

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 ± 20 °С, які порівнювали з аналогічними показниками чавуну вихідного зразка. У результаті встановлено, що після 50 год витримування за температури 1000 ± 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 ± 3 °С $\leftrightarrow$ 1000 ± 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