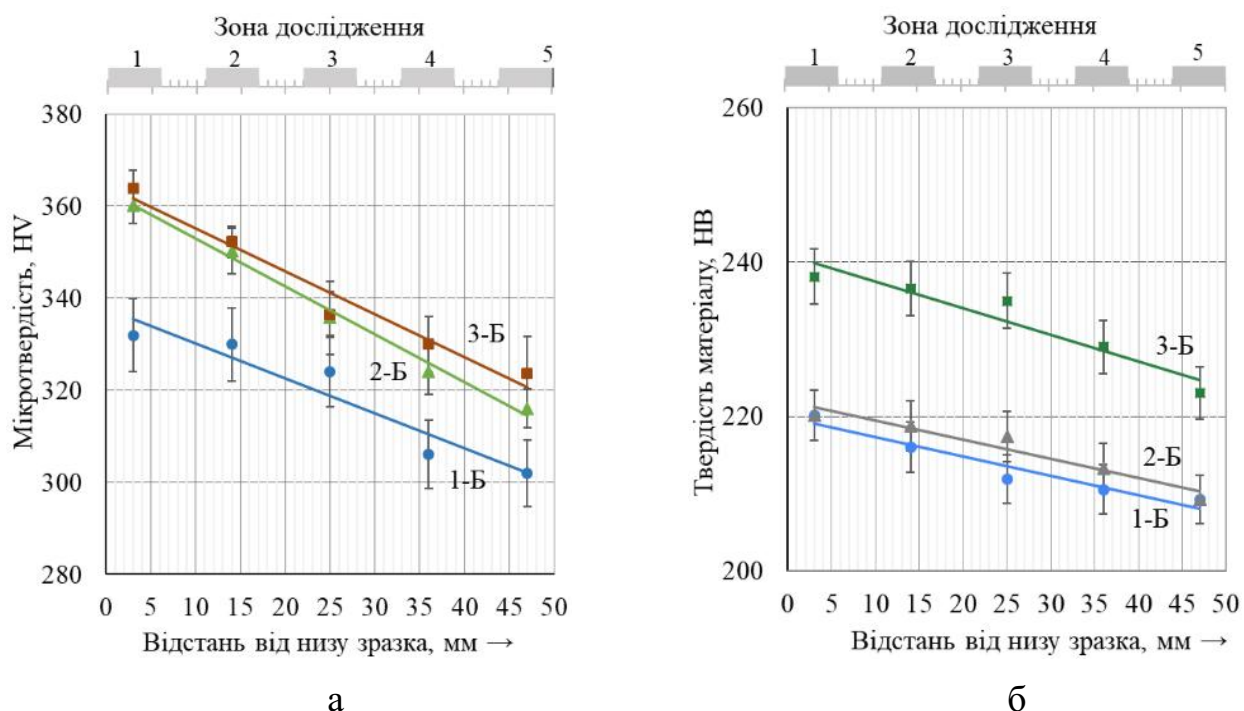
зона 1



зона 3

Рисунок 4.10 – Металева матриця у різних зонах зразків із чавуну 350СМХАН, які виготовлені за першим технологічним варіантом

Оскільки вміст фериту в металевій матриці мінімальний, було визначено мікротвердість перлітної складової. Значення мікротвердості перліту знаходяться в межах від 332 НВ до 365 НВ в зоні 1 та від 300 НВ до 324 НВ в зоні 5 (рис. 4.11, а). Твердість зразків чавуну 350СМХАН за Брінеллем є доволі стабільною в досліджуваних зонах, коливаючись від 220 НВ до 238 НВ в зоні 1 та від 210 НВ до 225 НВ в зоні 5 (рис. 4.11).



1-Б – фракція 0,315 мм; 2-Б – фракція 0,4 мм; 3-Б – фракція 0,63 мм

Рисунок 4.11 – Мікротвердість перліту металевої матриці (а) та твердість (б) зразків із чавуну 350СМХАН, які виготовлені за першим технологічним варіантом

Зауважимо, що в досліджуваних зразках наявна термодинамічно нестабільна перлітна складова, як і для сплаву 310СМ (див. пункт 4.1.1). Перліт у литому стані погіршує теплофізичні характеристики матеріалу внаслідок наявної карбідної складової, особливо в умовах впливу високої температури. При температурному впливі перліт розпадається на стабільні фази, що призводить до збільшення внутрішніх напружень та прискореного руйнування виробів. Розпад перліту відбувається за рахунок дифузії атомів С, які при підвищенні температури можуть перерозподілятися в структурі, утворюючи нові фази [112]. Збільшення вмісту феритної складової в структурі чавуну сприятиме підвищенню жаростійкості та зниженню коефіцієнта лінійного розширення. Також наявність феритної складової підвищує стійкість до термічних напружень, які виникають під час фазових перетворень  $\gamma \leftrightarrow \alpha$ , а стабілізація цієї структури сприяє високій термостійкості чавуну в умовах нагрівання-охолодження [65].

Використання інокулятора марки SB5, дозволило отримати дрібнодисперсні структурні складові, що має позитивний вплив на механічні характеристики, а також присутність феритної складової у випадку застосування для сплаву 310СМ. Максимальна дисперсність включень графіту характерна при використанні інокулятора фракції 0,315 мм, що є найсприятливішим для заданих потреб та підтверджується дослідженнями [84]. Процес взаємодії рідкого металу з шаром інокулятора спричинений проникненням його в пори та за умови збільшення металостатичного тиску над капілярним, нагріває шар до температури плавлення. Після чого, проходять уповільнені дифузійні процеси, оскільки шар інокулятора також виконує функцію тонкого холодильника. Крім того, хімічні елементи, які входять до складу інокулятора марки SB5, вплинули на утворення додаткових зародків для включень графітову, щільність та кількість мікрочастинок в структурі виливків. За твердженнями авторів [89, 117] це зумовлено ефектом продовженої дії самого барієвмісного інокулятора. Тому доцільно розглянути вплив інокулятора марки SB5 фракції 0,315 мм на формування властивостей у виливках з чавунів 310СМ, 310СМХАН за умов пришвидшення процесу кристалізації, використовуючи додаткові теплоакумулювальні елементи.

#### **4.2 Другий технологічний варіант – поверхневе оброблення розплаву чавуну інокулятором фракції 0,315 мм та застосування холодильників**

У другому технологічному варіанті (див. рис. 2.2, б) застосовано поверхневе оброблення розплаву інокулятором марки SB5, фракції 0,315 мм та лиття на теплоакумулювальні елементи в нижній порожнині ливарних форм у вигляді чавунних холодильників товщинами 10 мм, 20 мм та 30 мм. Застосовувані елементи технології ливарної форми згідно з [54, 78] підвищують швидкість та створюють умови направленої кристалізації чавуну, сприятимуть отриманню дрібнодисперсної структури у частині виливка, яка контактує із холодильником. Це позитивно вплине на механічні характеристики чавуну в поверхневій зоні.

#### 4.2.1 Властивості виливків із чавуну 310СМ

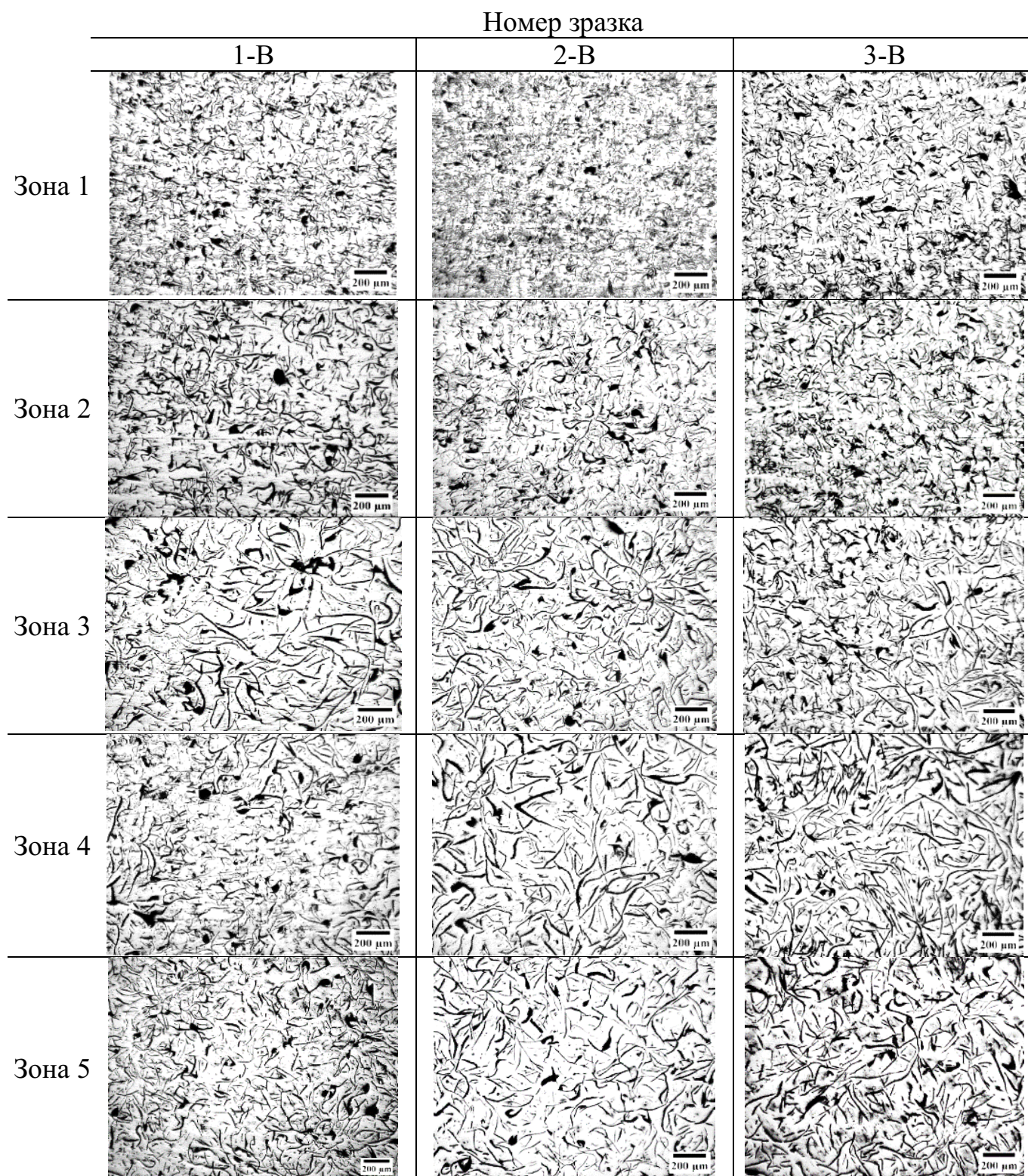
У результаті металографічного аналізу мікроструктури зразків (рис. 4.12) встановлено, що у всіх досліджених зразках чавуну 310СМ, отриманих за другим технологічним варіантом форма графітових включень пластинчаста. За формою включень графіту зразки аналогічні зразкам, які отримані за першим технологічним варіантом (див. підрозділ 4.1).

За розподілом пластинчасті графітові включення відмінні від першого технологічного варіанту (табл. 4.4). Згідно з [116], за розподілом включення графіту можна охарактеризувати як дрібнорозгалужені міждендритні, утворені внаслідок пришвидшеного охолодження, які змінюються на рівномірно розподілені включення графіту з низьким ступенем переохолодження та переходять до більших пластинок первинного графіту, оточеного дрібнішими пластинками.

Таблиця 4.4 – Класифікація графітових включень за зональним перерізом зразків із чавуну 310СМ, які виготовлені за другим технологічним варіантом

№ зразка	Товщина холодильника, мм	Класифікація графіту за переважною ознакою					
		ознака класифікації	зона				
			1	2	3	4	5
1-В	10	тип за формою	I	I	I	I	I
		тип за розподілом	E	A	C'	C	C
2-В	20	тип за формою	I	I	I	I	I
		тип за розподілом	E	A	C'	C	C
3-В	30	тип за формою	I	I	I	I	I
		тип за розподілом	E	E	A	C'	C'





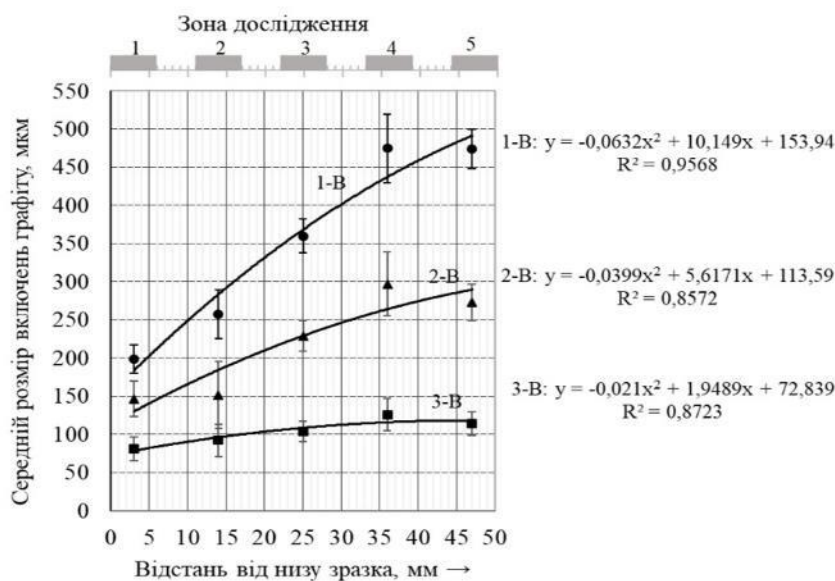
1-В – холодильник товщиною 10 мм; 2-В – холодильник товщиною 20 мм;

3-В – холодильник товщиною 30 мм

Рисунок 4.12 – Металографічні зображення за зональним перерізом зразків із чавуну 310СМ, які виготовлені за другим технологічним варіантом



У результаті дослідження за перерізом виливків з чавуну 310СМ, виготовлених за другим технологічним варіантом із застосуванням додаткових холодильників встановлено, що ефект направленої структуризації підсилюється. Це підтверджується зменшенням розмірів графітових включень в досліджуваних зонах, порівняно зі зразками першого технологічного варіанту (рис. 4.13).



1-В – холодильник товщиною 10 мм; 2-В – холодильник товщиною 20 мм;

3-В – холодильник товщиною 30 мм

Рисунок 4.13 – Середній розмір включень графіту за перерізом зразків із чавуну 310СМ, які виготовлені за другим технологічним варіантом

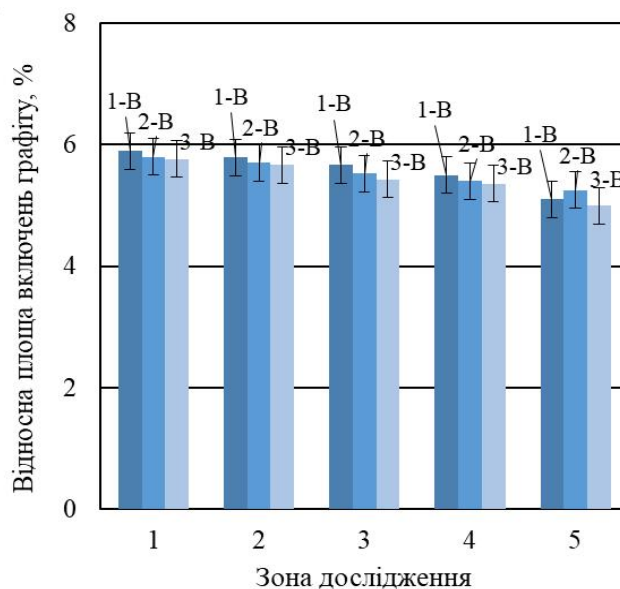
Значення середніх розмірів включень графіту зростають по мірі віддалення від поверхні виливка, яка контактує з холодильником та інокулятором. Характер росту включень графіту у виливках пояснюється тим, що вплив холодильників на розплав зменшується із поступовим віддаленням від них (зона 1), також зменшуються обмежувальні умови для росту графітових включень (зона 4). Встановлено, що за перерізом всіх зразків (1-В, 2-В, 3-В) в зоні 1 значення середніх розмірів включень графіту знаходяться у межах від 80 мкм до 200 мкм, а на периферії, в зоні 5 – від 114 мкм до 470 мкм. В зоні 4 дослідних зразків, спостерігаємо максимальне збільшення середніх розмірів графітових включень, зокрема в зразку 1-В, значення



розмірів сягають до 475 мкм. Однак, в зоні 5 характерне незначне зменшення розмірів (для 1-В – до 470 мкм), внаслідок впливу верхньої ливарної напівформи на відведення тепла від виливка та пришвидшення його кристалізації.

Відповідно до [54, 78], поступова зміна розмірів графітових включень за перерізом виливків обумовлена дією холодильників на швидкість кристалізації та процеси росту графіту. Оскільки, холодильники товщинами 20 мм та 30 мм мають більшу теплоємність порівняно з холодильником товщиною 10 мм, тому зразкам 2-В та 3-В характерне зменшення значень розмірів графітових включень внаслідок інтенсивнішого впливу холодильників на тепловідведення від виливка та процеси кристалізації. При цьому слід зазначити, що застосування холодильника товщиною 30 мм сприяє зменшенню середніх розмірів графітових включень у 3,6-3,8 рази за перерізом виливка порівняно із зразками чавуну 310СМ виготовленого за першим технологічним варіантом (див. пункт 4.1.1).

За результатами оброблення даних металографічних досліджень визначено зміну відносної площі зайнятої графітом за перерізом зразків (рис. 4.14).



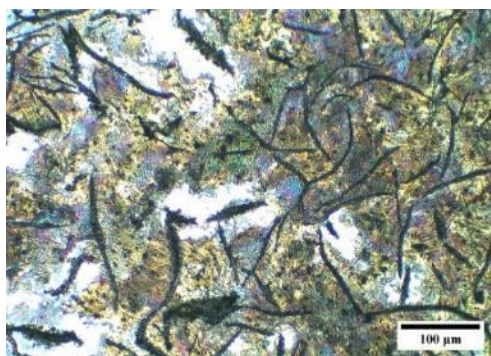
1-В – холодильник товщиною 10 мм; 2-В – холодильник товщиною 20 мм;

3-В – холодильник товщиною 30 мм

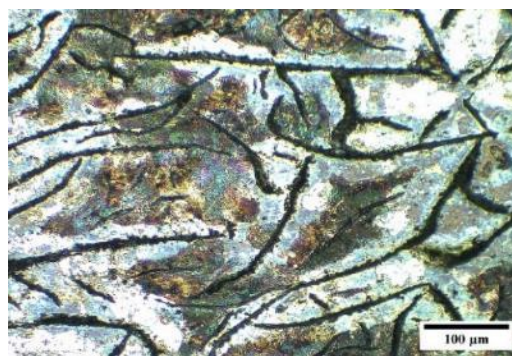
Рисунок 4.14 – Відносна площа зайнята включеннями графіту за перерізом зразків із чавуну 310СМ, які виготовлені за другим технологічним варіантом

Площа зайнята включеннями графіту для усіх зразків змінюється від зони 1 (орієнтовно 6,0 %) до зони 5 (орієнтовно 5,0 %). Отримані результати можуть свідчити, що за перерізом зразків характерне приблизно однакове співвідношення структурних складових металевої матриці.

Результати металографічного дослідження травлених зразків (рис. 4.15) підтвердили припущення щодо структурних складових, оскільки було виявлено перлітно-феритну металеву матрицю у литому стані, з переважаючим вмістом фериту. Однак, застосування холодильників у ливарних формах вплинуло на збільшення вмісту перлітної складової у структурі зразків, порівняно з першим технологічним варіантом.



зона 1

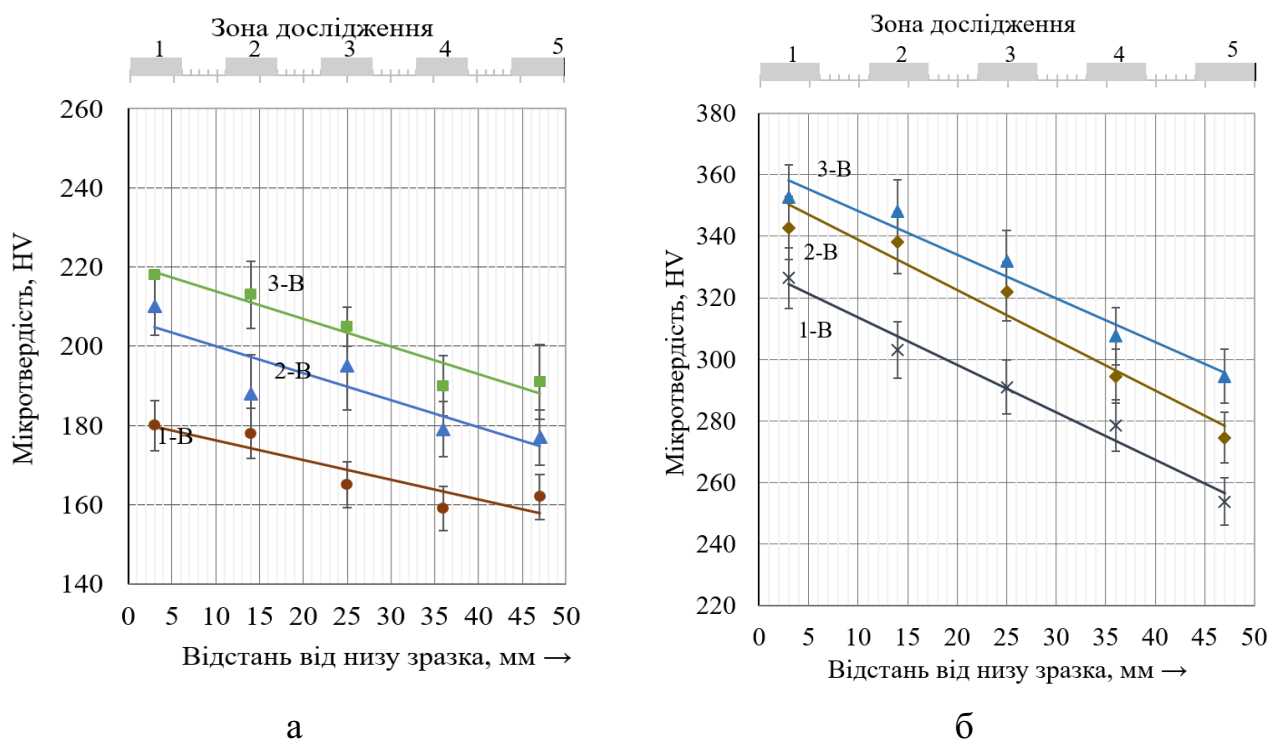


зона 3

Рисунок 4.15 – Металева матриця у різних зонах зразків із чавуну 310СМ, які виготовлені за другим технологічним варіантом

У результаті дослідження за перерізом виливків із чавуну 310СМ було визначено мікротвердість феритної та перлітної складових металевої матриці (рис. 4.16). Значення мікротвердості фериту за перерізом всіх зразків (1-В, 2-В, 3-В) поступово зменшуються від зони 1 (діапазоні від 180 HV до 218 HV) до зони 5 (діапазоні від 162 HV до 190 HV). Отримані значення мікротвердості значно перевищують показники для нелегованих чавунів з пластинчастою формою графіту [35]. При цьому, мікротвердість фериту за перерізом всіх зразків вища в 1,1- 1,7 рази ніж у зразках, отриманих за першим технологічним варіантом. Ця відмінність також характерна для значень мікротвердості перліту. Встановлено, що в

зоні 1 мікротвердість перліту для всіх зразків знаходиться в межах від 326 HV до 350 HV та зменшується в зоні 5 до діапазону від 253 HV до 294 HV (рис. 4.16, б). Відповідно мікротвердість перліту збільшилася до 1,3 разів залежно від досліджуваної зони, порівняно з першим технологічним варіантом. Такий характер збільшення мікротвердості фериту та перліту є результатом інтенсивного впливу холодильників на швидкість кристалізації чавуну та утворення дрібнодисперсних зерен [78, 87].

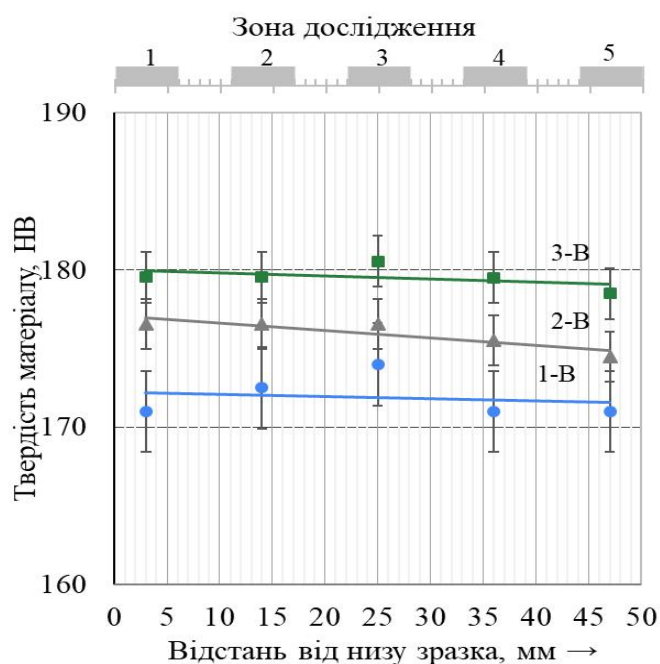


1-B – холодильник товщиною 10 мм; 2-B – холодильник товщиною 20 мм;  
3-B – холодильник товщиною 30 мм

Рисунок 4.16 – Мікротвердість фериту (а), перліту (б) в зразках із чавуну 310СМ, які виготовлені за другим технологічним варіантом

Для виливків із чавуну 310СМ значення твердості за Брінеллем, аналогічні виливкам, які отримані за першим технологічним варіантом. Значення твердості достатньо стабільні за перерізом та в зоні 1 становлять від 172 HV до 180 HV, а в зоні 5 – від 171 HV до 179 HV (рис. 4.17).

Діапазон розкиду значень твердості на периферіях виливків після застосування силікобарієвого інокулятора становить не більше 10 одиниць за Брінеллем, що відповідає дослідженню [89]. Значення твердості за зональним перерізом зразків з чавуну 310СМ, які отримані за першим та другим технологічними варіантами, знаходяться на одному рівні, що свідчить про мінімальний вплив використаних холодильників на даний параметр.



1-В – холодильник товщиною 10 мм; 2-В – холодильник товщиною 20 мм;

3-В – холодильник товщиною 30 мм

Рисунок 4.17 – Твердість зразків із чавуну 310СМ, які виготовлені за другим технологічним варіантом

Утворення феритної складової в металевій матриці, згідно з [89], спричинено хімічним складом чавуну та дією силікобарієвого інокулятора за перерізом виливків, який знижує схильність до вибілення та підсилює графітизацію, сприяє створенню однорідної структури та властивостей, позитивно впливає на підвищення міцності, пластичності й теплопровідності матеріалу, який піддається впливу термічних навантажень [37].

#### 4.2.2 Властивості виливків із чавуну 350СМХАН

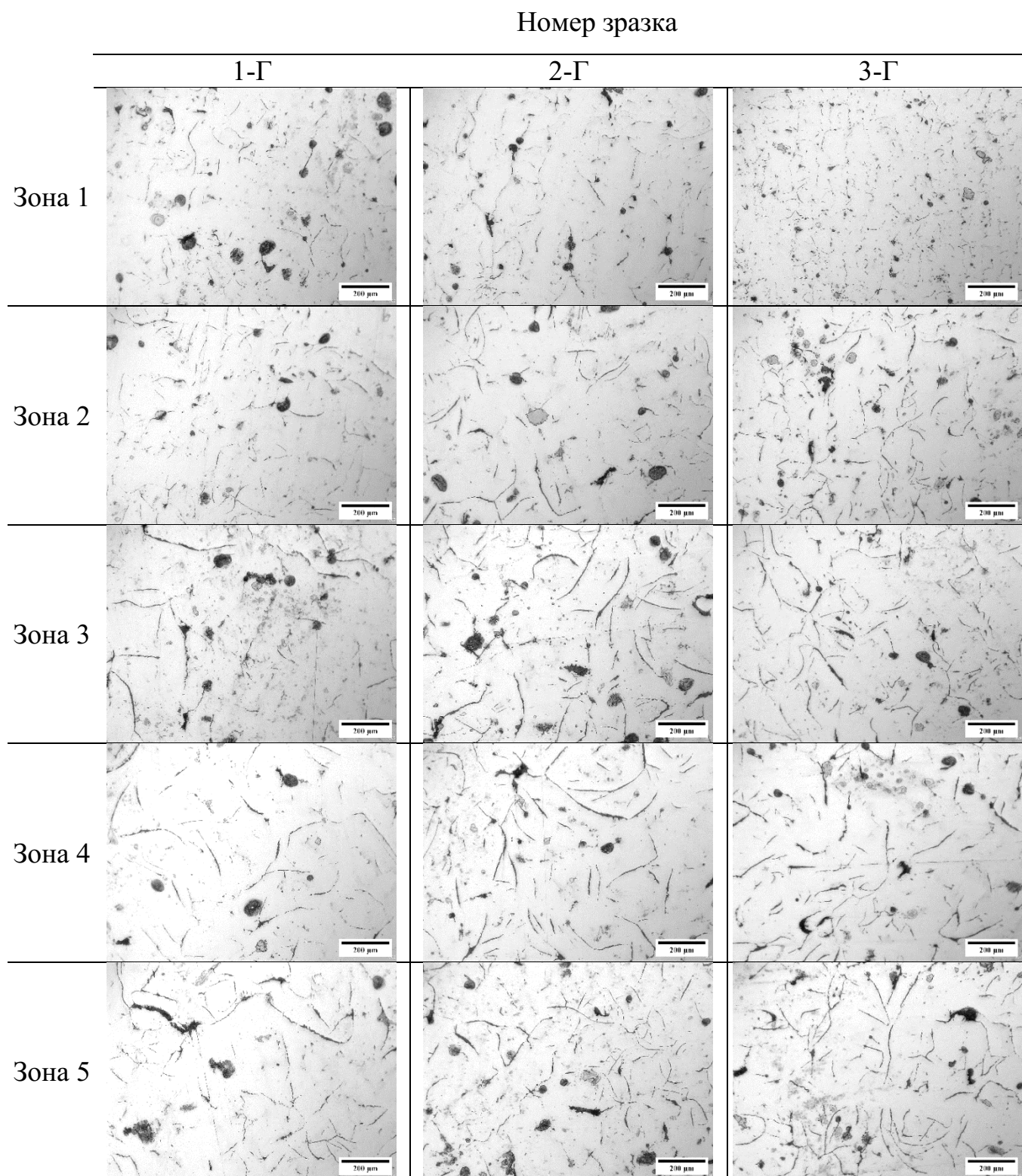
Аналогічно до чавуну 310СМ проведені дослідження впливу поверхневого оброблення чавуну 350СМХАН інокулятором марки SB5 фракції 0,315 мм у порожнині ливарної форми у комплексі із застосуванням холодильників з товщинами 10 мм, 20 мм та 30 мм.

У результаті дослідження металографічних зображень за перерізом зразків з чавуну 350СМХАН визначено форму та розподіл графітових включень (рис. 4.18).

Встановлено, що аналогічно першому та другому технологічному варіанту, форма графіту пластинчата. Зміна розподілу пластинчатого графіту в зразках однакова, незалежно від товщини використаного холодильника (табл. 4.5). Також розподіл графіту в зразках змінюється у міру віддалення від зони контакту з холодильником. Тому морфологію графіту за розподілом в зонах 1 і 2 можна охарактеризувати як міждендритний графіт, утворений внаслідок затвердіння чавуну з інтенсивним переохолодженням, який переходить до рівномірно розподіленого пластинчатого графіту в зонах 3, 4, 5.

Таблиця 4.5 – Класифікація графітових включень за зональним перерізом зразків із чавуну 350СМХАН, які виготовлені за другим технологічним варіантом

Номер зразка	Товщина холодильника, мм	Класифікація графіту за переважною ознакою					
		ознака класифікації	зона				
			1	2	3	4	5
1-Г	10	тип за формою	I	I	I	I	I
		тип за розподілом	E	E	A	A	A
2-Г	20	тип за формою	I	I	I	I	I
		тип за розподілом	E	E	A	A	A
3-Г	30	тип за формою	I	I	I	I	I
		тип за розподілом	E	E	A	A	A



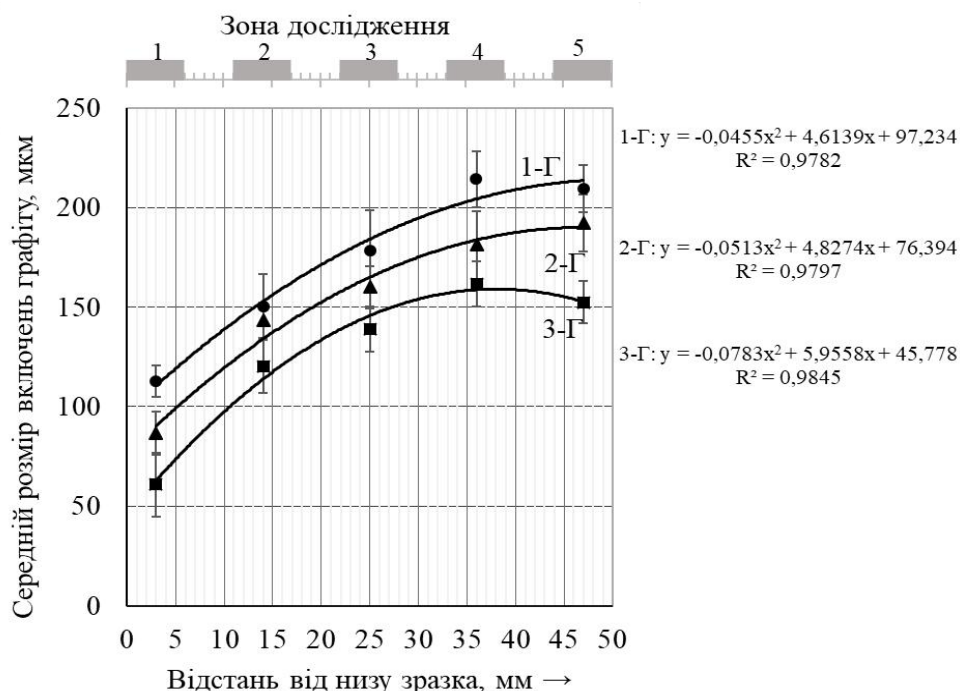
1-Г – холодильник товщиною 10 мм; 2-Г – холодильник товщиною 20 мм;

3-Г – холодильник товщиною 30 мм

Рисунок 4.18 – Металографічні зображення за зональним зразків із чавуну 350СМХАН, які виготовлені за другим технологічним варіантом



У результаті проведення металографічних досліджень також встановлено, що розміри графітових включень збільшуються від зони 1, тобто місця контакту розплаву з холодильниками, до зони 5 – контакту чавуну з верхньою напівформою (рис. 4.19). В зоні 1 дослідних зразків значення середніх розмірів графітових включень знаходяться в діапазоні від 61 мкм до 113 мкм, та в зоні 5 – від 152 мкм до 210 мкм.

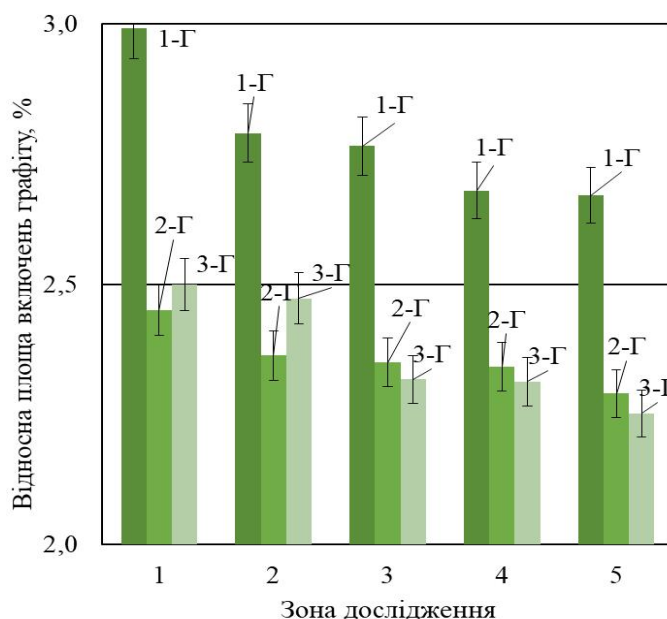


1-Г – холодильник товщиною 10 мм; 2-Г – холодильник товщиною 20 мм;  
3-Г – холодильник товщиною 30 мм

Рисунок 4.19 – Середній розмір включень графіту за перерізом зразків із чавуну 350СМХАН, які виготовлені за другим технологічним варіантом

Для зразків характерне значне зменшення середніх розмірів графітових включень, порівняно з сплавом 310СМ: в зоні 1 розміри менші в 1,3-1,7 разів, а в зоні 5 – у 2,3 рази. Це обумовлено не лише впливом холодильників, як додаткових теплоакумулювальних елементів, а й наявністю більшої кількості легувальних елементів, які сприяють процесу подрібнення графітових включень. Поступовий ріст розмірів графітових включень за зональним перерізом зразків, характеризується зменшенням впливу холодильників на швидкість та час їх формування.

Встановлено, що площа, яку займають графітові включення за перерізом зразків, в зоні 1 знаходиться в діапазоні від 2,5 % до 3 % та змінюється до зони 5 в межах від 2,3 % до 2,7 % (рис. 4.20). Це свідчить, що за перерізом зразків приблизно однаковий розподіл та однакове кількісне співвідношення структурних складових металевої матриці. При цьому слід зауважити, що відносна площа, зайнята графітовими включеннями приблизно у 2 рази менша, порівняно зі зразками з чавуну 310СМ, які теж виготовлені за другим технологічним варіантом. Така відмінність свідчить про ймовірність гальмування процесів графітизації та стабілізування карбідних фаз під час затвердіння виливків 350СМХАН, а також про можливу наявність значної кількості перлітної складової у металевій матриці.



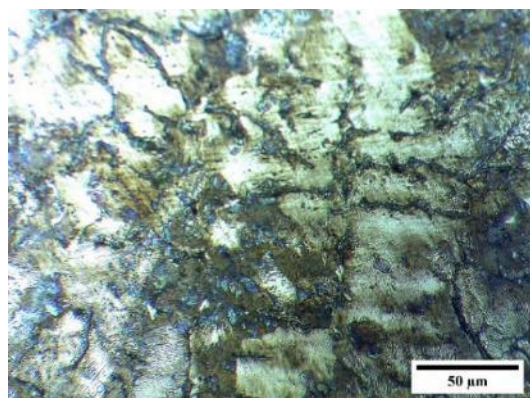
1-Г – холодильник товщиною 10 мм; 2-Г – холодильник товщиною 20 мм;  
3-Г – холодильник товщиною 30 мм

Рисунок 4.20 – Відносна площа зайнята включеннями графіту за перерізом зразків із чавуну 350СМХАН, які виготовлені за другим технологічним варіантом

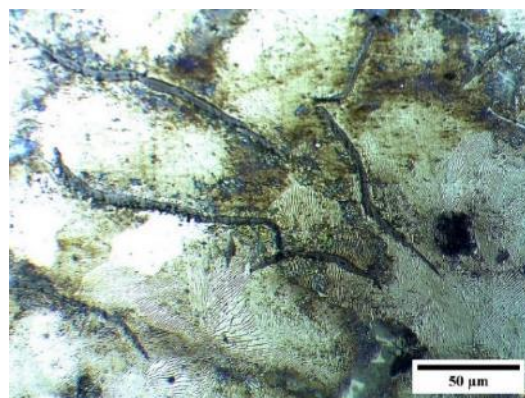
Максимального значення відносна площа зайнята графітом досягає в зразку 1-Г – 3 % та зменшується до 2,6 %, що вказує на наявність перлітної та феритної складової. Це підтверджується дослідженням металографічних зображень травлених



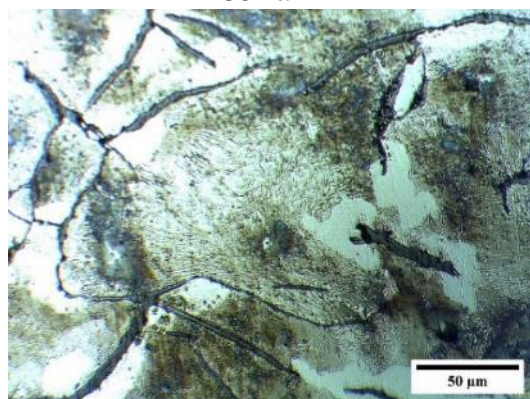
зразків. Як результат, визначено, що для металевої матриці властиві перлітна та феритна складові у литому стані (рис. 4.21), однак феритна складова переважно проявляється як оторочка навколо графітових включень.



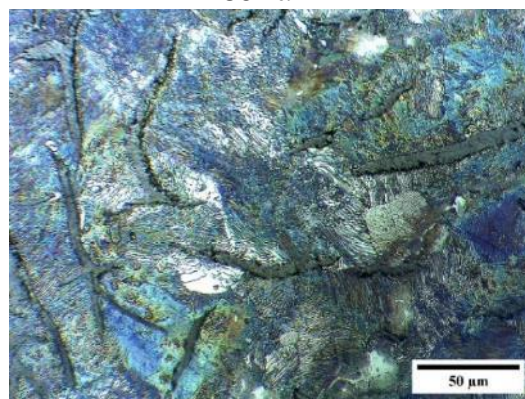
зона 1



зона 2



зона 3



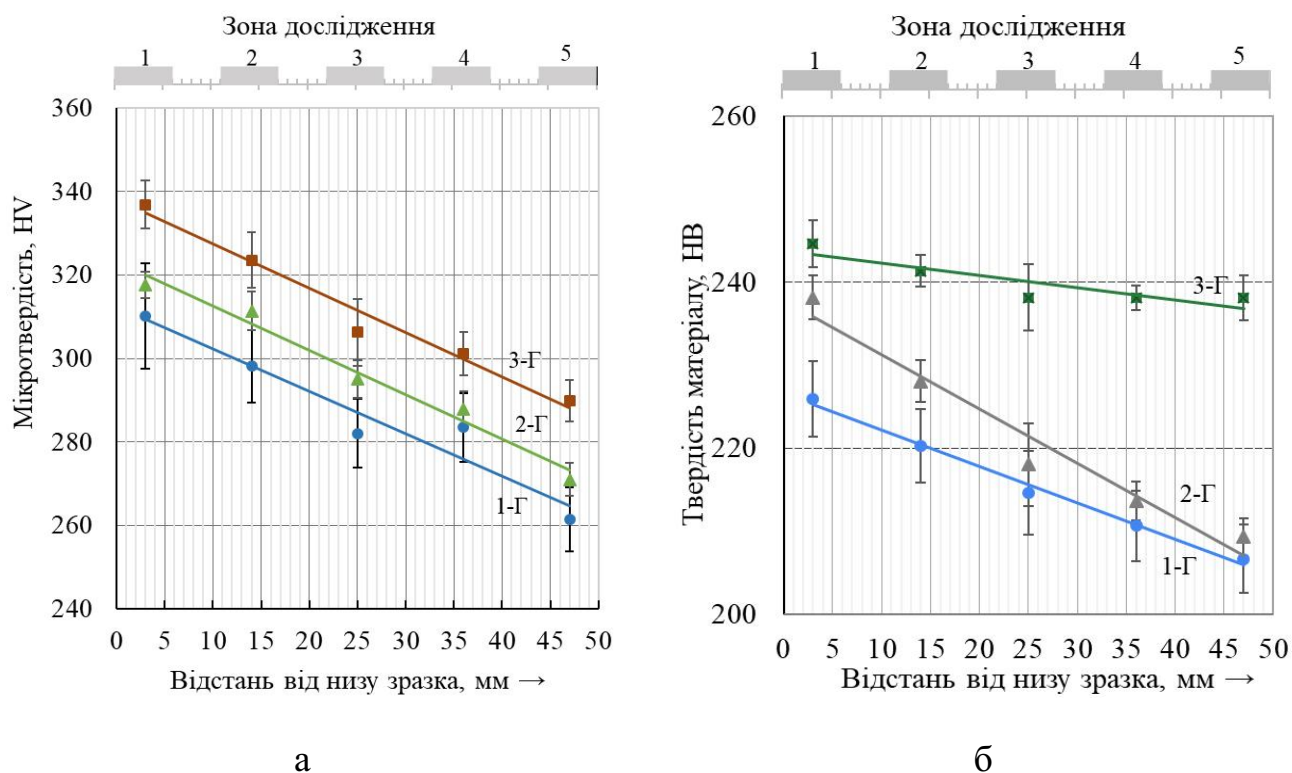
зона 5

Рисунок 4.21 – Металева матриця у різних зонах зразків із чавуну 350СМХАН, які виготовлені за другим технологічним варіантом

Визначено, що значення мікротвердості металевої матриці мають високі показники внаслідок наявної домінуючої перлітної складової. За перерізом зразків значення мікротвердості демонструють спадаючий ефект від зони 1 в діапазоні від 310 HV до 337 HV до зони 5 – від 260 HV до 290 HV (рис. 4.22, а). Такий ефект спричинений наявністю дрібніших зерен металевої матриці внаслідок інтенсивного впливу холодильників на швидкість кристалізації розплаву в зонах 1 та 2. Також на подрібнення розмірів зерен та гальмування їх росту, впливають додаткові легувальні елементи у складі чавуну 350СМХАН, особливо це характерно для Cr, а також

елементам, які стабілізують наявні карбіди та можуть утворювати власні – Ti, Cr та Mo [58, 63].

У результаті дослідження за перерізом зразків із чавуну 350СМХАН визначено твердість за Брінеллем (рис. 4.22, б). Значення твердості для всіх зразків змінюються від зони 1 (в межах від 226 НВ до 245 НВ) до зони 5 (в межах від 210 НВ до 238 НВ).



1-Г – холодильник товщиною 10 мм; 2-Г – холодильник товщиною 20 мм;  
3-Г – холодильник товщиною 30 мм

Рисунок 4.22 – Мікротвердість перліту (а) та твердість (б) зразків із чавуну 350СМХАН, які виготовлені за другим технологічним варіантом

Твердість зразків чавуну 350СМХАН перевищує в середньому в 1,3 рази (залежно від досліджуваної зони) значення твердості зразків чавуну 310СМ, які теж отримані за другим технологічним варіантом. Такий ефект характеризується наявною дрібнодисперсною структурою внаслідок інтенсивного впливу холодильників та легувальних елементів на умови кристалізації, що аналогічно вищеописаному впливу на показники мікротвердості.

Висока твердість властива саме для домінуючої перлітної складової. Однак, перліт погіршує теплофізичні характеристики та є термодинамічно нестабільний, може чинити деструктивний вплив на деталі в процесі експлуатації через розпад на стабільні складові – ферит та графіт. Це призводить до збільшення внутрішніх напружень та деформацій у виробах, що можна відкоригувати за рахунок проведення феритизувального відпалу виливків. Однак, проведення відпалу несе за собою додаткові економічні витрати, як мінімум обладнання та ресурси для реалізації необхідних умов конкретного виду термічного оброблення. Тому доцільно застосовувати технологічний прийом, який інтенсивніше вплине на процеси кристалізації, графітизації та структуроутворення у виливках. Підтверджено позитивний вплив інокулятора марки SB5 на утворення феритної складової в металевій матриці, однак наскрізну феритизацію забезпечено не було, тому раціональним рішенням стало застосування традиційного та ефективного методу ковшового оброблення з використанням цього ж інокулятора.

#### **4.3 Третій технологічний варіант – ковшове оброблення розплаву чавуну та застосування холодильників різних товщин**

Третій технологічний варіант (див. рис. 2.3, а) полягає у застосуванні ковшового оброблення силікобарієвим інокулятором марки SB5 фракції від 2 мм до 6 мм у кількості 0,5 % від маси виливка та холодильників із чавуну СЧ200 ДСТУ 8833:2019 товщинами 10 мм, 20 мм та 30 мм.

Ковшове оброблення чавунів силікобарієвим інокулятором дозволить у повній мірі пройти процесам графітизації та мінімізувати кількість перлітної складової в металевій матриці, що позитивно вплине на теплофізичні властивості за перерізом виливків [53]. Для формування градієнту морфології структури від дрібнозернистої до крупнозернистої застосовано холодильники, аналогічні другому технологічному варіанту. Використання цих додаткових теплоакумулювальних елементів підвищить швидкість кристалізації чавуну, особливо у місці контакту з розплавом.

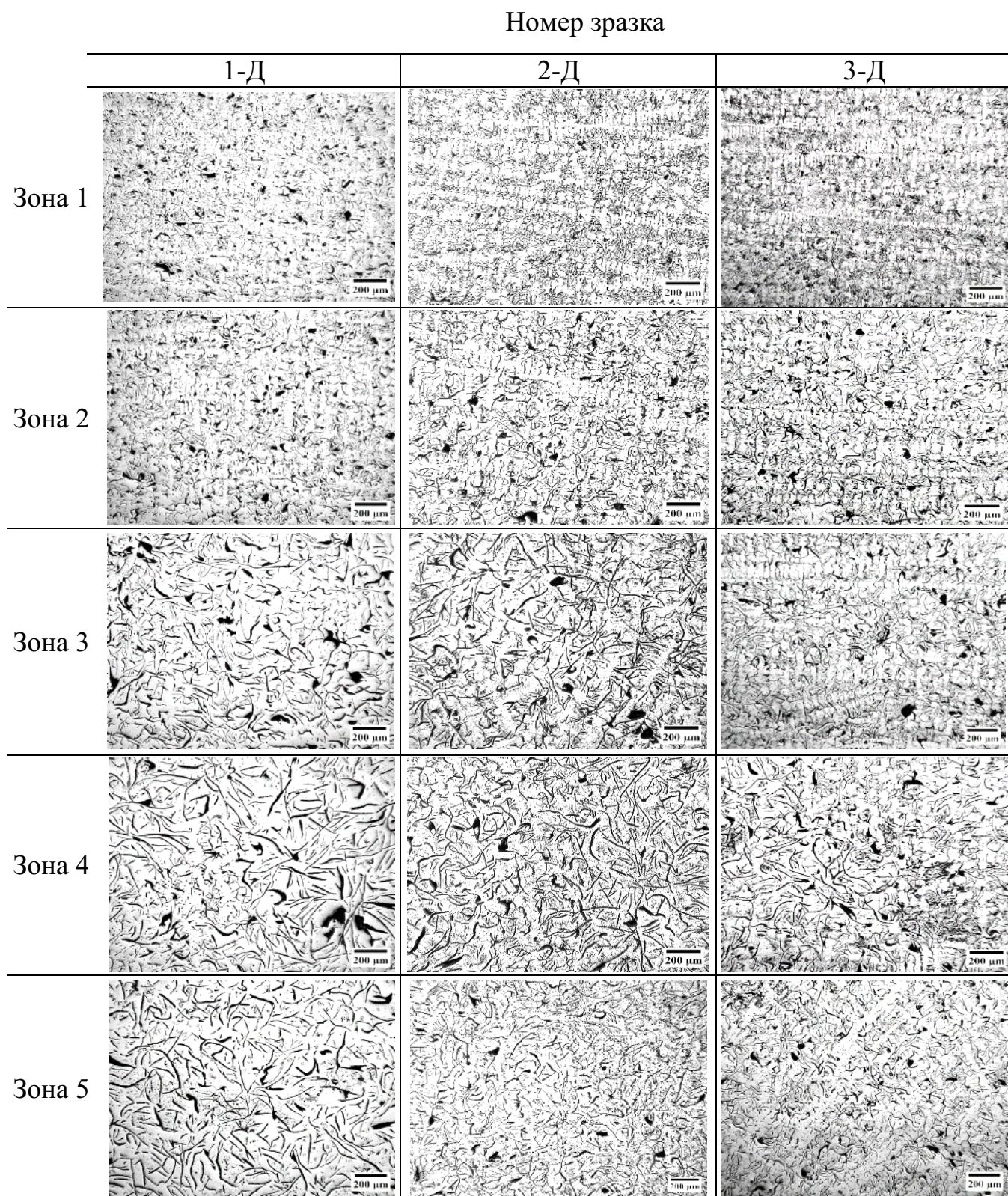
### 4.3.1 Властивості виливків із чавуну 310СМ

У результаті проведення металографічних досліджень за зональним перерізом зразків із чавуну 310СМ (рис. 4.23) визначено, що відповідно до [116], за формою графіт можна класифікувати як пластинчаті включення з гострими кінцями. Встановлено, що за перерізом зразків розподіл пластинчастого графіту змінюється (табл. 4.6) від дрібнорозгалуженого міждендритного (зона 1) до розеткового (зона 2) та переходить до рівномірного (зони 3, 4 та 5). Згідно з [116], міждендритний графіт типу D та E утворений внаслідок дії холодильників на швидкість охолодження. Такий графіт характерний для аналогічної продукції, виготовленої у формах із високими теплофізичними характеристиками [24, 55]. Вироби з рівномірним розподілом пластинчастого графіту (як у зонах 3, 4 та 5) через високу теплопровідність часто застосовуються для роботи в умовах впливу термомеханічних навантажень, прикладами є гальмівні диски (піддаються циклам нагрівання і охолодження, що подібні до умов роботи формокомплектів для виготовлення склотари) [39, 57].

Таблиця 4.6 – Класифікація графітових включень за зональним перерізом зразків із чавуну 310СМ, які виготовлені за третім технологічним варіантом

Номер зразка	Товщина холодильника, мм	Класифікація графіту за переважною ознакою					
		ознака класифікації	зона				
			1	2	3	4	5
1-Д	10	тип за формою	I	I	I	I	I
		тип за розподілом	D	E	A	A	A
2-Д	20	тип за формою	I	I	I	I	I
		тип за розподілом	D	E	A	A	A
3-Д	30	тип за формою	I	I	I	I	I
		тип за розподілом	E	E	E	A	A





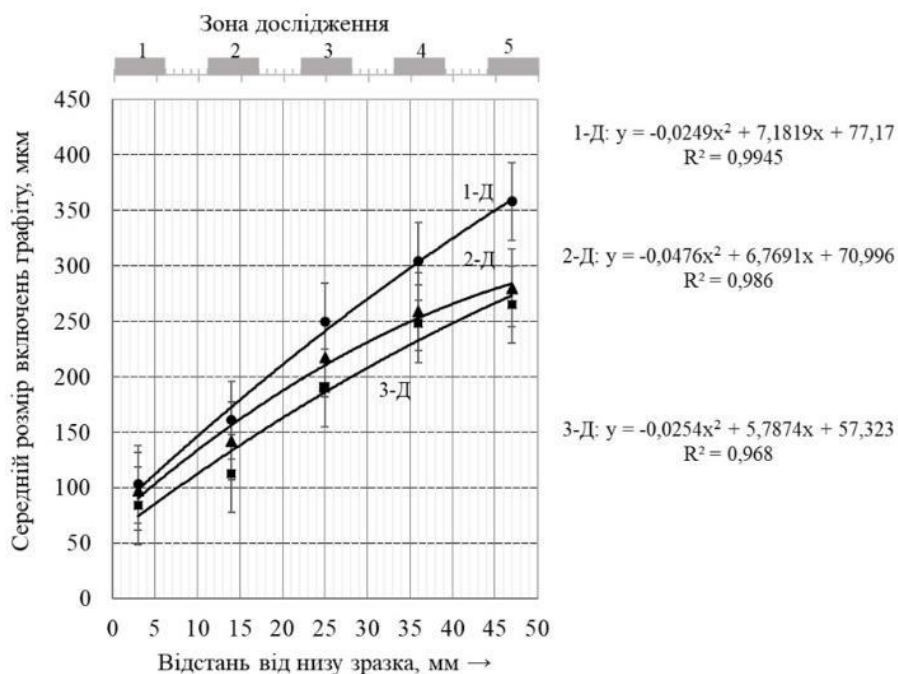
1-Д – холодильник товщиною 10 мм; 2-Д – холодильник товщиною 20 мм;

3-Д – холодильник товщиною 30 мм

Рисунок 4.23 – Металографічні зображення за зональним перерізом зразків із чавуну 310СМ, які виготовлені за третім технологічним варіантом



У результаті аналізу зображень отриманих мікроструктур зразків, встановлено зростання середньої довжини графітових включень від зони 1 в інтервалі від 84 мкм до 115 мкм до зони 4 – від 257 мкм до 357 мкм (рис. 4.24). Також, в усіх зразках спостерігається зменшення розмірів графітових включень в зоні 5 порівняно із зоною 4, а саме в межах від 258 мкм до 340 мкм, що обумовлено контактом розплаву чавуну з верхньою напівформою. Порівняно із дослідними виливками, які отримані за другим технологічним варіантом, середні розміри графітових включень у зразках чавуну 310СМ зменшилися в 1,5-1,8 рази.



1-Д – холодильник товщиною 10 мм; 2-Д – холодильник товщиною 20 мм;

3-Д – холодильник товщиною 30 мм

Рисунок 4.24 – Середній розмір включень графіту за перерізом зразків із чавуну 310СМ, які виготовлені за третім технологічним варіантом

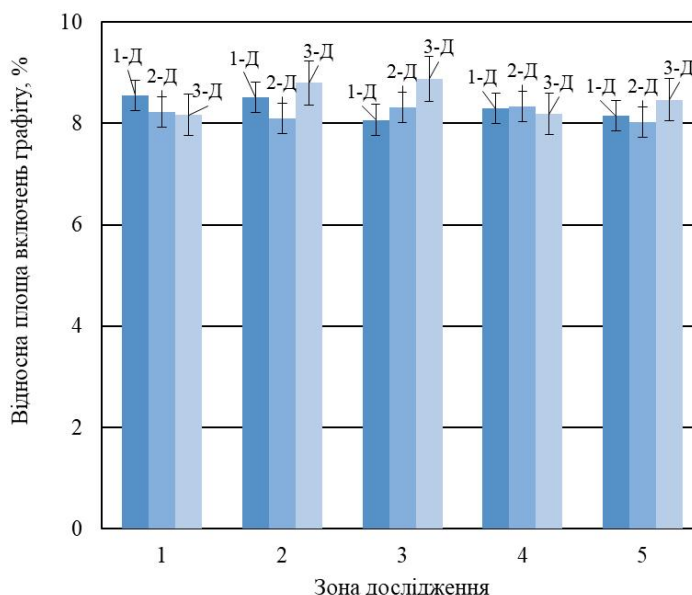
Найбільш виражену зміну середніх розмірів графітових включень за перерізом зразків, порівняно з другим технологічним варіантом, спостерігаємо в зоні 1, що знаходиться в діапазоні від 84 мкм до 115 мкм. Це зумовлено дією холодильника. Максимальні значення середніх розмірів графітових включень в зоні 4 знаходяться в

діапазоні від 262 мкм до 357 мкм. Таке збільшення розмірів графітових включень в зоні 4, порівняно зі зоною 1, відбулося за рахунок повільного охолодження, яке вплинуло на створення сприятливіших умов для зростання графіту. Відповідно, за триваліший час кристалізації, формуються крупніші графітові включення через швидший процес дифузії С в рідкому чавуні, порівняно з твердим чавуном. Зменшення значень середнього розміру графітових включень в зоні 5 усіх зразків (1-Д, 2-Д, 3-Д), зумовлене впливом верхньої напівформи на пришвидшення охолодження та обмеження росту включень графіту. Найменші значення середнього розміру графітових включень властиві зразкам 3-Д, які виготовлені з використанням холодильника товщиною 30 мм. Розміри графітових включень зростають від 84 мкм в зоні 1 до 262 мкм в зоні 5. Ключовою причиною зменшення розмірів графітових включень в зразках 3-Д та 2-Д, порівняно із зразком 1-Д, є інтенсивніше охолодження та пришвидшена кристалізація внаслідок впливу холодильників з більшою теплоємністю. Відповідно, такий вплив обмежує розвиток крупних включень графіту. При цьому, слід відзначити, що середній розмір графітових включень за перерізом зразків 2-Д та 3-Д практично однаковий. Встановлену зміну розмірів та розподілу графітових включень за перерізом виливків, можна описати як градієнт за морфологією структури.

Також, у результаті оброблення металографічних досліджень, визначено площу, зайняту графітовими включеннями за перерізом зразків (рис. 4.25). Значення відносної площі, зайнятої графітовими включеннями знаходяться в межах від 8,2 % до 8,6 % в зоні 1 та від 8,2 % до 8,5 % – в зоні 5. Такі отримані дані свідчать про наявність тотожної структурної складової за перерізом зразків.

Встановлено, що відносна площа зайнята графітовими включеннями в зразках чавуну 310СМ, отриманих за третім технологічним варіантом, більша від 2 % до 5 % залежно від зони, порівняно із зразками чавуну 310СМ (площа до 6 %) та чавуну 350СМХАН (площа близько 3 %), які виготовлені за другим технологічним варіантом (див. пункт 4.2.1 та див. пункт 4.2.2 відповідно). Такий ефект спричинений внаслідок оброблення чавунів в ковші, яке сприяє збільшенню кількості центрів кристалізації та подрібненню графіту. Оскільки Si, введений в розплав у складі силікобарієвого

інокулятора, концентрується поблизу включень вже утвореного графіту та пришвидшує дифузію С в розплаві, це призводить до активізації процесів графітизації під час затвердіння [53, 82].



1-Д – холодильник товщиною 10 мм; 2-Д – холодильник товщиною 20 мм;

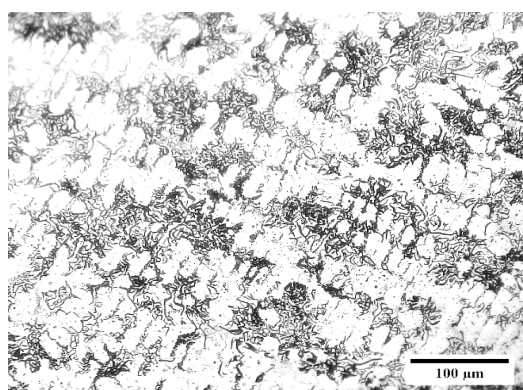
3-Д – холодильник товщиною 30 мм

Рисунок 4.25 – Відносна площа, зайнята включеннями графіту за перерізом зразків із чавуну 310СМ, які виготовлені за третім технологічним варіантом

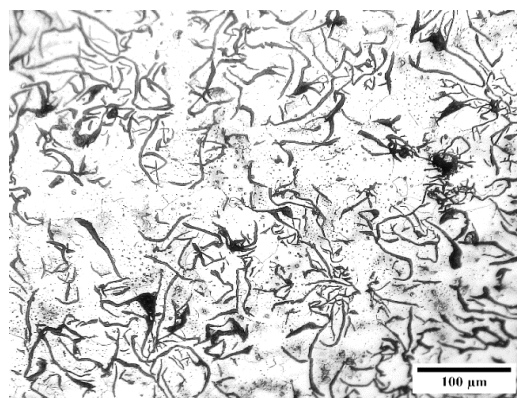
Також високий вміст графітної фази у зразках свідчить про домінуючу безвуглецеву структурну складову металевої матриці, що підтверджується наступними металографічними дослідженнями травлених зразків.

Встановлено, що металева матриця містить повністю феритну складову у литому стані (рис. 4.26). Це обумовлено комбінованою взаємодією ковшового оброблення розплаву барієвмісним інокулятором та холодильників. Інокулятор перешкоджає вибіленню чавуну, що особливо актуально за умов застосування елементів ливарної форми, які прискорюють кристалізацію та охолодження виливка [53, 82, 89].

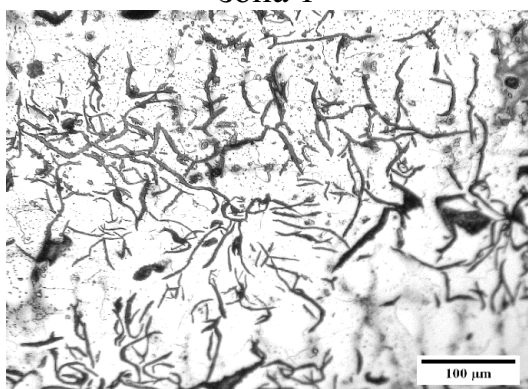




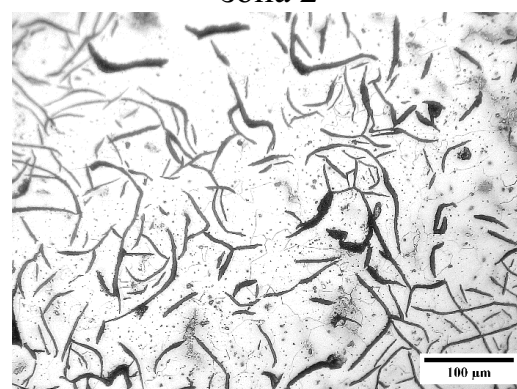
зона 1



зона 2



зона 3

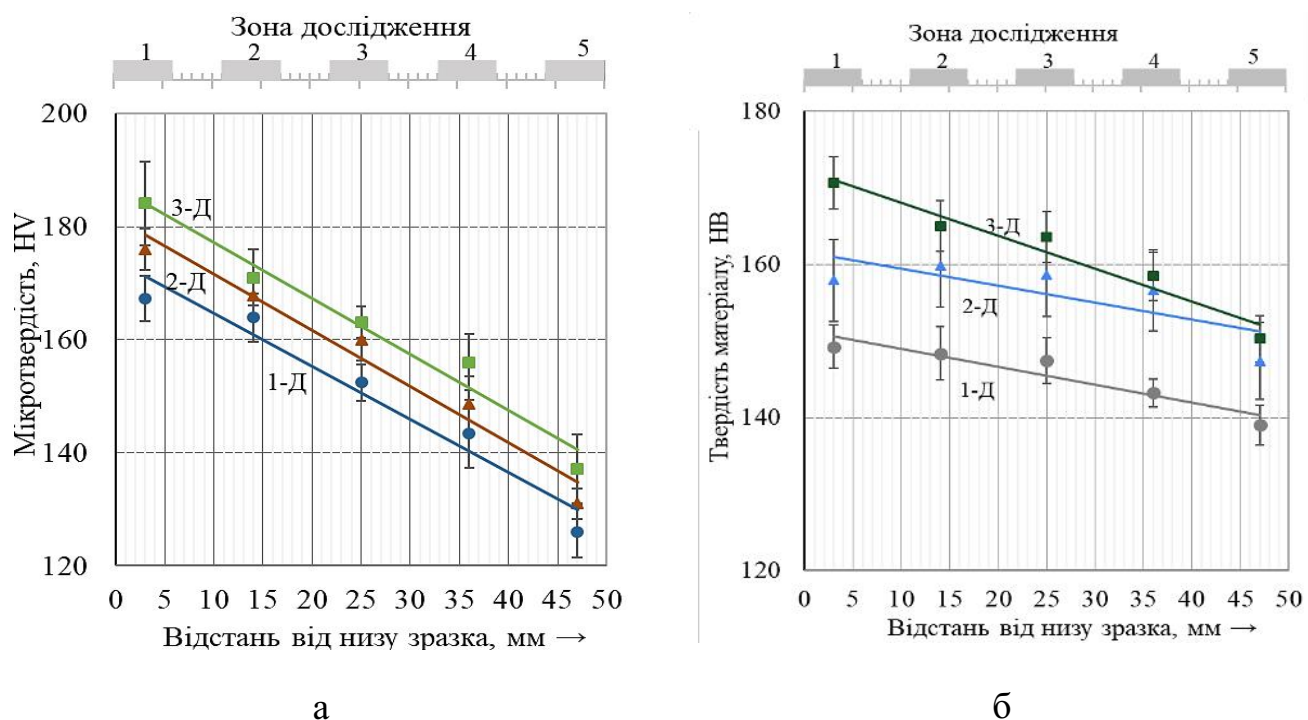


зона 5

Рисунок 4.26 – Металева матриця у різних зонах зразків із чавуну 310СМ, які виготовлені за третім технологічним варіантом

Результати дослідження мікротвердості (рис. 4.27, а) демонструють, що для фериту властиві високі показники. Значення мікротвердості за перерізом всіх зразків в зоні 1 знаходяться у діапазоні від 164 HV до 184 HV та зменшуються до зони 5 в інтервалі значень від 126 HV до 137 HV. Отримані значення мікротвердості свідчать про те, що у виливках отримано легований ферит з підвищеними механічними характеристиками, що обумовлено подрібненням зерна металевої матриці внаслідок комплексної дії інокулятора та холодильників на температурно-кінетичні процеси затвердіння. Також високі показники, відповідно до [89, 117], зумовлені пролонгованим ефектом взаємодії розплаву чавуну з барієвмісним інокулятором, що забезпечує значний приріст механічних характеристик. Значення мікротвердості фериту у зоні 1 нижчі в 1,1-1,2 рази, порівняно зі зразками, які отримані за другим технологічним варіантом (зразки 1-В, 2-В, 3-В). Це зумовлено внаслідок перенесення інокулятора із порожнини форми у ківш, що призвело до більш повного його

засвоєння та можливого зниження швидкостей кристалізації та охолодження виливків. При цьому, значення мікротвердості феритної складової зразків чавуну 310СМ, отриманих за третім технологічним варіантом (1-Д, 2-Д, 3-Д), знаходиться у тому ж діапазоні, що мікротвердість зразків чавуну 310СМ, які отримані за першим технологічним варіантом (1-А, 2-А, 3-А). Для третього технологічного варіанту це можна пояснити менш інтенсивним впливом елементів, які розташовані у ливарній формі на процеси кристалізації та охолодження.



1-Д – холодильник товщиною 10 мм; 2-Д – холодильник товщиною 20 мм;  
3-Д – холодильник товщиною 30 мм

Рисунок 4.27 – Мікротвердість фериту металевої матриці (а) та твердість (б) зразків із чавуну 310СМ, які виготовлені за третім технологічним варіантом

Окрім мікротвердості металевої матриці визначено твердість матеріалу за Брінеллем. Встановлено, що значення зменшуються від зони 1 у діапазоні від 150 НВ до 170 НВ, до зони 5 у діапазоні від 140 НВ до 150 НВ (див. рис. 4.27, б). При цьому слід відзначити, що зміни твердості за перерізом не суттєві, що пояснюється наявністю практично однорідної структури металевої матриці за перерізом виливка.

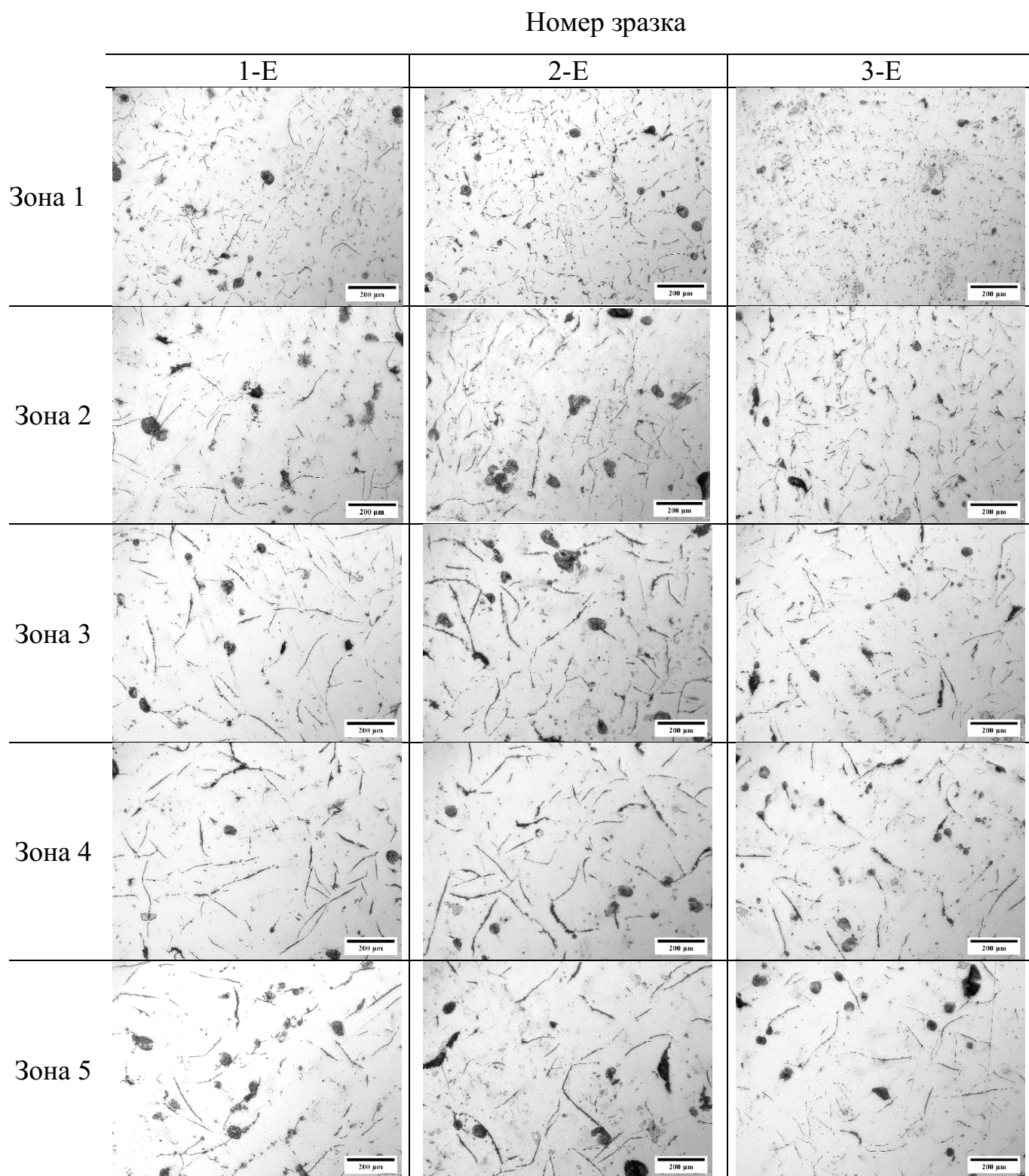
Перенесення інокулятора із порожнини ливарної форми до ковша призвело до повного його засвоєння. Відповідно, це інтенсивніше вплинуло на графітизацію та забезпечило кристалізацію за перерізом виливків із повною феритизацією металевої матриці у литому стані. Також такий вплив доцільно визначити на властивості виливків із чавуну 350СМХАН.

#### 4.3.2 Властивості виливків із чавуну 350СМХАН

У результаті дослідження визначено вплив третього технологічного варіанту на формування структури та властивостей виливків із чавуну 350СМХАН, в якому значно більший вплив додаткових легувальних елементів на структуроутворення. Встановлено, що в зразках, форма графітових включень пластинчата, що аналогічно зразкам чавуну 310СМ, які також отримано за третім технологічним варіантом (рис. 4.28). За перерізом виливків з чавуну 350СМХАН, встановлено, що розподіл пластинчатих графітових включень можна класифікувати як зміну від дрібнорозгалуженого міждендритного (зона 1) до рівномірного (зони 2, 3, 4, 5) (табл. 4.7). Згідно до [116], наявний міждендритний графіт утворений внаслідок підвищеної швидкості охолодження в процесі затвердіння розплаву в зоні контакту з холодильником.

Таблиця 4.7 – Класифікація графітових включень за зональним перерізом зразків із чавуну 350СМХАН, які виготовлені за третім технологічним варіантом

Номер зразка	Товщина холодильника, мм	Класифікація графіту за переважною ознакою					
		ознака класифікації	зона				
			1	2	3	4	5
1-Е	10	тип за формою	I	I	I	I	I
		тип за розподілом	Е	А	А	А	А
2-Е	20	тип за формою	I	I	I	I	I
		тип за розподілом	Е	А	А	А	А
3-Е	30	тип за формою	I	I	I	I	I
		тип за розподілом	Е	А	А	А	А

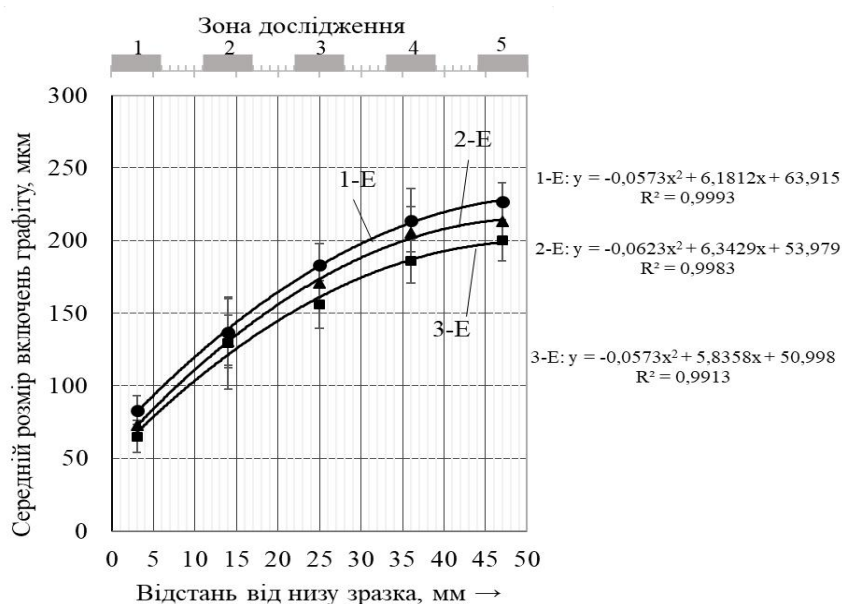


1-Е – холодильник товщиною 10 мм; 2-Е – холодильник товщиною 20 мм;

3-Е – холодильник товщиною 30 мм

Рисунок 4.28 – Металографічні зображення за зональним перерізом зразків із чавуну 350СМХАН, які виготовлені за третім технологічним варіантом

У результаті оброблення зображень мікроструктури за перерізом зразків встановлено, що середні розміри графітових включень збільшуються від зони 1 в діапазоні від 65 мкм до 102 мкм до зони 5 в межах від 177 мкм до 227 мкм (рис. 4.29). Максимальні значення середніх розмірів графітових включень властиві зразку 1-Е. Це зумовлено менш інтенсивним впливом холодильника товщиною 10 мм на процес кристалізації та подрібнення розмірів, порівняно з холодильниками товщинами 20 мм (зразок 2-Е) та 30 мм (зразок 3-Е). Дрібнодисперсні графітові включення властиві зразку 3-Е. Середній розмір графітових включень зразка 3-Е становить 65 мкм в зоні 1, зростає до 186 мкм у зоні 4 та дещо знижується до 177 мкм у зоні 5. Інтенсивний вплив холодильника товщиною 30 мм з високою теплоакумулювальною здатністю, призвів до подрібнення графітових включень внаслідок пришвидшення процесу кристалізації та обмеження часу для росту графітових включень.



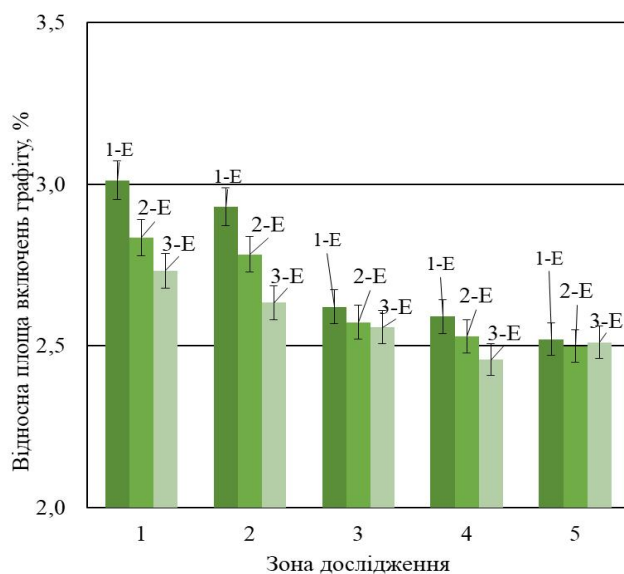
1-Е – холодильник товщиною 10 мм; 2-Е – холодильник товщиною 20 мм;

3-Е – холодильник товщиною 30 мм

Рисунок 4.29 – Середній розмір включень графіту за перерізом зразків із чавуну 350СМХАН, які виготовлені за третім технологічним варіантом

Максимальні значення розмірів графітових включень за перерізом зразків 350СМХАН менші в зоні 1 в 1,2-1,3 рази (до 20 мкм) порівняно зі зразками чавуну

310СМ. В зоні 5 розміри зменшені в 1,3-1,4 рази (в діапазоні від 80 мкм до 100 мкм). Дана залежність між зразками чавунів 310СМ та 350СМХАН аналогічна залежності між зразками цих дослідних чавунів, виготовлених за другим технологічним варіантом (пункт 4.2.2). Така залежність зумовлена впливом додаткових легувальних елементів (Cr, Mo, Ti) в зразках із чавуну 350СМХАН, які позитивно вплинули на подрібнення графіту. Встановлено відносну площу, зайняту графітовими включеннями від зони 1 до зони 5 в зразках з чавуну 350СМХАН. Визначено, що за перерізом всіх зразків значення поступово зменшуються від 3,0 % до 2,5 % (рис. 4.30).



1-E – холодильник товщиною 10 мм; 2-E – холодильник товщиною 20 мм;

3-E – холодильник товщиною 30 мм

Рисунок 4.30 – Відносна площа зайнята графітом в зонах дослідження зразків із чавуну 350СМХАН, які виготовлені за третім технологічним варіантом

Відносна площа, зайнята графітовими включеннями значно менша порівняно зі сплавом 310СМ, а різниця становить до 6 %. Це зумовлено, тим, що превалює дія легувальних елементів у виливках з чавуну 350СМХАН на гальмування процесу графітизації. Така залежність аналогічна для зразків чавуну 350СМХАН, виготовлені за другим технологічним варіантом (пункт 4.2.2). За допомогою металографічного дослідження травлених зразків було встановлено, що металева матриця зразків



складається з домінуючої перлітної складової у литому стані, з незначними оторочками фериту навколо графітових включень (рис. 4.31).

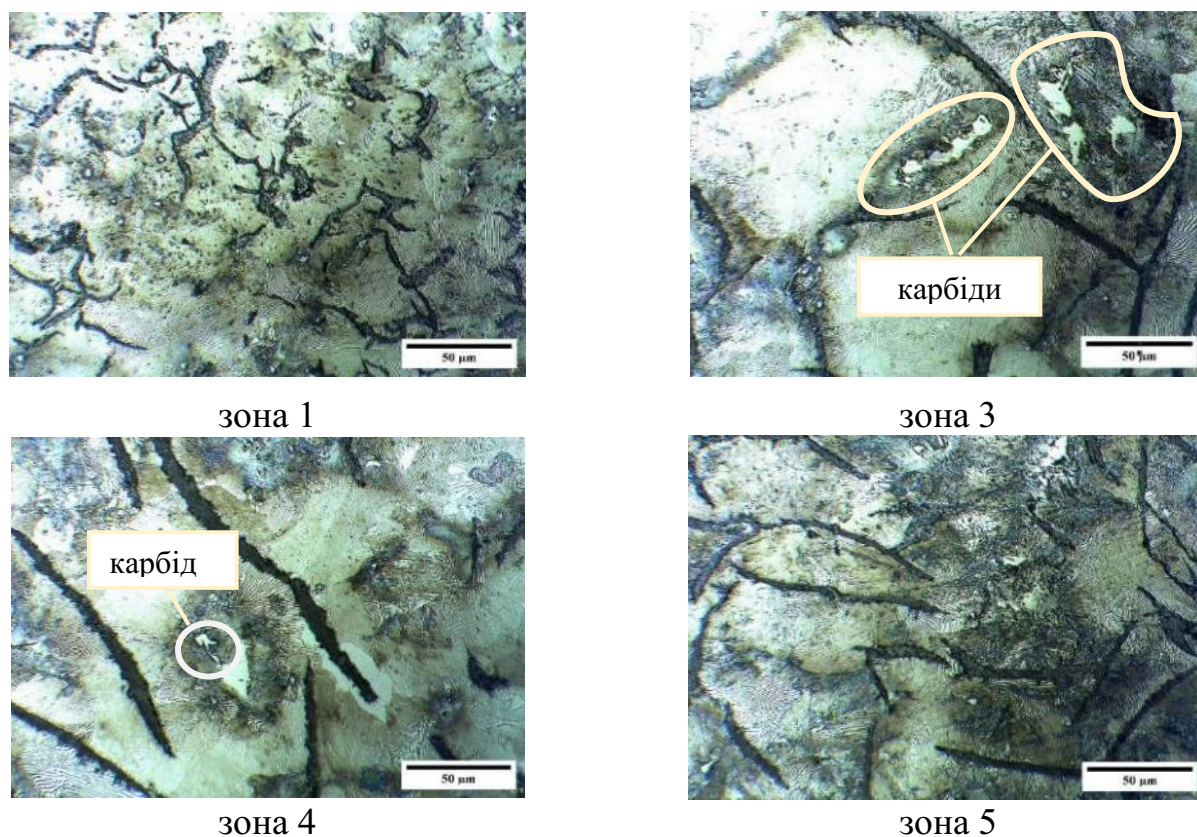
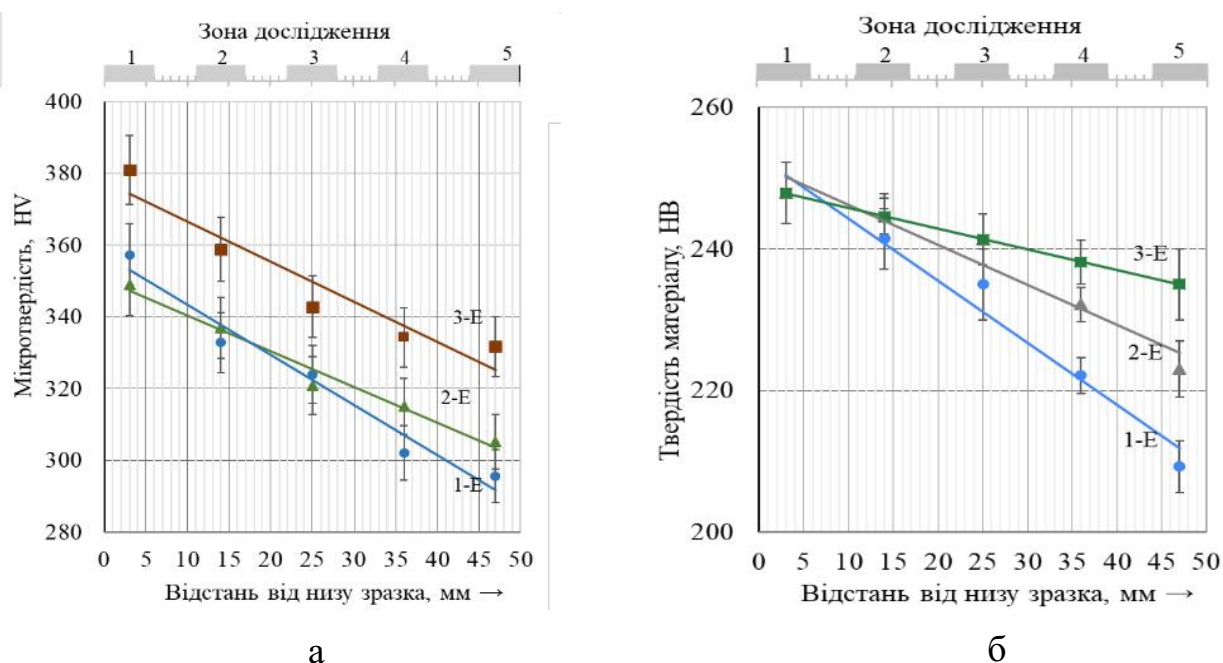


Рисунок 4.31 – Металева матриця у різних зонах зразків із чавуну 350СМХАН, які виготовлені за третім технологічним варіантом

Встановлено, що за третім технологічним варіантом, у зразках з чавуну 310СМ наявна феритна металева матриця, а зразкам з чавуну 350СМХАН – перлітна матриця. Це зумовлено домінуючою дією легувальних елементів, які перешкоджають процесу графітизації та, окрім стабілізації перліту, утворюють структурно вільні карбідні фази, що підтверджується наявністю карбідних включень (див. рис. 4.33). Встановлено, що середні розміри карбідів коливаються від 13 мкм до максимальних 312 мкм, мікротвердість карбідів – становить від 800 HV до 2000 HV (випробуванні із зусиллям  $F = 0,9807 \text{ Н}$ ). Утворення карбідних фаз у зразках з низьколегованого чавуну 350СМХАН зумовлено наявністю більшої кількості легувальних елементів – Cr, Ni, Ti, Mo, які мають здатність утворювати власні стійкі карбіди [58, 62], сприяють подрібненню зерен та графітових включень. Наявні карбідні сполуки сприяють

підвищенню твердості зразків. Дослідження за перерізом зразків демонструє, що для перлітної металевої матриці характерні високі значення мікротвердості – від 350 HV до 380 HV у зоні 1 та від 296 HV до 332 HV у зоні 5 (рис. 4.32, а). Найвищі значення мікротвердості перліту властиві зоні 5 зразка 3-Е – діапазон від 381 HV до 332 HV.

Встановлено, що в зоні 1 для всіх зразків чавуну 350СМХАН значення твердості практично тотожне та становить – 250 НВ (рис. 4.32, б). Однак за перерізом зразків, твердість від зони 2 до зони 5 змінюється, та знаходиться в проміжку від 235 НВ до 210 НВ



1-Е – холодильник товщиною 10 мм; 2-Е – холодильник товщиною 20 мм;  
3-Е – холодильник товщиною 30 мм

Рисунок 4.32 – Мікротвердість перліту (а) та твердість (б) зразків із чавуну 350СМХАН, які виготовлені за третім технологічним варіантом

Проведені експерименти за третім технологічним варіантом не дозволили отримати у виливках графіту кулястої форми, для забезпечення підвищених механічних та експлуатаційних властивостей виробу (див. підрозділ 1.14). Як відомо [53, 90], ефективним методом виробництва високоміцного чавуну із кулястою формою графіту є внутрішньоформове модифікування (inmold метод) у спеціальній



порожнині ливарної форми (реакційній камері або реакторі) магнієвмісними модифікаторами (див. підрозділ 1.15).

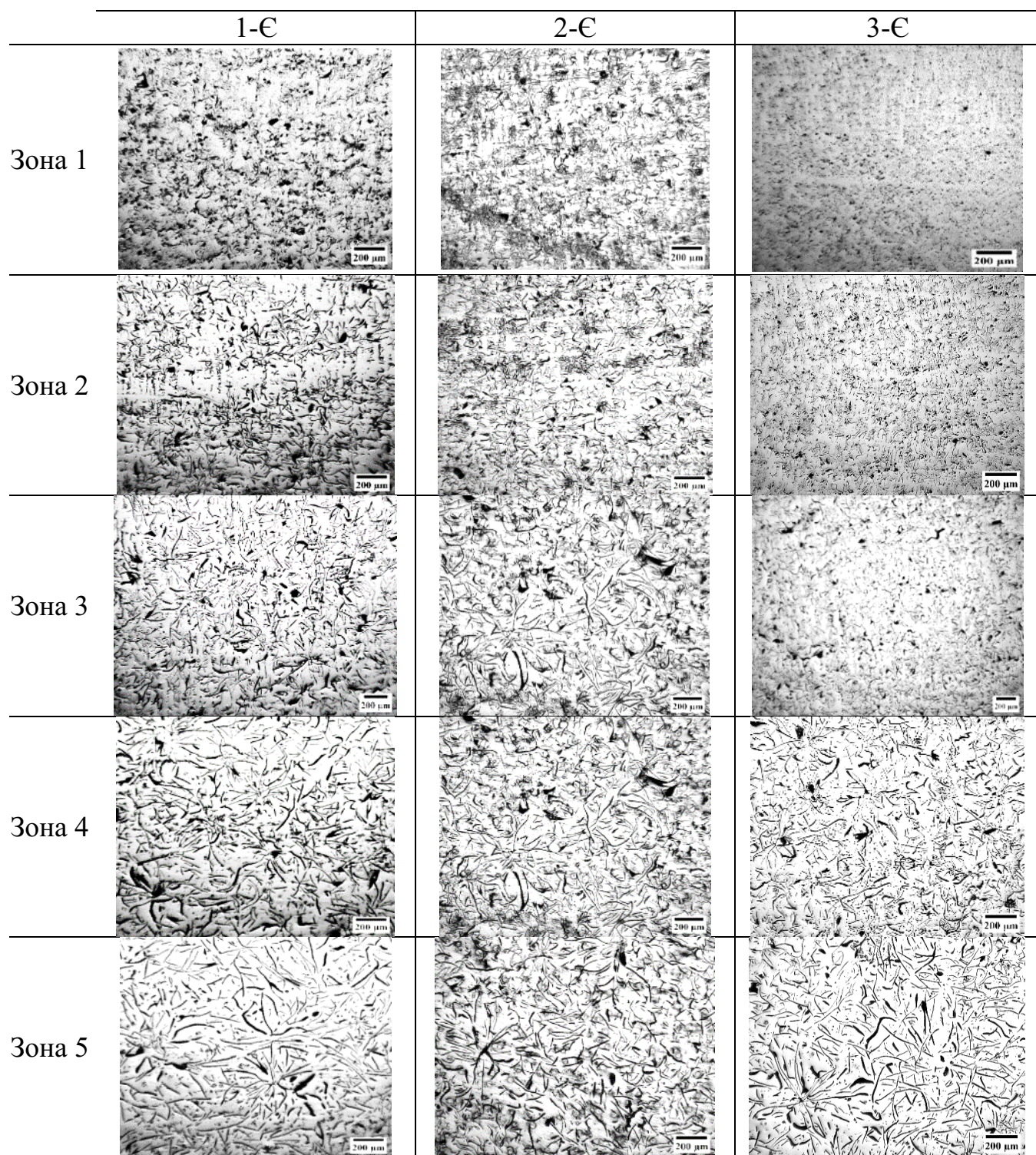
#### **4.4 Четвертий технологічний варіант – комбіноване (поступове) ковшове оброблення розплаву чавуну та внутрішньоформове модифікування із застосуванням холодильників**

З метою отримання у поверхневому шарі виливків графіту кулястої форми, додатково до ковшового оброблення інокулятором марки SB5, застосовано вторинне модифікування in mold методом за технологічною схемою відповідно до підрозділу 2.4 (див. рис. 2.3, а). В якості сфероїдизувального модифікатора використано магнієвмісну лігатуру марки VL63(M) (див. табл. 2.1), розміром частинок від 2 мм до 5 мм та у кількості 0,4 % від маси вилівка. Вибір кількості сфероїдизувального модифікатора ґрунтується на роботах [90, 93, 95] та зумовлений необхідністю формування графіту кулястої форми лише у шарі вилівка обмеженої товщини, який безпосередньо контактує із холодильником у порожнині ливарної форми. Згідно досліджень [53, 82, 90] поєднання методів модифікування, залежно від швидкості охолодження [53], сприятиме збільшенню кількості центрів кристалізації та включень графіту до 4-х разів. Поступове комбіноване оброблення ефективно вплине на формування дрібнокристалічної структури з підвищеним вмістом фериту в металевій матриці та включеннями дисперсного кулястого графіту.

##### **4.4.1 Властивості виливків із сплаву 310СМ**

У результаті дослідження металографічних зображень зразків з чавуну 310СМ, які отримані за четвертим технологічним варіантом встановлено, що форма графітових включень пластинчата (рис. 4.35), окрім зразків 3-Є.

Номер зразка



1-Є – холодильник товщиною 10 мм; 2-Є – холодильник товщиною 20 мм;

3-Є – холодильник товщиною 30 мм

Рисунок 4.33 – Металографічні зображення за зональним перерізом зразків із чавуну 310СМ, які виготовлені за четвертим технологічним варіантом



Визначено, що шар чавуну із дисперсними включеннями кулястого графіту із зони 1 зразка 3-Є переходить до включень вермикулярної форми в зоні 2, який змінюється на графіт пластинчастої форми (рис. 4.34).

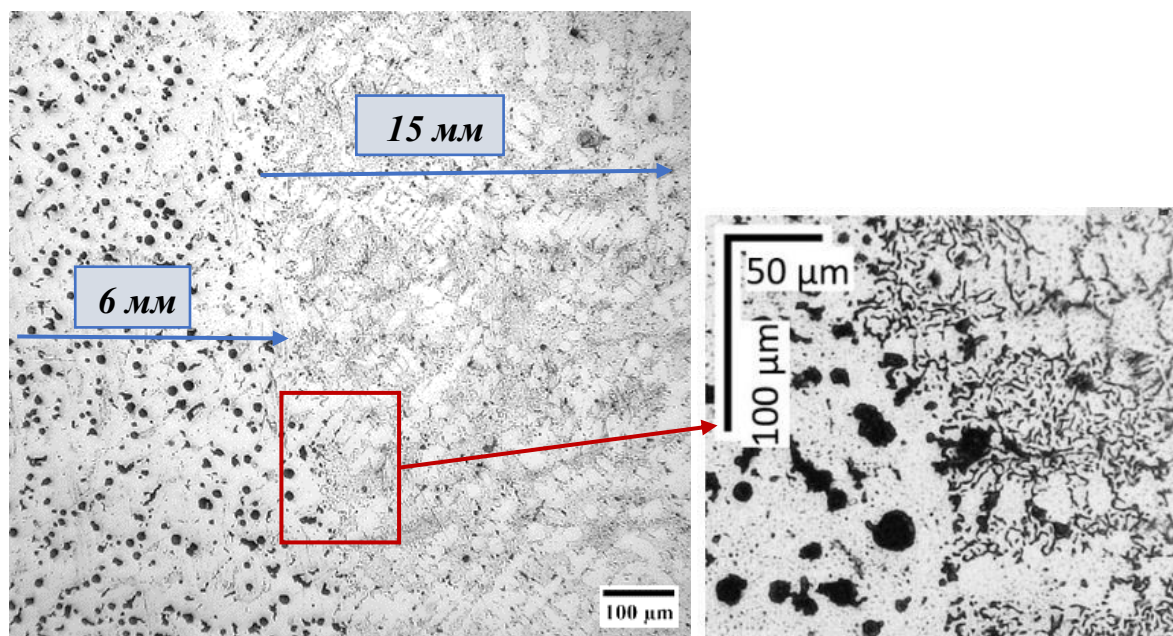


Рисунок 4.34 – Металографічне зображення зразка 3-Є із чавуну 310СМ з градієнтом морфології графітових включень, який виготовлений за четвертим технологічним варіантом

Класифікацію включень графіту в зразках проведено відповідно до [116] та встановлено наступне: кулястий графіт за формою відноситься до типу VI та переходить до вермикулярного графіту типу III, який змінюється на пластинчатий графіт за типом I. Згідно до тверджень авторів [83, 95], зміна морфології включень графіту зумовлена застосуванням модифікаторів, які запобігають вибіленню, впливають на збільшення кількості центрів кристалізації графіту та утворення дрібного кулястого графіту. Високі температури лиття забезпечують утворення дрібнорозгалуженого міждендритного розподілу вермикулярного графіту в початковій стадії кристалізації. У міру охолодження розплаву, структура трансформується від розеткового пластинчатого графіту до рівномірного (табл. 4.8).

Ця трансформація впливає на покращення теплопровідності матеріалу, що відповідно сприяє збільшенню терміну експлуатації виробу.

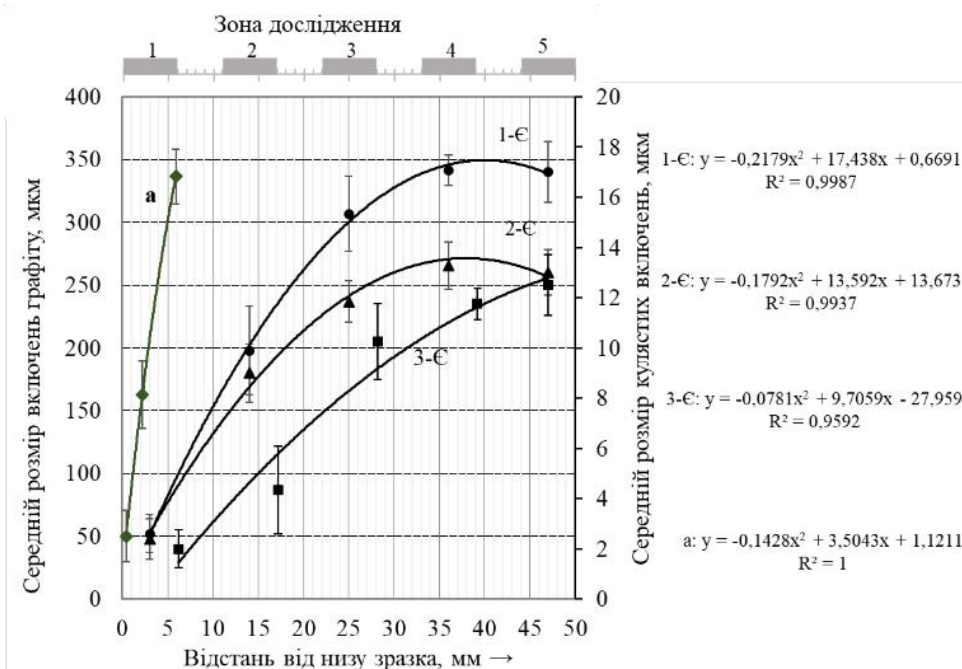
Таблиця 4.8 – Класифікація графітових включень за перерізом зразків із чавуну 310СМ, які виготовлені за четвертим технологічним варіантом

Номер зразка	Товщина холодильника, мм	Класифікація графіту за переважною ознакою					
		ознака класифікації	зона				
			1	2	3	4	5
1-Є	10	тип за формою	I	I	I	I	I
		тип за розподілом	E	B	B	B	B
2-Є	20	тип за формою	I	I	I	I	I
		тип за розподілом	E	B	B	B	C
3-Є	30	тип за формою	VI	III	I	I	I
		тип за розподілом	–	E	B	B	C

У результаті дослідження металографічних зображень зразків 1-Є та 2-Є встановлено, що в зоні 1 середні розміри включень пластинчатого графіту становить відповідно 48 мкм та 50 мкм (рис. 4.35). При цьому, за перерізом зразків розміри пластинчастого графіту поступово збільшуються до максимальних значень у зоні 4 (від 265 мкм до 340 мкм). В зоні 5 цих зразків присутнє незначне зменшення розмірів графітових включень в межах від 340 мкм до 245 мкм, що обумовлено контактом з верхньою напівформою внаслідок пришвидшеного охолодження через інтенсивне відведення тепла до навколишнього середовища. Отже, середні розміри включень графіту в зразках чавуну 310СМ менші до 1,6 разів (залежно від дослідних зон) порівняно з третім технологічним варіантом. Отже, застосування додаткового внутрішньоформового модифікування впливає на зміну морфології та покращує дисперсність графітових включень порівняно з лише ковшовим обробленням (за третім технологічним варіантом). Ключовою відмінністю є формування шару графіту кулястої форми в зразку 3-Є, який отриманий за четвертим технологічним варіантом.

Визначено, що у зоні 1 зразка 3-Є, тобто на поверхні контакту з холодильником, присутній шар завтовшки 6 мм з включеннями графіту кулястої форми, діаметром від 2 мкм до 17 мкм та з ступенем сфероїдизування в межах від 70 % до 80 %. Визначено,

що включення кулястого графіту змінюються на вермикулярну форму, товщиною шару близько 15 мм (від кінця зони 1 до зони 3). Після чого відбувається перехід до включень графіту пластинчастої форми з розмірами включень до 245 мкм (від зони 3 до зони 5). Зменшення розмірів графітових включень в усіх зразках в зоні 5 порівняно із зоною 4 обумовлено контактом розплаву чавуну з верхньою напівформою.



1-Є – холодильник товщиною 10 мм; 2-Є – холодильник товщиною 20 мм;

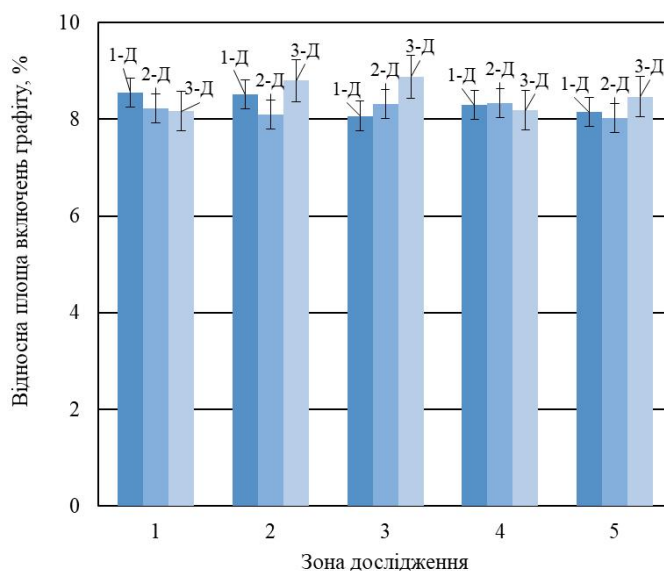
3-Є – холодильник товщиною 30 мм

Рисунок 4.35 – Середній розмір включень графіту (кулястого (а)) за перерізом зразків із чавуну 310СМ, які виготовлені за четвертим технологічним варіантом

Застосування в четвертому технологічному варіанті силікобарієвого (марки SB5) та магнієвмісного (марки VL63(M)) модифікаторів запобігає утворення вибілення та сприяє утворенню додаткових центрів кристалізації, подрібненню графітових включень, формуванню градієнту морфології графіту. Такий вплив модифікаторів підтверджується роботами [59, 61, 83, 93]. Відповідно, наявність магнію у модифікаторі VL63(M) забезпечує утворення кулястого графіту з високим ступенем сфероїдизації. Це сприяє підвищенню механічних властивостей матеріалу у робочому шарі деталі. При цьому, в міру зменшення впливу магнієвмісного

модифікатора та впливу холодильника на охолодження розплаву, структура трансформується у вермикулярний графіт та переходить до рівномірного пластинчатого графіту. Дана зміна форми та розмірів графіту ініціює тепловідведення від шару з кулястим графітом, адже кращі теплопровідні властивості характерні вермикулярному та особливо пластинчатому графіту, порівняно з шаром кулястого графіту [37].

Проаналізовано зображення мікроструктур зразків та визначено площу, зайняту графітовими включеннями (рис. 4.36). Встановлено, що за перерізом зразків відносна площа, зайнята графітом зростає від 8,1 % до 9,6 %. Рівномірне збільшення значень площі від місця контакту з холодильником (зона 1) до верхньої периферії (зона 5) спостерігаємо в зразку 3-Є – від 8,0 % до 9,6 %. Характер зміни відносної площі, яку займають графітові включення аналогічний зразкам чавуну 310СМ, які виготовлені за третім технологічним варіантом. Зразкам властива висока графітизація та однотипна структура без динамічних змін.

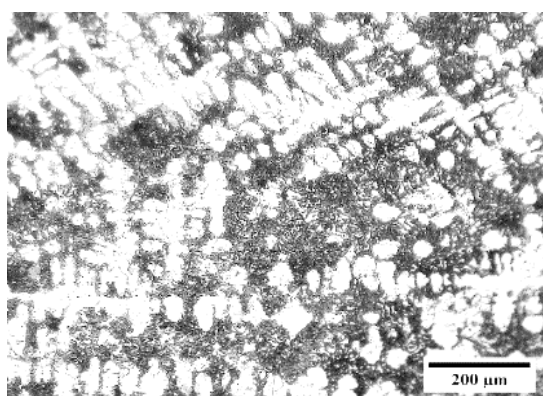


1-Є – холодильник товщиною 10 мм; 2-Є – холодильник товщиною 20 мм;  
3-Є – холодильник товщиною 30 мм

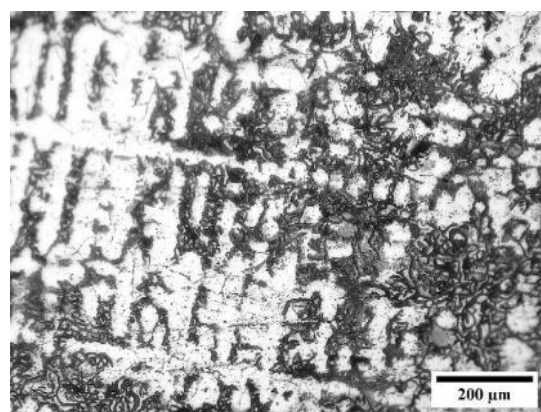
Рисунок 4.36 – Відносна площа зайнята графітом за перерізом зразків із чавуну 310СМ, які виготовлені за четвертим технологічним варіантом



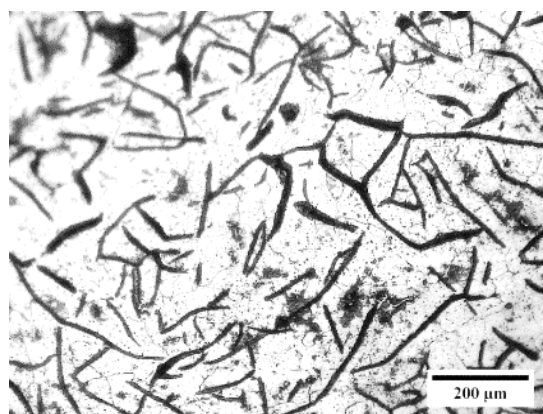
У результаті дослідження мікроструктури травлених зразків встановлено, що в зразках (1-Є, 2-Є, 3-Є) наявна повністю феритна матриця (рис. 4.37). Згідно до тверджень [37, 72, 112] феритна матриця є термодинамічно стабільною та не піддається значним структурним змінам під впливом високих температур і циклічних навантажень. Це важливо, оскільки термодинамічна стабільність матриці дозволяє зменшити ймовірність утворення дефектів у виробках внаслідок термічного або механічного впливу, зокрема тріщин.



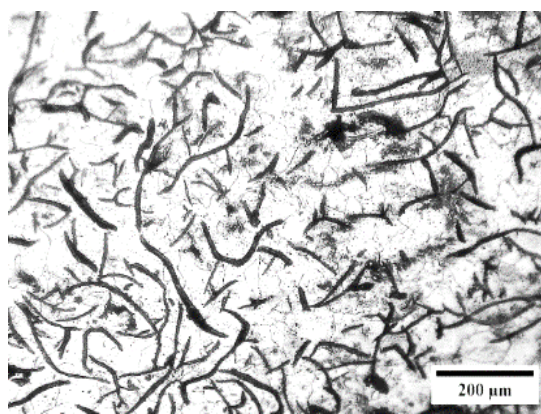
зона 1



зона 2



зона 3

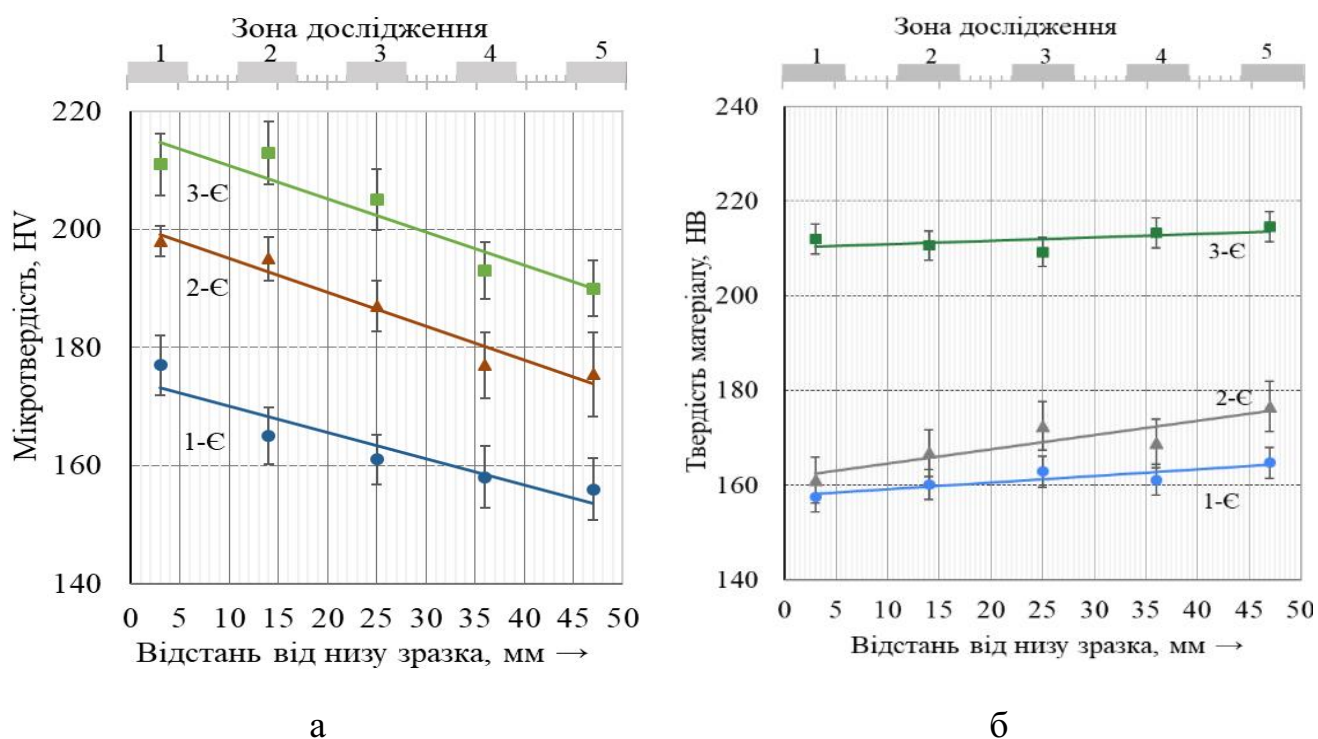


зона 5

Рисунок 4.37 – Металева матриця у різних зонах зразків із чавуну 310СМ, які виготовлені за четвертим технологічним варіантом

У результаті проведених досліджень механічних властивостей феритної матриці зразків, визначено підвищені значення мікротвердості. Значення змінюються від зони 1 в діапазоні від 210 HV до 177 HV до зони 5 – від 158 HV до 190 HV (рис. 4.38, а). Отримані показники більші в 1,6 разів (залежно від зони) за значення

виливків із сплаву 310СМ за третім технологічним варіантом. Таку відмінність можна пояснити впливом модифікаторів на подрібнення структурних складових, що відповідно, впливає на покращення мікротвердості структурних складових. Визначено твердість за Брінеллем за перерізом зразків чавуну 310СМ. Для зразка 1-Є значення становить від 158 НВ до 165 НВ, зразка 2-Є – від 160 НВ до 177 НВ, зразка 3-Є – від 210 НВ до 215 НВ (рис. 4.38, б). Значення твердості легованого фериту та характер їх розподілу за перерізом зразків свідчить про стійкість до механічного зносу, що забезпечить довговічність деталей з цього матеріалу.



1-Є – холодильник товщиною 10 мм; 2-Є – холодильник товщиною 20 мм;  
3-Є – холодильник товщиною 30 мм

Рисунок 4.38 – Мікротвердість фериту металевої матриці (а) та твердість (б) зразків із чавуну 310СМ, які виготовлені за четвертим технологічним варіантом

Варто відзначити, що показники твердості стабільної феритної структури зразків відповідають рівню твердості чавунних заготовок провідних світових виробників [9, 11, 12]. Отримана структура зразків дозволяє уникнути додаткового



термічного оброблення, а легований ферит забезпечує збільшення терміну служби деталей за рахунок стабільності та комплексу механічних властивостей [59, 83].

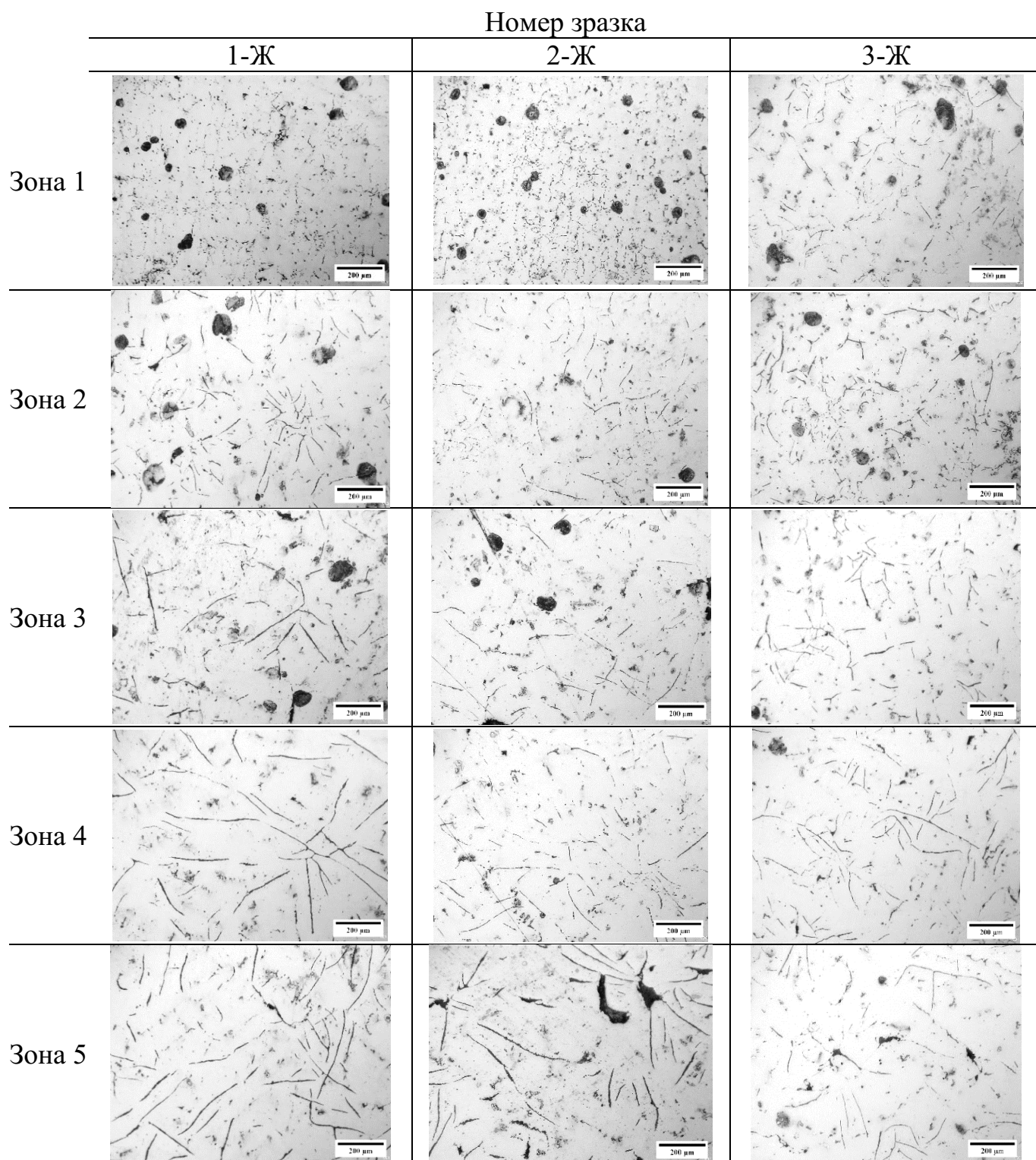
#### 4.4.2 Властивості виливків із сплаву 350СМХАН

У ході дослідження металографічних зображень зразків з сплаву 350СМХАН, встановлено наявність графіту пластинчастої форми та проведено класифікацію графітових включень (рис. 4.39).

Встановлено, що зміни розподілу включень графіту аналогічні сплаву 310СМ. Розподіл змінюється від дрібнорозгалуженого міждендритного до розеткового й переходить до рівномірного розподілу графіту (табл. 4.9). Формування такого розподілу включень графіту властиво для чавуну, виготовленого з високою швидкістю охолодження внаслідок впливу теплоакумулювальних елементів, інтенсивність впливу яких поступово зменшується за перерізом досліджених зразків.

Таблиця 4.9 – Класифікація графітових включень за перерізом зразків із чавуну 350СМХАН, які виготовлені за четвертим технологічним варіантом

Номер зразка	Товщина холодильника, мм	Класифікація графіту за переважною ознакою					
		ознака класифікації	зона				
			1	2	3	4	5
1-Ж	10	тип за формою	I	I	I	I	I
		тип за розподілом	D	B	B	B	C
2-Ж	20	тип за формою	I	I	I	I	I
		тип за розподілом	D	E	B	B	C'
3-Ж	30	тип за формою	I	I	I	I	I
		тип за розподілом	E	E	E	B	B

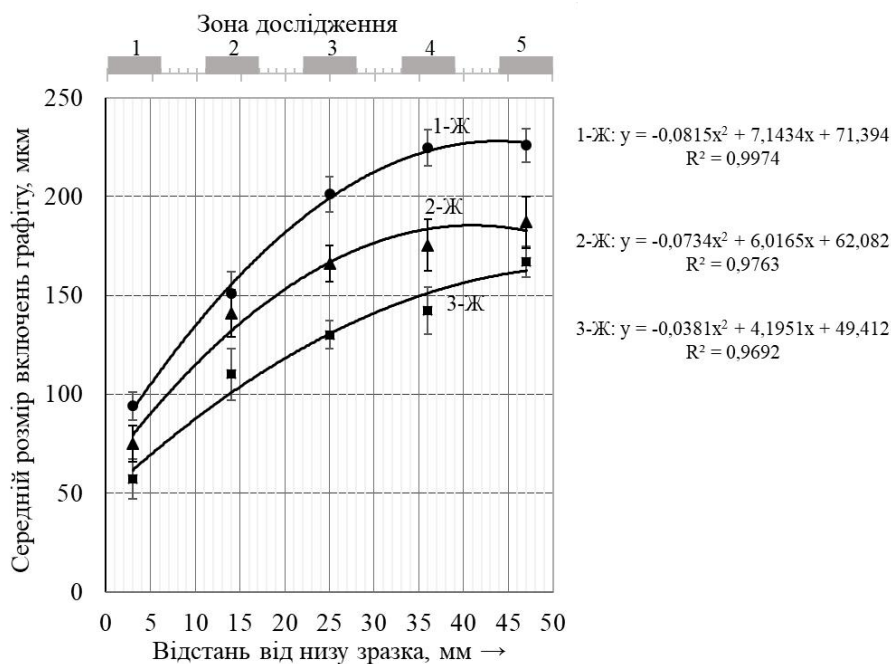


1-Ж – холодильник товщиною 10 мм; 2-Ж – холодильник товщиною 20 мм;

3-Ж – холодильник товщиною 30 мм

Рисунок 4.39 – Металографічні зображення за зональним перерізом зразків із чавуну 350СМХАН, які виготовлені за четвертим технологічним варіантом

У результаті дослідження металографічних зображень зразків визначено, що за розмірами графітові включення подібні включенням графіту в зразках зі сплаву 310СМ, які теж виготовлені за четвертим технологічним варіантом. Розміри включень змінюються від зони 1 в діапазоні від 57 мкм до 95 мкм та поступово збільшуються до зони 5 в діапазоні значень від 187 мкм до 225 мкм (рис. 4.40).



1-Ж – холодильник товщиною 10 мм; 2-Ж – холодильник товщиною 20 мм;

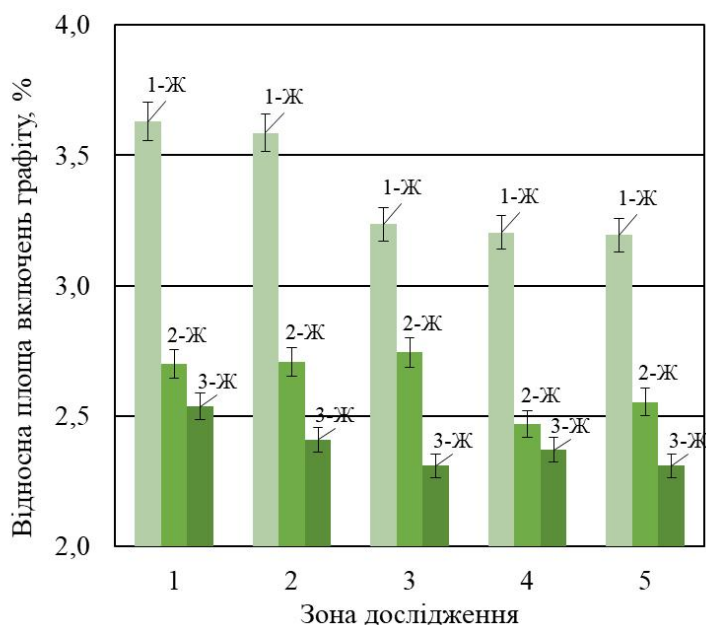
3-Ж – холодильник товщиною 30 мм

Рисунок 4.40 – Середній розмір включень графіту за перерізом зразків із чавуну 350СМХАН, які виготовлені за четвертим технологічним варіантом

Для зразка 1-Ж в зоні 5 спостерігаємо зростання розмірів графітових включень до 226 мкм, а для зразків 2-Ж та 3-Ж – до 166 мкм та 187 мкм відповідно. Такий ефект можна пояснити тим, що охолодження в цих зонах відбувається повільніше, що створює сприятливіші умови та більше часу для росту графітових включень. Характер росту графітових включень за перерізом зразків аналогічний зразкам чавуну 310СМ, які отримано за четвертим технологічним варіантом. Значення розмірів подібні лише в зоні 1, однак за подальшим зональним перерізом зразків чавуну

350СМХАН значення менші в 1,1-1,5 рази. Це свідчить про вплив легувальних елементів в складі чавуну 350СМХАН на подрібнення розмірів графіту у виливках.

Також у результаті дослідження металографічних зображень визначено площу зайняту графітовими включеннями, яка змінюється за перерізом зразків від 3,6 % до 2,3 % (рис. 4.41).



1-Ж – холодильник товщиною 10 мм; 2-Ж – холодильник товщиною 20 мм;

3-Ж – холодильник товщиною 30 мм

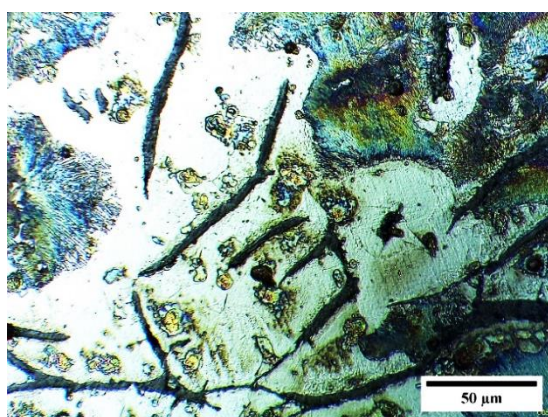
Рисунок 4.41 – Відносна площа зайнята графітом за перерізом зразків із чавуну 350СМХАН, які виготовлені за четвертим технологічним варіантом

Відносна площа, яку займають графітові включення в зразках чавуну 350СМХАН менша, порівняно зі зразками чавуну 310СМ, які теж виготовлені за четвертим технологічним варіантом – різниця становить від 5 % до 7,6 %. Характер зміни можна пояснити дією легувальних елементів на гальмування процесу графітизації, що аналогічно для зразків чавуну 350СМХАН, які виготовлені за третім технологічним варіантом (див. пункт 4.3.2).

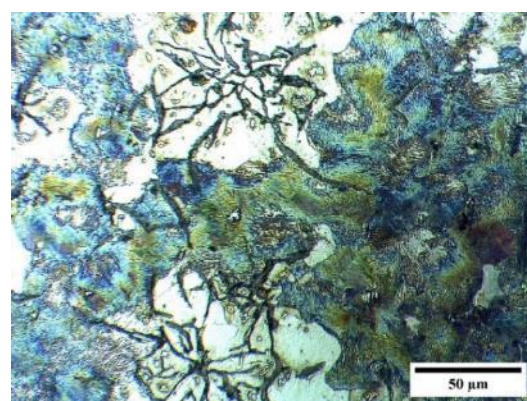
Дослідження мікроструктури за зональним перерізом травлених зразків з чавуну 350СМХАН показали, що їм характерна перлітно-феритна матриця (рис. 4.42).



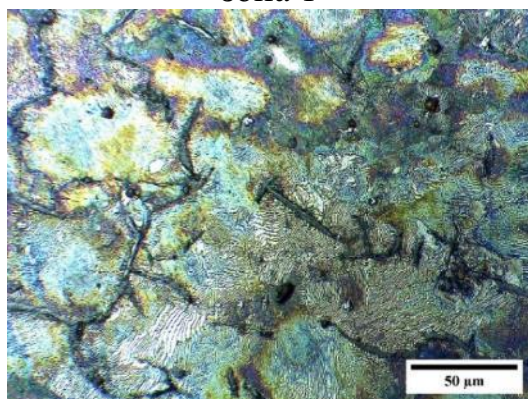
Встановлено, що для зони 1 та зони 2 властива феритна складова, що поступово переходить до переважаючої перлітної матриці в зонах 3 та 5. Порівняно з вищевказаними дослідженнями з чавуном 350СМХАН (див. пункт 4.3.2), які отримані за третім технологічним варіантом, властива виключно перлітна структура. Такі зміни можна пояснити ефективним впливом модифікування в реакційній камері на процеси феритизації та графітизації в чавуні, утворення більш дрібнодисперсної структури, що підтверджується з дослідженнями [53, 59, 83].



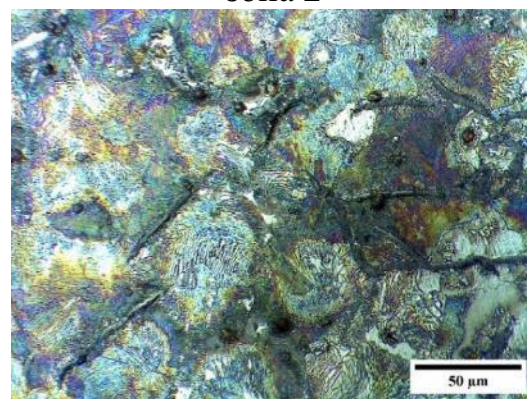
зона 1



зона 2



зона 4

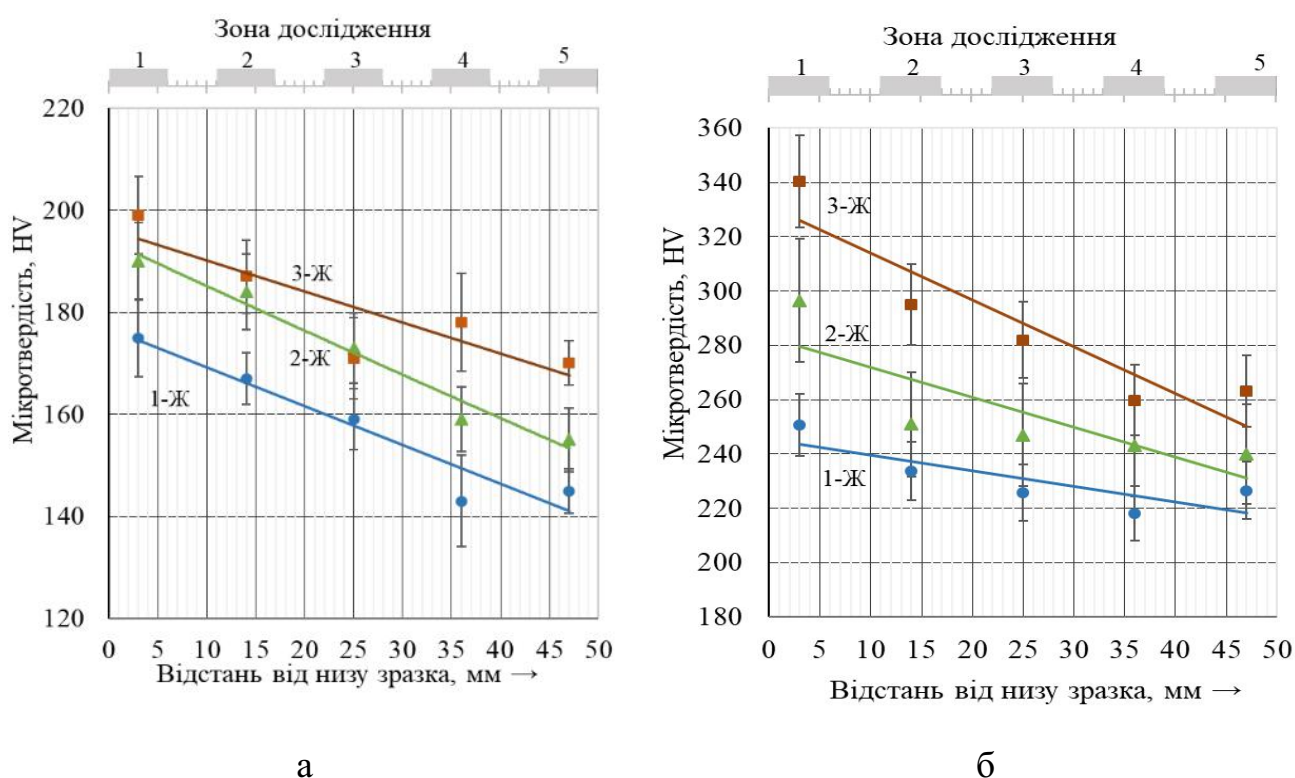


зона 5

Рисунок 4.42 – Металева матриця в різних зонах зразків із чавуну 350СМХАН, які виготовлені за четвертим технологічним варіантом

В результаті дослідження механічних характеристик визначено, що перлітно-феритна металева матриця має високі показники мікротвердості за перерізом всіх зразків. Значення перлітної складової змінюються від зони 1 в діапазоні від 340 HV до 250 HV до зони 5 в діапазоні від 263 HV до 225 HV (рис. 4.43, б). Найвищі

характеристики властиві матриці зразку 3-Ж та досягають значень від 340 HV до 263 HV. Така характеристика зумовлена інтенсивним впливом модифікаторів та холодильників на швидкість кристалізації та подрібнення зерна матриці. Мікротвердість феритної складової чавуну 350СМХАН становить від 200 HV до 145 HV (рис. 4.43, б). Значення мікротвердості знаходяться в тому ж діапазоні, що і значення зразків 310СМ, які отримані за четвертим технологічним варіантом.



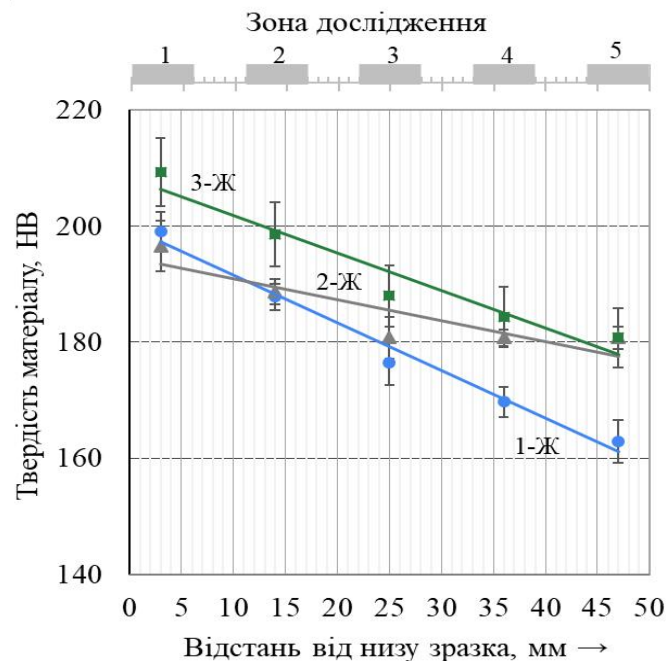
1-Ж – холодильник товщиною 10 мм; 2-Ж – холодильник товщиною 20 мм;  
3-Ж – холодильник товщиною 30 мм

Рисунок 4.43 – Мікротвердість фериту (а), перліту (б) зразків із чавуну 350СМХАН, які виготовлені за четвертим технологічним варіантом

У ході дослідження твердості за Брінеллем за перерізом зразків встановлено, що значення змінюються від зони 1 в межах від 200 HV до 210 HV до зони 5 – від 163 HV до 180 HV (рис. 4.44).

Однією з ключових особливостей результатів апробації четвертого технологічного варіанту є отриманий градієнт структури у вигляді зміни від шару

чавуну з дрібнодисперсними включеннями кулястого графіту до вермикулярного, який переходить у пластинчастий та збільшується у розмірах за перерізом вилівка. З огляду на результати, саме комбінація ковшового та внутрішньоформового оброблення розплаву в четвертому технологічному варіанті сприяє утворенню підвищеного вмісту фериту в металевій матриці та додаткових центрів кристалізації для формування дрібнокристалічної структури й включень графіту різної форми. Дієвість застосування комбінованого методу підкріплюється твердженнями авторів [53, 82, 90].



1-Ж – холодильник товщиною 10 мм; 2-Ж – холодильник товщиною 20 мм;

3-Ж – холодильник товщиною 30 мм

Рисунок 4.44 – Твердість за перерізом зразків із чавуну 350СМХАН, які виготовлені за четвертим технологічним варіантом

Отриманий тип та розмір включень графіту дозволяє стверджувати про зміну теплофізичних властивостей матеріалу за перерізом вилівка. Отже, теплофізичні властивості отриманих виливків, а саме температуропровідність, потребують детальнішого дослідження. Визначення коефіцієнту температуропровідності



матеріалу в різних шарах дозволить оцінити швидкість відведення тепла за перерізом виливків.

#### **4.5 Визначення коефіцієнтів температуропровідності зразків дослідних чавунів**

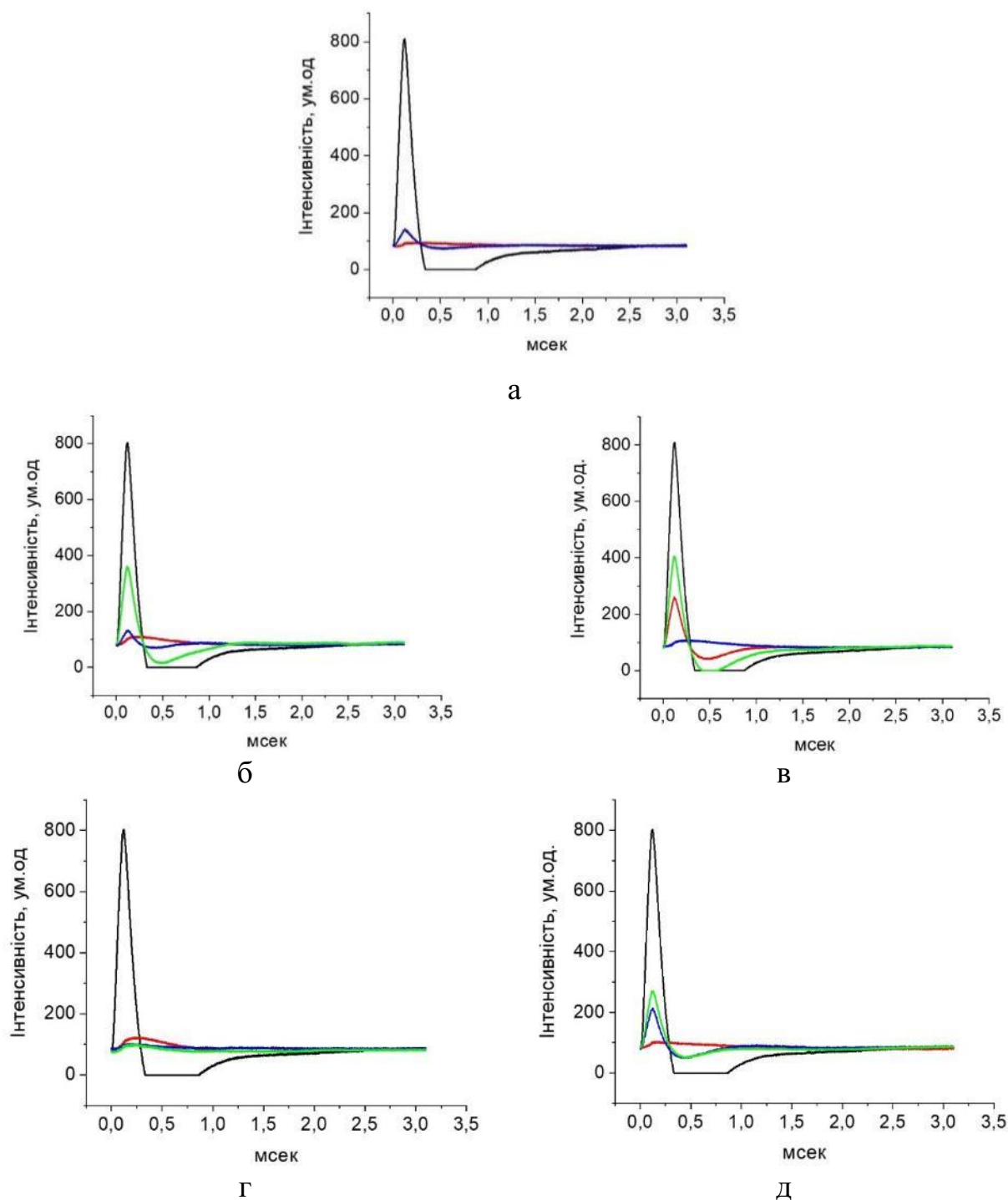
Показники теплових властивостей різних чавунів залежать від характеристики структури виливків. Відповідно до тверджень [118], теплові властивості у сірому чавуні із пластинчастою формою графіту впливає морфологія та розміри включень графіту, а також наявність окремих структурних складових металевої матриці. Наприклад, зі збільшенням розмірів та кількості графітових включень теплові властивості чавуну зростають [118]. На покращення теплових властивостей чавунів впливає наявність термостабільної металевої матриці, наприклад фериту [118]. Зменшення кількості та розмірів графітових включень, наявність перліту у структурі знижують теплові властивості чавуну.

На основі викладеного методу (пункт 2.7.1) досліджено зразки, які отримані за третім та четвертим технологічними варіантами з використанням холодильників товщиною 30 мм – відповідно зразки 3-Д, 3-Е 3-Є, 3-Ж. Вказані зразки мають найбільш виражені градієнтні властивості структури.

Відповідно до вимог щодо геометричних розмірів зразків (див. рис. 2.6, а), для досліджень температуропровідності зразки вирізали за умови максимального збереження їх структури, тобто без перегрівання (див. підрозділ 2.5). Основну увагу приділено саме тим зонам зразків, які мають характерно виражені структурні зміни – зоні 1, 3 та 5. Також отримані показники порівнювали зі значеннями зразків вирізаних із гомогенного чавунного В.З..

За ІМВТ проведено вимірювання інтенсивності теплового імпульсу, який проходив через чавунні зразки, отримано графіки зміни теплових потоків у часі для зразків з В.З. та чавунів 310СМ, 350СМХАН (рис. 4.45). Варто зазначити, що зсув у часі теплового потоку через повітря для усіх вимірювань був однаковим і складав

$\tau_n=0,12$  с. При цьому зсув у часі теплового імпульсу через чавунні зразки змінювався відповідно до їх структури.



а – чавун В.З.; б – зразок 3-Є; в – зразок 3-Д; г – зразок 3-Ж; д – зразок 3-Е

Рисунок 4.45 – Графіки зміни теплових потоків у часі для зразків з чавунів В.З., 310СМ та 350СМХАН

Використовуючи формулу (2.10) та значення товщин зразків, розраховано коефіцієнти теплопровідності ( $\chi$ ) для кожного зі зразків (табл. 4.10).

Таблиця 4.10 – Коефіцієнти теплопровідності зразків з чавунів В.З., 310СМ і 350СМХАН

Чавун	Номер зразка	Коефіцієнт теплопровідності $\chi \cdot 10^{-5}$ , м <sup>2</sup> /с		
		дослідна зона		
		зона 1	зона 3	зона 5
310СМ	3-Є	1,5	4,5	4,5
	3-Д	1,1	3,5	4,5
350СМХАН	3-Ж	1,5	2,3	2,2
	3-Е	1,3	1,4	1,5
В.З.	-	3,6	3,6	3,6

У результаті аналізу отриманих даних теплопровідності дослідних зразків встановлено, що коефіцієнт теплопровідності гомогенної структури чавуну з В.З. є сталим за перерізом зразка та становить  $3,6 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup> / с (рис. 4.46).

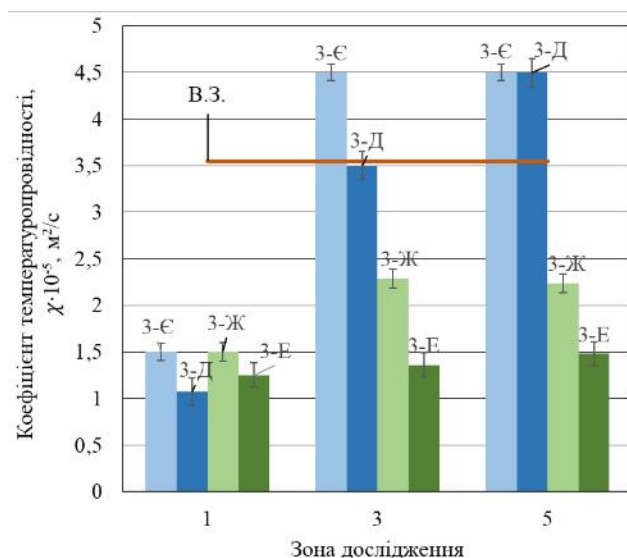


Рисунок 4.46 – Показники коефіцієнтів теплопровідності для зразків чавуну з В.З., 310СМ (3-Є, 3-Д) і 350СМХАН (3-Ж, 3-Е)

Найменші показники коефіцієнтів температуропровідності від  $1,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с}$  до  $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с}$  характерні за перерізом зразка 3-Е з чавуну 350СМХАН, який виготовлено за третім технологічним варіантом. Варто зазначити, що металева матриця зразка 3-Е повністю перлітна, яка характеризується як нестабільна за температурного впливу та з вмістом карбідних сполук. Наявність карбідних фаз зумовлено впливом легувальних елементів, які за твердженнями дослідників [118-120], спричиняють зменшення теплових характеристик чавуну. Зразкам 3-Ж з чавуну 350СМХАН, які теж виготовлені за третім технологічним варіантом, властиві підвищені значення коефіцієнтів температуропровідності порівняно із зразками 3-Е – в діапазоні від  $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с}$  до  $2,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с}$ . В зразках 3-Ж присутня перлітно-феритна металева матриця без карбідних сполук. Тому наявність термодинамічно стабільного фериту зумовлює підвищені значення температуропровідності.

Встановлено, що для дослідних зразків 3-Є та 3-Д властиві високі коефіцієнти температуропровідності, порівняно зі зразками 3-Е та 3-Ж. Значення коефіцієнтів температуропровідності в зоні 1 зразків 3-Є та 3-Д сягають до  $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с}$  та  $1,1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с}$  відповідно. Отримані значення нижчі за значення В.З. –  $3,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с}$ . Однак, за перерізом зразків в зоні 3 та 5 значення коефіцієнтів температуропровідності зростають до  $4,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с}$  для зразків 3-Є та до значень  $3,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с}$  і  $4,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с}$  відповідно – для зразків 3-Д. Градієнт значень температуропровідності для зразків зумовлений зміною морфології пластинчатих графітових включень за перерізом зразків 3-Д. Відповідно, градієнт температуропровідності за перерізом зразка 3-Є зумовлений зміною морфології включень графіту від кулястої до вермикулярної форми, а значення стабілізуються в зоні 3 внаслідок переходу до графіту пластинчастої форми.

Варто врахувати, що на теплові властивості зразків має вплив вид металевої матриці. Для зразків 3-Є та 3-Д металева матриця повністю складається з термодинамічно стабільного фериту. Наявність феритної матриці відіграє важливу роль для покращення теплофізичних властивостей матеріалу. Відповідно до тверджень авторів [37, 118], за температури 300 К теплопровідність чистого фериту

становить  $80 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ , легованого фериту – залежно від виду чавуну знаходиться в діапазоні від  $20 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$  до  $40 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ . Також значення теплопровідності свідчать про те, що вміст легувальних елементів на теплові характеристики мають суттєвий вплив [118].

З огляду на дослідження, поєднання зміни морфології включень графіту та матриці характеризують теплові властивості за перерізом зразків 3-Д та 3-Є. Поступове тепловідведення відбувається за перерізом зразків 3-Є, яким властива виражена градієнтна структура. Відведення тепла від шару включень кулястого графіту здійснюється через проміжний шар включень графіту вермикулярної форми до включень пластинчатого графіту. Відповідно, включення пластинчатого графіту в чавуні забезпечують найкращі умови для відведення тепла [67, 118, 119]. Отримані значення дозволяють стверджувати, що за перерізом виливків з чавуну 310СМ, які отримані за четвертим технологічним варіантом (комбіноване оброблення чавуну з литтям розплаву на холодильник товщиною 30 мм), властиві градієнтна структура та властивості. Це зумовлено зміною морфології графітових включень, значень мікротвердості та зміною значень коефіцієнтів температуропровідності за перерізом виливків. Виливки з чавуну 310СМ з градієнтною структурою та властивостями можуть бути рекомендованими для деталей, які працюють в умовах впливу циклічних термомеханічних навантажень, особливо для форм, які входять до формокомплекту склотарного виробництва.

#### **Висновки до розділу 4**

1. У результаті дослідження позапічного оброблення чавунів 310СМ та 350СМХАН встановлено закономірності формування фізико-механічних властивостей заготовок та раціональність застосування окремих технологічних прийомів для формування градієнтної структури у виливках.

2. Встановлено вплив першого технологічного варіанту (поверхневе оброблення силікобарієвим інокулятором (марки SB5) фракцій 0,315 мм, 0,4 мм та 0,63 мм) на формування властивостей виливків з чавунів 310СМ та 350СМХАН.

Використання поверхневого оброблення інокулятором із розміром фракції 0,315 мм в першому технологічному варіанті забезпечує утворення найбільш дрібнодисперсних графітових включень за перерізом виливка.

3. Визначено, що поверхнєве оброблення інокулятором різних фракцій не забезпечує феритизацію структури металевої матриці за перерізом виливка у литому стані. В першому технологічному варіанті максимальний вміст фериту в феритно-перлітній матриці отримано при використанні інокулятора фракції 0,63 мм (до 95 %).

4. Встановлено, вплив другого технологічного варіанту (поверхнєве оброблення інокулятором марки SB5 фракції 0,315 мм та застосування холодильників з СЧ200 товщинами 10 мм, 20 мм та 30 мм у нижній порожнині ливарної форми) на формування властивостей виливків з чавунів 310СМ та 350СМХАН. Застосування холодильників товщинами в другому технологічному варіанті має позитивний вплив на формування дрібнодисперсної структури в місці контакту розплаву з холодильниками. Середні розміри графітових включень за перерізом виливків менші до 2,5 разів (залежно від зони) порівняно із значеннями зразків, які отримані за першим технологічним варіантом. Застосування холодильників підсилює ефект градієнту структурних складових у вигляді вираженої зональної зміни розподілу графітових включень. Мікротвердість фериту в феритно-перлітній матриці чавуну 310СМ сягає до 218 HV. Мікротвердість перлітної складової металевої матриці чавунів 310СМ і 350СМХАН становить до 350 HV та 337 HV відповідно.

5. Встановлено, що застосування першого та другого технологічних варіантів за перерізом виливків із чавунів 310СМ і 350СМХАН забезпечує зміну пластинчатого графіту за розміром. Однак, у виливках наявна перлітна, перлітно-феритна або феритно-перлітна металева матриця, залежно від конкретних умов кристалізації. В умовах впливу високої температури, а особливо в умовах нагрівання-охолодження матеріалу, перлітна складова характеризується фазовими перетвореннями внаслідок яких утворюються термічні напруження, зокрема тріщини.

6. Встановлено вплив третього технологічного варіанту, який полягає в ковшовому обробленні чавунів силікобарієвим інокулятором (марки SB5) та розливанні розплаву на холодильники з СЧ200 товщинами 10 мм, 20 мм та 30 мм.

Встановлено, що третій технологічний варіант, порівняно з другим технологічним варіантом, інтенсивніше впливає на процеси кристалізації, структуроутворення та графітизацію за рахунок повноцінного проходження процесу оброблення сплаву складовими інокулятора. За перерізом виливків із чавунів 310СМ та 350СМХАН отримано зональну зміну розмірів графітових включень від дрібних до крупних. Середні розміри графітових включень за перерізом зразків менші в 1,5-1,8 рази (залежно від зони) порівняно із значеннями зразків, які отримані за другим технологічним варіантом.

7. За третім технологічним варіантом у литому стані отримано виливки з чавуну 310СМ з феритною матрицею та з чавуну 350СМХАН з перлітною матрицею. Особливістю застосування третього технологічного варіанту є повна феритизація металевої матриці виливків з чавуну 310СМ з підвищеними значеннями мікротвердості легованого фериту до 185 НV та значеннями твердості за Брінеллем за перерізом виливків до 170 НВ.

8. Встановлено вплив на формування властивостей виливків четвертого технологічного варіанту, який полягає в комбінації ковшового оброблення чавунів силікобарієвим інокулятором (марки SB5) та внутрішньоформове модифікування магнієвмісним модифікатором (марки VL63(M)) з литтям на холодильники з СЧ200 товщинами 10 мм, 20 мм та 30 мм. Оброблення чавунів 310СМ та 350СМХАН за четвертим технологічним варіантом вплинуло на покращення дисперсності графітових включень до 1,6 разів в поверхневій зоні виливків, порівняно з третім технологічним варіантом. Визначено, що застосування четвертого технологічного варіанту сприяє повній феритизації матриці виливків із чавуну 310СМ та утворенню перлітно-феритної матриці виливків з чавуну 350СМХАН.

9. Визначено, що в зразках із чавуну 350СМХАН, які отримані за всіма технологічними варіантами (від першого до четвертого), відносна площа, зайнята графітовими включеннями приблизно в 2 рази менша порівняно з чавуном 310СМ. Це свідчить про вплив легувальних елементів в складі чавуну 350СМХАН на гальмування процесів графітизації.



10. Встановлено, що особливістю застосування четвертого технологічного варіанту для чавуну 310СМ є формування за перерізом виливків феритної матриці, градієнтної структури та властивостей. Градієнт графітових включень за перерізом виливків полягає у зміні морфології: шар завтовшки до 6 мм дрібнодисперсного графіту кулястої форми з ступенем сфероїдизації від 70 % до 80 % та діаметром включень від 2 мкм до 17 мкм, переходить до вермикулярного графіту товщиною шару до 15 мм, який змінюється на графіт пластинчастої форми розміром включень до 245 мкм. Значення мікротвердості за перерізом зразків з градієнтом морфології графіту підвищені (від 210 HV до 190 HV), порівняно з зразками, які отримані за третім технологічним варіантом. Підвищені значення мікротвердості можна пояснити наявністю легованого фериту, який сприяє покращенню стійкості матеріалу.

11. Визначено, що коефіцієнти температуропровідності зразків з чавунів 350СМХАН мають нижчі значення від аналогічних показників чавуну В.З. та особливо чавуну 310СМ. Низькі показники зразків 350СМХАН зумовлені наявністю термодинамічно нестабільної перлітної складової металевої матриці.

12. Визначено, що найкраще поєднання коефіцієнтів температуропровідності та градієнту структури наявне за перерізом виливків з чавуну 310СМ, які виготовлені за четвертим технологічним варіантом (комбіноване (поступове) позапічне оброблення розплаву та його заливання на чавунний холодильник товщиною 30 мм). Встановлено, що коефіцієнти температуропровідності таких виливків у середньому на 26 % вищі за показники гомогенного чавуну В.З.. Рекомендовано, щоб шар включень кулястого графіту знаходився на поверхні деталі, яка найбільше піддається термомеханічному впливу. Відведення тепла від включень кулястого графіту відбуватиметься крізь шар вермикулярного до пластинчатого графіту, де останньому характерні підвищені показники температуропровідності.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. За результатами аналізу бази даних чавунів, які застосовують для формокомплекту склотарного виробництва, сумісно з дослідженням літературних джерел щодо впливу хімічних елементів на властивості матеріалів (термостійкість, жаростійкість, теплопровідність, міцність формувальних поверхонь), було визначено дослідний хімічний склад низьколегованих чавунів з підвищеним вмістом Si для роботи в умовах інтенсивної дії циклічних температурних навантажень:

а) чавун 310СМ – від 3,05 % до 3,24 % С, від 3,14 % до 3,54 % Si, від 0,50 % до 0,70 % Мо, до 0,8 % Мп;

б) чавун 350СМХАН – від 3,30 % до 3,60 % С, від 1,75 % до 2,60 % Si, від 0,50 % до 0,70 % Мо, від 0,30 % до 0,80 % Cr, від 0,60 % до 1,50 % Al, від 0,20 % до 0,50 % Ni, від 0,10 % до 0,15 % Ti, до 0,8 % Мп.

2. За результатами диференційно-термічного аналізу під час нагрівання матеріалу визначено, що температури початку фазових перетворень дослідних чавунів 310СМ та 350СМХАН перевищують значення температури початку фазових перетворень зразка з В.З. на 31,9 °С та 17,7 °С відповідно. Це свідчить про підвищену стійкість дослідних матеріалів до термічних навантажень. Визначено, що температури початку фазового перетворення матеріалів 310СМ та 350СМХАН знаходяться в діапазоні робочих температур формокомплекту, оскільки температура, до якої нагрівається формувальна поверхня форми становить від 470 °С до 550 °С залежно від виду скла.

3. Визначено, що після випробувань за температури  $1000 \pm 20$  °С показники жаростійкості дослідних чавунів 310СМ та 350СМХАН знаходяться на рівні або ж кращі порівняно з показниками чавуну В.З., що у відсоткових значеннях становить: окалиностійкість – 310СМ на 4,2 % та 350СМХАН – на 1,8 %; ростостійкість – 310СМ на рівні В.З. та 350СМХАН на 4 %; термостійкість – 310СМ на 5,5 % та 350СМХАН на 9 %. Такі значення дозволяють стверджувати, що дослідні чавуни мають підвищену стійкість до утворення окалини, росту та тріщин на поверхні й всередині зразків, порівняно з чавуном В.З..

4. Встановлено, що застосовування першого та другого технологічних варіантів виготовлення виливків з чавунів 310СМ та 350СМХАН, забезпечує поступову зміну розмірів графітових включень пластинчастої форми за перерізом виливків. Однак у виливках наявна перлітна, перлітно-феритна або феритно-перлітна металева матриця, залежно від конкретних умов кристалізації, яка є нестабільною до фазових перетворень в умовах температурного впливу. Перший технологічний варіант полягає у поверхневому обробленні силікобарієвим інокулятором (марки SB5) фракцій 0,315 мм, 0,4 мм та 0,63 мм, а другий технологічний варіанти полягає в поверхневому обробленні силікобарієвим інокулятором (марки SB5) фракцій 0,315 мм, з литтям розплаву на холодильники з СЧ200 товщинами 10 мм, 20 мм та 30 мм.

5. Встановлено, що застосовування третього (ковшове оброблення силікобарієвим інокулятором (марки SB5)) та четвертого (комбінація ковшового оброблення інокулятором марки SB5 та внутрішньоформового модифікування модифікатором марки VL63(M)) технологічних варіантів оброблення чавуну 310СМ та застосування для обох варіантів розливання розплаву на холодильники СЧ200 товщинами 10 мм, 20 мм та 30 мм, сприяють дисперсності графітових включень за перерізом виливків та утворенню повністю феритної металевої матриці у литому стані з підвищеними значеннями мікротвердості до 210 HV. Встановлено, що легована феритна металева матриця покращує теплофізичні властивості матеріалу, оскільки є термодинамічно стабільною та сприяє покращенню експлуатаційної стійкості деталей до утворення дефектів внаслідок термічного або механічного впливу.

6. Встановлено, що застосування комбінованого позапічного оброблення розплаву (інокулятором SB5 розміром фракції від 2 мм до 6 мм у кількості 0,5 % від маси розплаву у ковші та сфероїдизувальним модифікатором VL63(M) розміром фракції від 2 мм до 5 мм у реакційній камері ливникової системи у кількості 0,4 % від маси виливка) та його заливання на холодильник із чавуну марки СЧ200 товщиною 30 мм (розміщений у нижній частині робочої порожнини ливарної форми) сприяє утворенню градієнтної структури за перерізом виливка з чавуну 310СМ. При цьому,

градієнт структури має наступний механізм зміни морфології графітових включень від поверхні виливка: графіт кулястої форми товщиною шару до 6 мм (ступінь сфероїдизації форми від 70 % до 80 %, діаметр включень від 2 мкм до 17 мкм) переходить до вермикулярного графіту товщиною шару до 15 мм, який змінюється на включення графіту пластинчастої форми (середній розмір включень до 245 мкм).

7. Встановлено, що за перерізом виливків з чавуну 310СМ, які отримані за четвертим технологічним варіантом з використанням холодильника товщиною 30 мм, характерні найкращі значення коефіцієнтів теплопровідності. Продемонстровано, що для вказаних виливків показники коефіцієнтів теплопровідності вищі на 26 % порівняно з чавуном В.З. та з чавуном 350СМХАН, який виготовлено за четвертим технологічним варіантом.

8. Визначені градієнтна структура і властивості забезпечують високі зносостійкість та теплопровідність за перерізом виливків із чавуну 310СМ. Зносостійкість матеріалу забезпечується шаром кулястого графіту на поверхні виливка. Ефективне та поступове тепловідведення за перерізом виливка відбувається внаслідок того, що тепло від поверхневого шару з кулястим графітом передається до проміжного шару з вермикулярним графітом, і відводиться крупними включеннями графіту пластинчастої форми. Відповідно, такий комплекс властивостей виливків сприяє підвищенню експлуатаційного ресурсу деталей, які працюють в умовах впливу циклічного термічного та механічного навантаження.

9. Представлені результати поповнили теоретичну та практичну бази навчальної дисципліни «Виробництво виливків із чавуну» (Додаток Б) та можуть мати прикладне значення для підприємств-виробників деталей формокомплекту склотарної галузі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] "Eastern European Association of the Greens – We create our heritage," All in plastic – Eastern European Association of the Greens, [Online]. Available: <https://eea-greens.org/2019/05/16/all-in-plastic/> [Accessed: 23 Nov. 2021].
- [2] Laurent C. M. Lebreton, Joost van der Zwet, Jan-Willem Damsteeg, Boyan Slat, Anthony Andrady and Julia Reisser, "River plastic emissions to the world's oceans," *Nature Communications*, vol. 15611, no. 8, 2017. <https://doi.org/10.1038/ncomms15611>
- [3] C. Ingrao, C. Saja and P. Primerano, "Application of Life Cycle Assessment to chemical recycling of post-use glass containers on the laboratory scale towards circular economy implementation," *Journal of Cleaner Production*, vol. 307, p. 127319, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127319>
- [4] «ВУЕ» Україна: скляна промисловість, [Онлайновий]. Доступно: <https://vue.gov.ua/Україна: скляна промисловість> [Дата звернення: 16 Січ. 2022].
- [5] Т. А. Сірик, «Скляна тара – один із перспективних видів багаторазової упаковки» *Вісник Сумського державного університету. Серія Економіка*, № 3, с. 49-57, 2011.
- [6] "FEVE" Glass Packaging Industry - FEVE, [Online]. Available: <https://feve.org/glass-industry/> [Accessed: 28 Jan 2022].
- [7] «Державний комітет статистики України,» [Онлайновий]. Доступно: <https://ukrstat.gov.ua> [Дата звернення: 14 Січ. 2022].
- [8] «Асоціація Підприємств Скляної Промисловості "Скло України"» [Онлайновий]. Доступно: <https://www.sklo.kiev.ua/> [Дата звернення: 09 Лип. 2022].
- [9] "Home - Unitedcastbar -Products-materials," [Online]. Available: <https://www.unitedcastbar.com/es/products-materials/unibar-250/>. [Accessed: 17 Feb. 2023].

- [10] "Droigk Formenbau - FORMGEBENDE WERKZEUGE FÜR DIE GLASINDUSTRIE," [Online]. Available: <https://www.droigk-formenbau.de/>. [Accessed: 22 Jun.2023].
- [11] "Fonderie Valdelsane," Fonderie Valdelsane. Products. Materials, [Online]. Available: <https://www.fonderievaldelsane.com/materials/>. [Accessed: 23 Nov. 2022].
- [12] "FIMA-OLIMPIA Fonderie," Fima Olimpia Fonderie Spa. Glass sector. Cast iron, [Online]. Available: [http://www.fimaolimpia.it/en/area-vetro\\_ghise.php](http://www.fimaolimpia.it/en/area-vetro_ghise.php). [Accessed: 02 Dec. 2022].
- [13] "Italian Glass Moulds S.r.l.," Prodotti-Italian Glass Moulds, [Online]. Available: <https://www.iglassmoulds.com/it/prodotti> [Accessed: 26 Apr. 2024].
- [14] "HOME - Bottero," E-MOC Technology - Bottero, [Online]. Available: <https://www.bottero.com/e-moc-technology> [Accessed: 01 Mar. 2023].
- [15] "Aegg - Creative Packaging - Aegg Creative Packaging," Technical Article on Glass Moulds within the Glass Packaging Production Process, [Online]. Available: <https://www.aegg.co.uk/blog/news/item/technical-article-on-glass-moulds-within-the-glass-packaging-production-process> [Accessed: 02 Mar. 2024].
- [16] А. Устименко та І. Лук'яненко, «Перспективи використання чавунних виливків з градієнтною структурою у якості деталей формокомплекту для виготовлення склотарії» *Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2022: зб. тез доп. XIV міжнар. наук.-техн. конференція, м. Київ, 28-29 квітня 2022 р., Київ*, с. 185-188, 2022.
- [17] Г. К. Воронов , Технології виробництва скломатеріалів : конспект лекцій для студентів для студентів 1 курсу денної форми навчання другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія, Харків: Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, 2020, с. 128.
- [18] М. В. Лосик та О. М. Звір, Технологічні та фізико-хімічні властивості скла: Навч. Посіб., Львів: ЛНАМ, 2018, с. 40.

- [19] J. E. Shelby, Introduction to Glass Science and Technology. Second Edition, New York State College of Ceramics at Alfred University: The Royal Society of Chemistry, 2005, p. 291.
- [20] М. М. Племянніков, А. П. Яценко, І. В. Пилипенко та Б. Ю. Корнілович, Інноваційні технології у виробництві спеціального та побутового скла: підручник для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія», спеціалізації «Хімічні технології неорганічних керамічних матеріалів», Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018, с. 298.
- [21] F. Debeaufort, K. Galic, M. Kurek, N. Benbettaieb and M. Scetar, Packaging Materials and Processing for Food, Pharmaceuticals and Cosmetics, Great Britain and United States: ISTE Ltd and John Wiley & Sons, 2021, p. 400. <https://doi.org/10.1002/9781119825081>
- [22] "China Quartz Glass Supplier," Постачальник кварцового скла та спеціальні плавкі кварцові та оптові кварцові трубки, [Online]. Available: <https://www.micquartz.com/uk/the-thermal-expansion-coefficient-of-quartz-glass/> [Accessed: 12 Jun. 2024].
- [23] L. Hervet-Escobar, J. F. Lopez-Perez, "Production planning and scheduling optimization model: a case of study for a glass container company", *Annals of Operations Research*, no. 1-2, pp. 529-543, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-3099-1>
- [24] M. P. Groover, Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4th ed ed., 2010: JOHN WILEY & SONS, INC., pp. 1-1025.
- [25] И. Е. Степнов и И. Е. Гладштейн, Конструирование форм для стеклянных изделий, М.: Издательство «Легкая индустрия», 1974, с. 208.
- [26] А. Устименко, І. Лук'яненко та Б. Кивгило, «Аналіз мікроструктури відпрацьованих деталей склоформи та напрямки покращення їх експлуатаційної стійкості», *Нові матеріали і технології в машинобудуванні- 2023: зб. тез доп. XV міжнар. наук.-техн. конференція, м. Київ, 28-29 квітня 2023 р. Київ*, с. 331-336, 2023.



- [27] Nuno Rosa, José Costa та António Gameiro Lopes, «CFD study of transient heating and cooling of a blank mould with a conformal cooling channel for manufacturing glass containers,» *Results in Engineering*, vol. 17, p. 100932, 2023.
- [28] "Home Page - Bucher Emhart Glass," [Online]. Available: <https://emhartglass.com/sites/default/files/publications/2020-10/TNB255%20-%20VertiFlow%20Assist%20for%20AIS%20machines.pdf> [Accessed: 17 May 2023].
- [29] І. В. Лук'яненко та А. І. Устименко, «Особливості отримання градієнтної структури в чавунних заготовках для форм склотарної промисловості,» *Процеси лиття*, т. 158, № 4, с. 3-13, 2024. <https://doi.org/10.15407/plit2024.04.003>
- [30] "Glass, Plastic, Metal Bottles and Caps Wholesale - O.Berk," Let's Make a Bottle: Understanding the Glass Bottle Formation Process, [Online]. Available: <https://www.oberk.com/packaging-crash-course/glass-bottle-formation>. [Accessed: 07 Jan. 2023].
- [31] M. Y. Anwar, "A study on thermal cracking of cast iron used in glass blow moulds," *Pakistan Engineering Congress, 70th Annual Session Proceedings*, no. 677, pp. 415-422, 2012.
- [32] А. І. Устименко , І. В. Лук'яненко , М. М. Ямшинський , І. М. Гурія та Б. В. Кивгило , «Нові жаростійкі сплави для виготовлення склоформ,» *Процеси лиття*, т. 1, № 151, с. 43-53, 2023. <https://doi.org/10.15407/plit2023.01.043>
- [33] P. Manns, W. Döll and G. Kleer, "Glass in contact with mould materials for container production," *Glass Science and Technology: Glastechnische Berichte*, vol. 68, no. 12, pp. 389-399, October 1995.
- [34] I. O. Leushin and D. G. Chistyakov, "Technologies for use in the formation of a differentiated structure in iron billets used in glass molds," *Metal Science and Heat Treatment*, vol. 5-6, no. 58, pp. 299-302, 2016.

- [35] А. І. Устименко та І. В. Лук'яненко, «Вплив технології ливарної форми на утворення градієнтної структури виливків із жаростійкого чавуну,» *Процеси лиття*, т. 2, № 156, с. 47-55, 2024. <https://doi.org/10.15407/plit2024.02.047>
- [36] L. Hollands, *The Glass to Metal Interface during Container Forming Processes*, The Degree of Doctor of Philosophy at The University of Sheffield, March 1998.
- [37] Колотілкін Олег Борисович. Розробка матеріалів для склоформувального устаткування з урахуванням дії силікатних розплавів: д.т.н.: спец.. 05.02.01 - Матеріалознавство: дата захисту 2005-02-24; Запорізький національний технічний університет., 2005.
- [38] Китайгородский, И. И.; Качалов, Н. Н.; Варгин, В. В.; Евстропьев, К. С.; Гинзбург, Д. Б; Асланова, М. С.; Гурфинкель, И. Е., *Технология стекла, 3 переработанное ред.*, М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1961.
- [39] K. M. Mashloosh, "Wear resistance of different types of cast iron used in glass blow mould," *Diyala Journal of Engineering Sciences*, vol. 08, no. 03, pp. 01-11, 2015.
- [40] ДСТУ 8851:2019 *Виливки з легованого чавуну зі спеціальними властивостями. Загальні технічні умови (ISO 2892:2007, NEQ; ISO/TR 15931:2004, NEQ)*, [Чинний від 2020-07-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020, 24 с..
- [41] «Виробнича фірма "Техно-Т" - ВИГОТОВЛЕННЯ ПРЕС-ФОРМ,» [Онлайновий]. Доступно: <https://techno-t.net.ua/izgotovlenie-press-form/>. [Дата звернення: 13 Трав. 2023].
- [42] «Підприємства України. Реклама компаній та організацій. ТОВ «Формокомплекти та запчастини»,» [Онлайновий]. Доступно: <https://www.ua-region.com.ua/38239724>. [Дата звернення: 22 Трав. 2023].
- [43] «ТОВ "САЮЗ" - ІНСТРУМЕНТАЛЬНЕ ВИРОБНИЦТВО,» ВИДУВНІ ФОРМИ ДЛЯ СКЛЯНИХ ВИРОБІВ [Онлайновий]. Доступно:

<https://sayuz.com.ua/production/vigotovlennya-viduvnih-form-dlya-sklyanih-virobiv/>. [Дата звернення: 20 Серп. 2024].

- [44] "Made-in-China.com - Manufacturers, Suppliers & Products in China," [Online]. Available: [https://www.made-in-china.com/Manufacturing-Processing-Machinery-Catalog/Preform-Mould.html?pv\\_id=1ihi3ccll14b&faw\\_id=null](https://www.made-in-china.com/Manufacturing-Processing-Machinery-Catalog/Preform-Mould.html?pv_id=1ihi3ccll14b&faw_id=null). [Accessed: 14 Jan. 2022].
- [45] «Changshu Lege Mould Technology Co., Ltd,» [Онлайновий]. Available: <http://www.legemould.com/index.html>. [Дата звернення: 14 Dec. 2022].
- [46] "Changshu Hongzhou Mold Co., Ltd.," [Online]. Available: <http://en.hzmco.cn/>. [Accessed: 03 Dec. 2022].
- [47] "Tasso - Grey Iron," Cast Iron Bar Specialist. EN-GJL-150C-A, [Online]. Available: <https://www.tasso-bar.com/en-gjl-150c-a/>. [Accessed: 30 Sep. 2023].
- [48] М. М. Ямшинський, Є. Г. Биба, А. В. Мініцький, І. В. Лук'яненко, С. П. Бісик, В. В. Гринюк та Б. В. Кивгило, «Дослідження процесів формування, структури та властивостей пористих каркасів,» *Процеси лиття*, т. 155, № 1, с. 58-71, 2024. <https://doi.org/10.15407/plit2024.01.058>
- [49] R. V. Liutyi, M. V. Tyshkovets, M. M. Yamshinskij, V. Y. Selivorstov та V. G. Ivanov, «Synthesis of phosphosulphate substance and properties of its structured mixture with quartz sand,» *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, № 4, pp. 059-065, 2022. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-4/059>
- [50] Р. В. Лютий, В. Ю. Селівьорстов, В. Г. Іванов та М. М. Ямшинський, «Зв'язувальні матеріали для ливарних форм і стрижнів: проблеми і перспективи,» *Метал та лиття України*, т. 30, № 2, с. 72- 82, 2022. <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.02.072>
- [51] I. Trosnikova, A. Minitskyi, P. Loboda and M. Barabash, "Structural features of nickel clad carbon fibers and determination of their thermophysical properties using pulsed radiation," *Results in Materials*, vol. 23, pp. 2-7, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2024.100620>

- [52] A. I. Yurkova, D. V. Hushchyk and A. V. Minitsky, "Synthesis of High-Entropy AlNiCoFeCrTi Coating by Cold Spraying," *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, vol. 59, no. 11-12, pp. 681-694, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11106-021-00203-7>
- [53] Д. М. Берчук, В. Б. Бубликов та В. О. Овсянников, «Ковшове та внутрішньоформове графітизуюче модифікування», *Литво 2019: XV Міжнародна науково-практична конференція. Металургія 2019: XVII Міжнародна науково-практична конференція, Запоріжжя, 21-23 травня 2019*, с. 29-30, 2019.
- [54] V. E. Khrychikov, H. V. Meniailo, O. D. Semenov, Y. G. Aftandiliants and S. V. Gnyloskurenko, "Graphitizing modification of the axial zone of cast iron," *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 1, pp. 67-73, 2023. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-1/067>
- [55] О. Д. Семенов, В. Є. Хричиков, В. З. Куцова та О. В. Меньяйло, «Розрахунок кінетики просування фронту кристалізації ізосолідус залізовуглецевих сплавів у циліндричних формах», *Процеси лиття*, т. 144, № 2, с. 23-30, 2021. <https://doi.org/10.15407/plit2021.02.023>
- [56] В. Г. Іванов та М. В. Матвейшин, «Аналіз графітової фази у відцентрових заготовках з високоміцного чавуну», *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, № 2, с. 26-31, 2023. <https://doi.org/10.15588/1607-6885-2023-2-4>
- [57] G. Stradomski, S. Gzik, A. Jakubus and M. Nadolski, "The assessment of resistance to thermal fatigue and thermal shock of cast iron used for glass moulds," *Archives of Foundry Engineering*, vol. 18, no. 3, pp. 173-178, 2018.
- [58] Н. Г. Гиршович, Чугунное литье, М.-Л.: Государственное научно-техническое издательство литературы по чёрной и цветной металлургии, 1978, с. 708.
- [59] В. Б. Бубликов, А. В. Нарівський, Ю. Д. Бачинський та О. О. Ясинський, «Легований кремнієм високоміцний чавун та його застосування», *Процеси лиття*, т. 1, № 139, с. 20-29, 2020. <https://doi.org/10.15407/plit2020.01.020>

- [60] V. Ivanov, V. Pirozhkova and V. Lunev, "Silicon effect on the formation of graphite inclusions in gray cast iron," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 12, no. 88, pp. 26-30, 2017. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.107342>
- [61] J. R. Brown, *Foseco Ferrous Foundryman's Handbook*, London: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [62] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering*, 9th, 9th ed., Hoboken, NJ: Wiley, 2013, p. 992.
- [63] Byeong-choon Goo and Choong-hwan Lim, "Thermal fatigue of cast iron brake disk materials," *Journal of mechanical science and technology*, vol. 26, no. 6, pp. 1719-1724, 2012. <https://doi.org/10.1007/s12206-012-0435-2>
- [64] R. E. Smallman and R. J. Bishop, *Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering Science, Process, Applications*, vol. Sixth Edition, London: Butterworth-Heinemann, 1999, p. 438.
- [65] М. М. Ямшинський, Г. Є. Федоров та К. С. Радченко, «Термостійкість жаростійких сталей для роботи в екстремальних умовах,» *ВІСНИК Донбаської державної машинобудівної академії*, т. 3, № 36, с. 33-37, 2015.
- [66] М. М. Ямшинський, Г. Є. Федоров, Є. О. Платонов та К. С. Радченко, «Окалиностійкість хромоалюмінієвих сталей і розрахунок параметричних діаграм,» *Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування*, т. 1, № 70, с. 25-30, 2014.
- [67] M. Cao, K. P. Baxevanakis and V. V. Silberschmidt, "Effect of graphite morphology on the thermomechanical performance of compacted graphite iron," *Metals*, vol. 13, no. 3, p. 473, 2023. <https://doi.org/10.3390/met13030473>
- [68] R. Liutyi, I. Petryk, V. Mogylatenko, V. Popovych and H. Shatska, "Research thermal fields in the crystallization process of steel cast parts," *Advances in materials science and engineering*, no. 1, pp. 1-9, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/7331866>
- [69] I. O. Leushin and D. G. Chistyakov, "Analysis of cracking in glass molds made of cast iron," *Russian Metallurgy (Metally)*, no. 9, pp. 768-771, 2014.

- [70] В. О. Шаповалов, В. Г. Могилатенко, Р. В. Лютий та Р. В. Козін, «Поглинання азоту сталлю 04X18H10 при плазово-дуговій плавці під шлаком системи  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ ,» *Сучасна електрометалургія*, № 4, с. 35- 43, 2023. <https://doi.org/10.37434/sem2023.03.03>
- [71] I. O. Leushin and D. G. Chistyakov, "Graphite phase forming in crystallization of cast iron for its consequent thermal cyclic loads," *Chernye Metally*, vol. 2, pp. 23-27, 2016.
- [72] J. Sun, "Thermal conductivity measurements for thermal barrier coatings based on one and two-sided thermal imaging methods/Review of progress in quantitative nondestructive evaluation," *AIP Conference Proceedings*, vol. 29, no. 1211, pp. 458- 465, 2010.
- [73] Іванов Валерій Григорович. Розвиток теоретичних основ впливу технологічних параметрів на структуру і властивості виливків з сірих чавунів: Доктор технічних наук: спец.. 05.16.04 - Ливарне виробництво: дата захисту 2019-12-17; Національний університет "Запорізька політехніка". – Запоріжжя, 2019.
- [74] T. Matsushita, A. G. Saro, L. Elmquist and A. E. W. Jarfors, "On the thermal conductivity of CGI and SGI cast irons," *International ournal Of Cast Metals Research*, no. 31, pp. 135-143, 2018. <https://doi.org/10.1080/13640461.2017.1379263>
- [75] I. Belov, V. Furlakidis, B. Domeij, T. Matsushita and A. Diószegi, "A thermal conductivity model for lamellar and compacted graphite irons," *International Journal of Metalcasting*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s40962-024-01373-x>
- [76] D. Holmgren and I. L. Svensson, "Thermal conductivity–structure relationships in grey cast iron," *International Journal of Metalcasting*, vol. 18, no. 6, p. 321–330, 2005. <https://doi.org/10.1179/136404605225023162>
- [77] J. Chen and S. Che, "Thermal conductivity of an in-situ metal matrix composite - cast iron," in *Metal, Ceramic and Polymeric Composites for Various Uses*, ed by

Dr. John Cuppoletti. ISBN: 978-953-307-353-8, InTech, 2011, pp. 211-224.  
<https://doi.org/10.5772/21537>

- [78] И. В. Лукьяненко, «Исследование технологических параметров процесса получения чугунных отливок для работы в условиях износа,» *Металл и литье Украины*, Т. 1 из 23-4, № 310-311, с. 34-40, 2019.
- [79] О. Г. Ковальчук, М. М. Ямшинський та Г. Є. Федоров, «Виробництво виливків з диференційованими властивостями поверхні,» *Наукові вісті НТУУ "КПІ"*, № 6, с. 74-80, 2017.
- [80] В. В. Ширяев, О. А. Пеликан, И. О. Шинский, Д. В. Глушков и Ю. Н. Романенко, «Технологические особенности производства биметаллических (многослойных) отливок повышенной износостойкости,» *Металл и литье Украины*, Т. 1 из 27-8, с. 52-56, 2009.
- [81] Лук'яненко Іван Віталійович. Особливості виробництва двошарових виливків із модифікованих у ливарній формі чавунів: Кандидат технічних наук: спец.. 05.16.04 - Ливарне виробництво: дата захисту 2020-09-29; Національний технічний університет України, Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського". – Київ, 2020.
- [82] В. Б. Бубликов, А. А. Ясинський, Л. Н. Сыропоршнев, Д. С. Козак и Ю. Д. Бачинский, «Влияние содержания кремния и скорости охлаждения на образование отбела в отливках из модифицированного в ковше высокопрочного чугуна,» *Процессы литья*, т. 4, с. 17-24, 2009.
- [83] А. А. Ясинский, В. Б. Бубликов, Д. М. Берчук, Л. А. Зелёная и Е. А. Ясинская, «Влияние метода модифицирования и содержания кремния на структуру и механические свойства высокопрочного чугуна,» *Металл и литье Украины*, т. 6, № 265, с. 13-17, 2015.
- [84] А. Г. Ковальчук, М. М. Ямшинський и Г. Е. Федоров, «Усовершенствование технологических процессов поверхностного легирования заготовок в литейной форме,» *Метал и литье Украины*, Т. 1 из 28- 10, № 291-293, с. 55-63, 2017.



- [85] A. G. Kovalchuk, M. M. Yamshinskij, G. E. Fedorov and N. V. Yamshinska, "Differentiated Properties of Metal Products' Surface," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 6, no. 10, pp. 186-194, 2017.
- [86] В. О. Лейбензон, В. Л. Пілюшенко, В. М. Кондратенко, В. Є. Хричиков, Ф. В. Недопьокін, В. В. Білоусов та Ю. В. Дмитрієв, Тверднення металів і металевих композицій, Київ: Наукова думка, 2009, с. 447.
- [87] В. Б. Бубликов, Ю. Д. Бачинський та О. П. Нестерук, «Одержання високоміцних чавунів перлітного класу з підвищеними технологічними та механічними властивостями,» *Процеси лиття*, т. 155, № 1, с. 3-13, 2024. <https://doi.org/10.15407/plit2024.01.003>
- [88] О. М. Смірнов, В. Л. Жук та А. І. Туяхов, Виробництво чавуну для виливків. Навчальний посібник, Донецьк: Норд-Прес, 2010, с. 255.
- [89] К. И. Ващенко и В. С. Шумихин, Плавка и выпечная обработка чугуна для отливок, Киев: Вища школа, 1992, с. 246.
- [90] В. Б. Бубликов, А. А. Ясинский, Д. Н. Берчук, Б. Г. Зеленый и Л. А. Зеленая, «Особенности влияния кремния на структуру и механические свойства отливок из высокопрочного чугуна, модифицированного в литейной форме,» *Процессы литья*, т. 6, № 90, с. 28-39, 2011.
- [91] Г. В. Трегубенко та О. В. Меньяло, «Моделювання впливу технологічних факторів на процес утворення газової пористості у відливках з вторинних алюмінієвих сплавів,» *Теорія і практика металургії*, № 2, с. 46- 51, 2021. <https://doi.org/10.34185/tpm.2.2021.06>
- [92] В. Б. Бубликов, Ю. Д. Бачинський та О. П. Нестерук, «Дослідження фізико-хімічних процесів в системі твердий силікокальцій–рідкий чавун,» *Процеси лиття*, т. 147, № 1, с. 30-38, 2022. <https://doi.org/10.15407/plit2022.01.030>
- [93] В. Б. Бубликов, Ю. Д. Бачинський та О. П. Нестерук, «Підвищення пластичності високоміцного чавуну внутрішньоформовим модифікуванням розплаву зі зменшеним вмістом кремнію,» *Процеси лиття*, т. 3, № 153, с. 3- 11, 2023. <https://doi.org/10.15407/plit2023.03.003>

- [94] М. А. Фесенко и И. В. Лукьяненко, «Влияние времени выдержки после сфероидизирующего модифицирования на структурообразование и механические свойства чугуна,» *ВІСНИК Донбаської державної машинобудівної академії*, т. 1, № 45, с. 13-17, 2019.
- [95] В. Б. Бубликов, Д. Н. Берчук, А. А. Ясинський, Б. Г. Зеленый, Л. Н. Сыропоршнев, Ю. Д. Бачинский и Л. А. Зеленая, «Влияние технологических факторов на формирование структуры тонкостенных отливок из высокопрочного чугуна, получаемого внутриформенным модифицированием,» *Процессы литья*, т. 3, № 87, с. 34-44, 2011.
- [96] N. Haghdadi, B. Bazaz, H. R. Erfanian-Naziftoosi and A. R. Kiani-Rashid, "Microstructural and mechanical characteristics of Al-alloyed ductile iron upon casting and annealing," *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, no. 9, pp. 812-820, 2012.
- [97] А. Г. Ковальчук, М. М. Ямшинський та Г. Е. Федоров, «Исследование процессов жаростойкого поверхностного легирования отливок,» *ВІСНИК Донбаської державної машинобудівної академії*, т. 2, № 41, с. 44-49, 2017.
- [98] А. М. Верховлюк, А. В. Нарівський та В. Г. Могилатенко, Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва: Навчальний посібник. За ред. академіка НАН України В.Л. Найдека, К.: Видавничий дім "Вініченко", 2016, с. 224.
- [99] "Home - Ukrest," Модифікатори для виробництва чавуну - Укрест, [Online]. Available: <http://ukrest.com.ua/index.php/uk/modifikatori-dlja-virobnictva-chavunu.html>. [Accessed: 18 Feb. 2023].
- [100] "Euromex-Products-Upright-microscopes-Industry-Iscope-materials-science-metallurgical," [Online]. Available: <https://www.euromex.com/en/products/products/upright-microscopes/industry-upright-microscopes/iscope-materials-science-metallurgical/>. [Accessed: 28 May 2023].

- [101] "ImageJ. ImageJ Wiki," [Online]. Available: <https://imagej.net/ij/index.html> [Accessed: 14 Jun. 2022].
- [102] «ДСТУ ISO 6507-1:2007 Матеріали металеві. Визначення твердості за Вікерсом. Частина 1. Метод випробування (ISO 6507- 1:2005, IDT)». [Чинний з 2007-07-05]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2010, 20 с..
- [103] ДСТУ EN ISO 6506-1:2019 Матеріали металеві. Випробування на твердість по Брінеллю. Частина 1. Метод випробування (EN ISO 6506- 1:2014, IDT; ISO 6506-1:2014, IDT), [Чинний з 2019-11-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019, 36 с..
- [104] ДСТУ EN ISO 6506-4:2019 Матеріали металеві. Випробування на твердість по Брінеллю. Частина 4. Таблиця значень твердості (EN ISO 6506-4:2014, IDT; ISO 6506-4:2014, IDT), [Чинний з 2019-11-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019, 17 с..
- [105] Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц, Теоретическая физика: в 10 т. Гидродинамика, т. 6, М.: Наука, 1986, с. 736.
- [106] А. Х. Димніч та О. А. Троянський, Теплопровідність: Навчальний посібник, Донецьк: НОРД-ПРЕС, 2004, с. 370.
- [107] Г. Карсалоу и Егер Д., Теплопроводность твердых тел, М.: Наука, 1964, с. 489.
- [108] А. П. Шпак, Л. Г. Гречко, Л. Ю. Куницький, Л. Б. Лерман та О. Ю. Семчук, «Періодичні структури, індуковані на поверхні твердних тіл інтерференцією лазерних пучків. Теплові ефекти,» *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*, т. 5, № 3, с. 683-718, 2007.
- [109] N. V. Morozovsky, M. Y. Barabash, Y. V. Grebelna, M. T. Kartel, Y. I. Sementsov and G. I. Dovbeshko, "Nonstationary thermophysical characterization of exfoliated graphite with carbon nanotubes composites," *Fiz. Nizk. Temp.*, vol. 49, no. 5, pp. 604-620, 2023. <https://doi.org/10.1063/10.0017817>
- [110] R. E. Taylor, K. D. Maglic and V. E. Peletsky, , ""Pulse method for thermal diffusivity measurement",," *Survey of Measurement Techniques, vol. 1, Compendium*

of *Thermophysical Property Measurement Methods*. Plenum Press, pp. 305- 336, 1984.

- [111] Г. Г. Глушенко та В. І. Козлов, Теорія похибок та обробка результатів вимірювань: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів усіх спеціальностей, Київ: НТУУ «КПІ», 2003, с. 47.
- [112] О. М. Бялік, В. С. Черненко, В. М. Писаренко та Ю. Н. Москаленко, *Металознавство: Підручник - 2-ге вид., перероб. і доп.*, Київ: ІВЦ "Видавництво "Політехніка", 2002, с. 384.
- [113] Z. Glavas, A. Strkalj and A. Stojakovic, "The properties of silicon alloyed ferritic ductile irons," *Metallurgija*, vol. 55, no. 3, pp. 293-296, 2016.
- [114] В. І. Мазур, В. З. Куцова, М. А. Ковзель та О. А. Носко, *Сплави на основі заліза*, Дніпропетровськ: НМетАУ, 2013, с. 500.
- [115] Н. Г. Гиршович, *Справочник по чугунному литью*, 3-е ред., Л.: Машиностроение, 1978, с. 758.
- [116] *ДСТУ EN ISO 945-1:2022 Мікроструктура чавунів. Частина 1. Класифікація графіту візуальним аналізуванням (EN ISO 945-1:2019, IDT; ISO 945-1:2019, IDT)*, [Чинний від 2023-12-31]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022, 38 с..
- [117] A. Pires, L. Michels, C. Ribeiro, B. Kroka, E. Hoel, E. Ott and C. Hartung, "Effect of holding time on populations of microparticles in spheroidal graphite irons," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 53, p. 836-847, 2022.  
<https://doi.org/10.1007/s11663-021-02418-w>
- [118] Guang-hua Wang та Yan-xiang Li, «Thermal conductivity of cast iron,» *China Foundry*, т. 2, pp. 85-95, 2020. <https://doi.org/10.1007/s41230-020-9112-8>
- [119] М. С. Rukadika та G. P. Reddy, «Influence of chemical composition and microstructure on thermal conductivity of alloyed pearlitic flake graphite cast irons,» *Journal of Materials Science*, т. 12, pp. 4403-4410, 1986.  
<https://doi.org/10.1007/bf01106563>

- [120] D. Holmgren, A. Diószegi and I. L. Svensson, "Effects of carbon content and solidification rate on the thermal conductivity of grey cast iron," *Tsinghua science and technology*, vol. 13, no. 2, pp. 170-176, 2008. [https://doi.org/10.1016/s1007-0214\(08\)70030-0](https://doi.org/10.1016/s1007-0214(08)70030-0)

## ДОДАТОК А

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Lukianenko I. V., Yamshinskij M. M., Byba Ie. G., **Ustymenko A. I.**, Kovalenko I. V., Leonov D. S., Barabash M. Yu. Features of the Fabrication of High-Alloy Wear-Resistant Cast Irons for Operation in Conditions of Hydroabrasive Wear, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2024, Vol. 46, No. 12. P. 1205-1223. <https://doi.org/10.15407/mfint.46.12.1205>
2. **Устименко А.І.**, Лук'яненко І.В. Характеристики низьколегованого чавуну для формокомплектів у склотарній галузі. *Металознавство та обробка металів.* 2024. Том 30, №4. С. 14-24. <https://doi.org/10.15407/mom2024.04.014>
3. **Устименко А.І.**, Лук'яненко І.В. Особливості отримання градієнтної структури в чавунних заготовках для форм склотарної промисловості. *Процеси лиття.* 2024. Том 158, № 4. С. 3-13. <https://doi.org/10.15407/plit2024.04.003>
4. **Устименко А.І.**, Лук'яненко І.В. Вплив технології ливарної форми на утворення градієнтної структури виливків із жаростійкого чавуну. *Процеси лиття.* 2024. Том 156, № 2. С. 47-55. <https://doi.org/10.15407/plit2024.02.047>
5. **Устименко А.І.**, Лук'яненко І.В., Ямшинський М.М., Гурія І.М., Кивгило Б.В. Нові жаростійкі сплави для виготовлення склоформ. *Процеси лиття.* 2023. Том 151, № 1. С. 43-53. <https://doi.org/10.15407/plit2023.01.043>
6. **Устименко А.І.**, Лук'яненко І.В. Особливості технологічних методів виготовлення чавунних заготовок для чорнового та чистового склоформуального комплексу. Development of science in the conditions of deepening european integration processes: XXVIII International Science and Practical Conference, Rome, Italy, 15-17 July, 2024. Rome, 2024. p. 174-178.
7. **Устименко А.І.**, Лук'яненко І.В. Застосування технологічних прийомів для утворення градієнтної структури чавунних деталей формокомплекту склотарної промисловості. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2024*: зб. тез доп. XVI міжнар. наук.-техн. конференція, м. Київ, 25-26 квітня 2024 р. Київ, 2024. С. 336-339.

8. **Устименко А.І.,** Лук'яненко І.В., Кивгило Б.В. Аналіз мікроструктури відпрацьованих деталей склоформи та напрямки покращення їх експлуатаційної стійкості. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2023*: зб. тез доп. XV міжнар. наук.-техн. конференція, м. Київ, 28-29 квітня 2023 р. Київ, 2023. С. 331-336.

9. **Устименко А.І.,** Лук'яненко І.В. Перспективи використання чавунних виливків з градієнтною структурою у якості деталей формокомплекту для виготовлення склотари. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2022*: зб. тез доп. XIV міжнар. наук.-техн. конференція, м. Київ, 28-29 квітня 2022 р. Київ, 2022. С. 185-188.



## ДОДАТОК Б

## АКТ

впровадження в освітній процес результатів дисертаційної роботи  
Устименко Аліни Іванівни

Цей акт створено про те, що результати дисертаційної роботи Устименко Аліни Іванівни на тему: «Технологія виробництва чавунних виливків з градієнтною структурою та властивостями» впроваджено у навчальний процес на кафедрі ливарного виробництва Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Отримані теоретичні та практичні результати є новими і розширюють уявлення про формування структури чавуну. Тому їх використано під час викладання навчальної дисципліни: «Виробництво виливків із чавуну» (7 семестр, тема 2.5 «Позапічні методи обробки рідкого чавуну», лекція 18: Позапічні методи оброблення та їх вплив на структуру чавуну у виливках), про що зазначено у силабусі цієї навчальної дисципліни.

Теоретичні та практичні результати також опубліковано у періодичних фахових виданнях України категорії Б:

1. Устименко А.І., Лук'яненко І.В. Вплив технології ливарної форми на утворення градієнтної структури виливків із жаростійкого чавуну // *Процеси лиття*. 2024. № 2 (156). С. 47-55. <https://doi.org/10.15407/plit2024.02.047>

2. Устименко А.І., Лук'яненко І.В., Ямшинський М.М., Гурія І.М., Кивгило Б.В. Нові жаростійкі сплави для виготовлення скло форм // *Процеси лиття*. 2023. № 1 (151). С. 43-53. <https://doi.org/10.15407/plit2023.01.043>

Директор

НН ІМЗ ім. Є.О. Патона

Ігор ВЛАДИМИРСЬКИЙ

Голова методичної комісії

НН ІМЗ ім. Є.О. Патона

Ірина ГУРІЯ

(Протокол № 02/14 від 01.10. 2024 р.)

Завідувач кафедри

ливарного виробництва

(Протокол № 1 від 29.08.2024 р.)

Михайло ЯМШИНСЬКИЙ