

УДК 621.74:669.13

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-2>

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНИХ ФАКТОРІВ, ЯКІ ВИЗНАЧАЮТЬ РІВЕНЬ МІЦНОСТІ ТА ПЛАСТИЧНОСТІ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ

Пашинський Володимир Вікторович,

доктор технічних наук, доцент,
завідувач кафедри металургії, матеріалознавства та організації виробництва
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0003-0118-4748

Пашинська Олена Генріхівна,

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
професор кафедри природничо-наукових та загальноінженерних дисциплін
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0001-7102-1544

Бойко Ігор Олександрович,

кандидат технічних наук,
доцент кафедри металургії, матеріалознавства та організації виробництва
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0001-7742-4694

Роботу присвячено дослідженню впливу структурних параметрів на міцність та пластичність високоміцного чавуну для подальшого удосконалення технологічного процесу. Як матеріал для досліджень використовували високоміцний чавун, який відповідає вимогам стандарту EN 1563:2018. Виплавку чавуну проводили в індукційній печі ємністю 5 тонн. Отримання високоміцного чавуну проводили шляхом оброблення металу в ковші. Також проводилось вторинне модифікування під час випуску металу з печі та третинне – в ливарній формі. Механічні випробування проводили на універсальній випробувальній машині згідно з вимогами стандарту ДСТУ EN ISO 6892-1, твердість по Бринелю – згідно з вимогами стандарту ДСТУ EN ISO 6892-1. Параметри графітної фази та мікроструктуру чавуну досліджували методом оптичної металографії згідно з вимогами стандарту ISO 945-1:2019. В ході роботи визначено особливості впливу характеристик графітної фази на механічні властивості високоміцного чавуну. Визначено особливості впливу структурного складу металевої матриці високоміцного чавуну на його механічні властивості. Узагальнюючи наведені дані, дійшли висновку, що комплекс механічних характеристик залежить від таких параметрів мікроструктури, як ступінь сфероїдизації графітних часток та їх дисперсність. Вплив ступеня сфероїдизації має пороговий характер, і її значення нижче 50% не дає можливості отримати значення відносного подовження вище 6–8%. Основним параметром є цільність графітних часток. В дослідженому діапазоні від 50 мм² до 200 мм² зменшення розміру часток приводить до одночасного зростання міцності та пластичності. Зростання міцності за збільшення частки перліту спостерігається тільки за умови отримання сприятливих параметрів графітної фази, причому зростання міцності приводить до деякого зниження пластичності матеріалу. Подальші дослідження необхідно спрямувати на дослідження методів керування дисперсністю графітної фази. Також для досягнення прогресу в підвищенні міцності чавуну слід продовжувати дослідження щодо керування структурним складом металевої матриці.

Ключові слова: високоміцний чавун, модифікування, сфероїдизація, межа міцності, відносне подовження, ферит, перліт.

Pashynskiy Volodymyr, Pashynska Olena, Boyko Ihor. Study of structural factors which determine the level of strength and plasticity of ductile cast iron

The work is devoted to the study of the influence of structural parameters on the strength and plasticity of ductile cast iron for further improvement of the technological process. As a material for research, ductile cast iron was used, which meets the requirements of the EN 1563:2018 standard. Cast iron was melted in an induction furnace with a capacity of 5 tons. Obtaining of ductile cast iron was carried out by processing metal in a ladle. Secondary modification was also carried out during the pouring of metal from the furnace, and tertiary modification – in the mould. Tensile tests were performed on a universal testing machine in accordance with DSTU EN ISO 6892-1 standard, Brinell hardness - in accordance with the DSTU EN ISO 6892-1 standard. The parameters of the graphite phase and the microstructure of cast iron were investigated by the method of optical metallography in accordance with the ISO 945-1:2019 standard. The peculiarities of the influence of the characteristics of the graphite phase on

the mechanical properties of ductile cast iron were determined. The peculiarities of the influence of the structural composition of the metal matrix of ductile cast iron on its mechanical properties are determined. The complex of mechanical characteristics mostly depends on such microstructure parameters as the degree of spheroidization of graphite particles and their dispersion. The influence of the degree of spheroidization is of a threshold nature and its value below 50% does not allow obtaining a value of relative elongation higher than 6–8%. The main parameter is the integrity of the graphite particles. In the studied range from 50 mm² to 200 mm², particle refinement leads to a simultaneous increase in strength and plasticity. An increase in strength with an increase in the proportion of pearlite is observed only if favorable parameters of the graphite phase are obtained, while an increase in strength leads to a certain decrease in the plasticity of the material. Further research should be directed to the study of methods of controlling the dispersion of the graphite phase. Also, to achieve progress in increasing the strength of cast iron, it is necessary to continue research in the direction of controlling the structural composition of the metal matrix.

Key words: ductile cast iron, modification, spheroidization, ultimate tensile strength, relative elongation, ferrite, pearlite.

Високоміцний чавун широко використовується для виготовлення різних деталей машинобудування за технологією лиття завдяки унікальному поєднанню відмінних ливарних властивостей, високих механічних властивостей і відносно невисокої ціни [1]. У міжнародній практиці існують стандарти та технічні умови, що визначають хімічний склад і механічні властивості цього матеріалу [2; 3]. Проте головною особливістю високоміцного чавуну є відсутність прямого зв'язку між складом і властивостями. Крім цих параметрів, кінцеві механічні властивості залежать від технології модифікації та сфероїдизації, технології процесу лиття (тривалість заливки форми, тип форми) та конструкції литої деталі. Для отримання необхідної марки матеріалу в конкретному виробі для певних умов необхідний тривалий і дорогий етап експериментального визначення технологічних параметрів. Тому дослідження, спрямовані на виявлення закономірностей формування структури та властивостей високоміцного чавуну, не тільки становлять науковий інтерес, але й мають велике практичне значення.

Одним з напрямів таких досліджень є прогнозування структуроутворення на основі аналізу подвійних та потрійних діаграм стану компонентів, які впливають на процеси сфероїдизації графіту та кінетику перетворення аустеніту [4]. Однак обмеженням такого підходу є неможливість отримати кількісні характеристики процесів. Тому частіше застосовують напівемпіричний підхід, коли будують моделі зв'язку кількісних параметрів структури з механічними властивостями. Так, автори [5] досліджували вплив кількості графітових часток на механічні властивості та теплопровідність феритного ковкого чавуну. Результати показали, що міцність феритного високоміцного чавуну не сильно змінилася зі збільшенням питомої кількості графітових часток, тоді як пластичність значно зросла. Це пояснюється тим, що концентрація напруги була ефективно знята зі збільшенням

кількості графітових часток під час випробування на розтяг.

Розвитком такого підходу стала робота [6], автори якої спрямували зусилля на отримання матеріалу з максимально можливим питомим значенням кількості графітних часток на одиницю об'єму матеріалу шляхом додаткового модифікування в ливарній формі. Результати показали, що кількість часток збільшується з інокуляцією Fe-Si у форму, і для тієї ж кількості модифікованого Fe-Si, кількість часток вища за застосування модифікатора на базі Fe-Si з мінімальним розміром часток реагенту. Однак процес модифікації у ливарній формі також вимагає експериментального відпрацювання для кожної деталі, тому автори роботи [7] вважають більш технологічним введення додаткового модифікування у розливному ковші. Порівняльні дослідження були проведені задля визначення ефективної кількості додаткового модифікатора (Al, Zr – FeSi) у кількості 0,05, 0,10 та 0,15 мас.% перед введенням сфероїдизуючого реагенту (10% Mg-FeSi). Оптимальним значенням вмісту додаткового модифікатора автори вважають значення 0,15 мас.%.

Проте в роботі [8] автори слушно зауважують, що на механічні властивості реальних відливок впливає також наявність у структурі чавуну об'ємних дефектів (пор, газових пузирів, включень і площинних дефектів з оксидних і вуглецевих плівок). Матеріал матриці також відіграє важливу роль, оскільки пластичний ферит забезпечує вищу пластичність, але нижчу межу текучості, ніж перліт. На ще один важливий параметр, який впливає на формування структури, вказують автори багатьох робіт [9]. Це швидкість охолодження, на яку впливають конструкція конкретного виробу, властивості ливарної форми, температурні параметри процесу лиття. Причому збільшення швидкості охолодження сприяє подрібненню розміру часток графіту і підвищенню пластичності, але одночасно підвищує ризик формування карбідів і, відповідно, окрихчення матеріалу.

З наведеного аналізу випливає, що можливості теоретичного прогнозування формування механічних властивостей відливок з високоміцного чавуну з достатньою для практичного застосування точністю обмежені. Проте навіть на рівні емпіричного підходу відсутні надійні кількісні дані щодо впливу параметрів графітних часток (характеристики форми часток, ступінь сфероїдизації графітної фази, розмір часток, кількість часток на одиницю площі) та параметрів металевої матриці (співвідношення ферит/перліт та морфологія перлітних колоній) на комплекс механічних властивостей матеріалу.

Метою роботи є встановлення структурних параметрів, які мають найбільший вплив на міцність та пластичність високоміцного чавуну як критеріїв подальшого удосконалення технологічного процесу. Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

- визначення особливостей впливу характеристик графітної фази відповідно до стандарту ISO 945-1:2019 на механічні властивості високоміцного чавуну;
- визначення особливостей впливу структурного складу металевої матриці високоміцного чавуну на його механічні властивості;
- визначення цільових значень параметрів структури, які забезпечують отримання заданих механічних характеристик.

Як матеріал для досліджень використовували високоміцний чавун, який відповідає вимогам стандарту EN 1563:2018. Хімічний склад чавуну відповідав вимогам стандарту EN-GJS 500-7. Конкретний склад досліджених зразків наведено в подальшому під час обговорення результатів. Виплавку чавуну проводили в індукційній печі ємністю 5 тонн на шихті з низьковуглецевих сталевих відходів, сталевому брухті категорії 3А, оборотних відходів чавунного лиття з додаванням навуглецюючого реагенту та 65% феросиліцію. Отримання високоміцного чавуну проводили шляхом оброблення металу в ковші ємністю 500 кг з використанням подачі сфероїдизуючого реагенту «6Mg – FeSi» та модифікатора системи Fe-Si-Ba. Порівнювали дві варіанти: «сендвіч»-технологію (варіант 1) та розміщення реагентів на дні ковшу без їх попереднього прикриття (варіант 2). Останній варіант використовували з дослідницькими цілями для отримання низьких ступенів сфероїдизації.

В частині плавок в комбінації з варіантом 2 додатково використовували вторинне модифікування Fe-Si-Ba подачею на струю під час випуску металу в ківш та третинне – під час заповнення ливарної форми.

Зразки для визначення механічних властивостей виготовляли шляхом вирізання з виробів згідно з п. 8.3 EN 1563:2018 та відливали окремо згідно з п. 8.2.3 EN 1563:2018.

Механічні випробування проводили на універсальній випробувальній машині з максимальним зусиллям 50 кН згідно з вимогами стандарту ДСТУ EN ISO 6892-1, твердість по Бринелю – згідно з вимогами стандарту ДСТУ EN ISO 6892-1. Параметри графітної фази та мікроструктуру чавуну досліджували на зразках, вирізаних з головок зразків для механічних випробувань з використанням методів оптичної металографії згідно з вимогами стандарту ISO 945-1:2019 в нетравленому стані та після травлення в 4% розчині HNO₃ в етанолі за збільшення ×100.

Результати досліджень показали, що процес отримання високоміцного чавуну є доволі варіабельним і, залежно від комбінації конкретних параметрів виробництва, структура та властивості змінюються у великому інтервалі значень. Для спрощення процесу аналізу підтримували стабільними такі технологічні параметри лиття, як тривалість і температура заливання форми.

У табл. 2 наведено приклади фото мікроструктур у травленому та нетравленому станах. Значення механічних властивостей та кількісні значення параметрів мікроструктури під час випробування на розтягнення зазначені біля фото.

Хімічний склад усіх зразків приблизно однаковий, за винятком вмісту магнію, який коливається в межах 0,025–0,045%, усереднені значення наведені в табл. 1. Причина значної різниці по магнію пов'язана з різними технологіями обробки розплаву в ковші.

Ступінь сфероїдизації зростає з підвищенням вмісту магнію. Аналіз близько 50 плавок свідчить про те, що за такого середнього хімічного складу металу мінімальний вміст магнію має бути не нижче 0,035%, що забезпечує ступінь сфероїдизації не менше 70%.

З табл. 2 видно, що значення відносного подовження мають прямий пропорційний зв'язок зі ступенем сфероїдизації. Аналіз

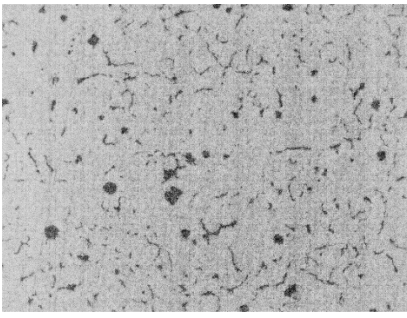
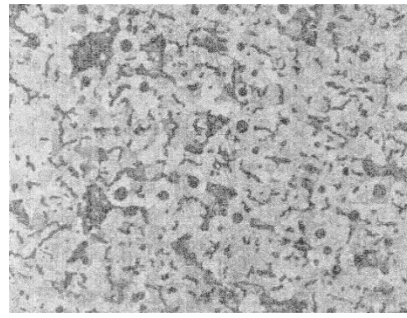
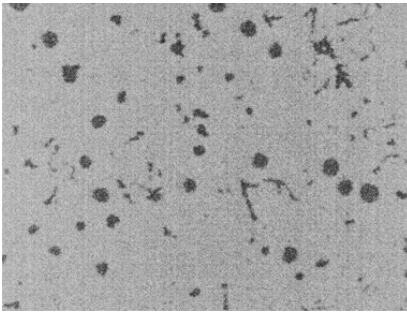
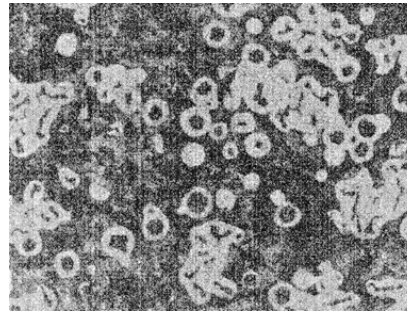
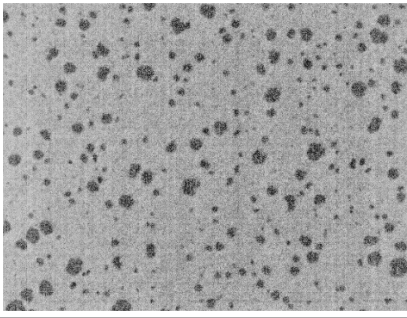
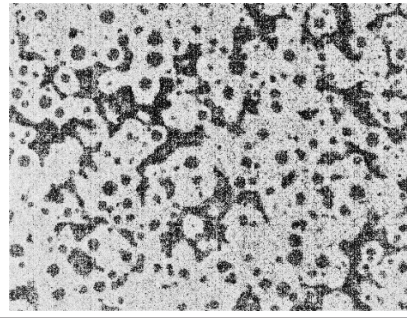
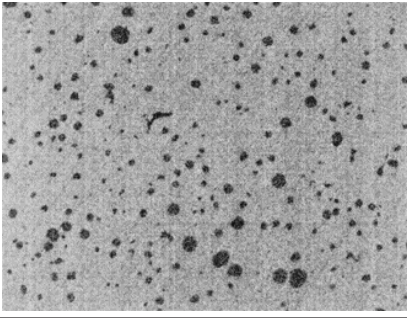
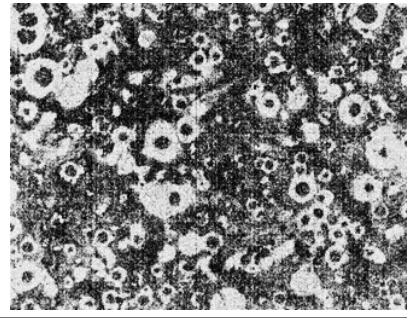
Таблиця 1

Усереднений хімічний склад зразків, % мас.

C	Si	Mn	Mg	P	S
3,63	2,48	0,3	0,025–0,045	0,001	0,011

Таблиця 2

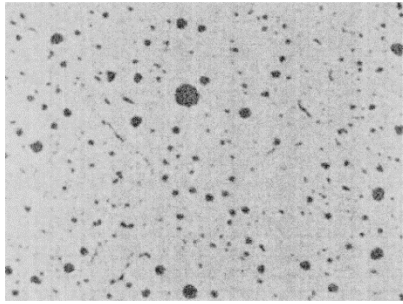
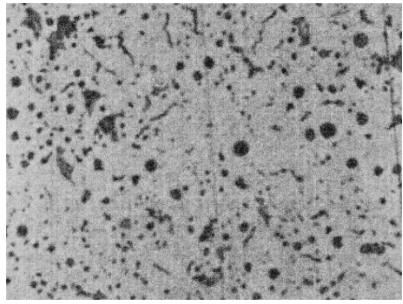
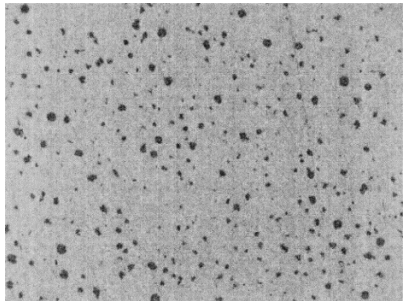
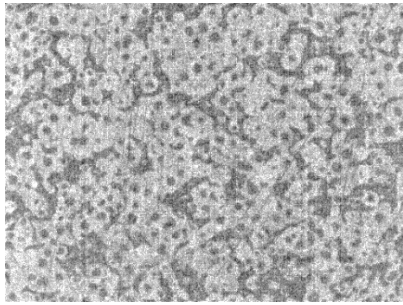
Приклади мікроструктури високоміцного чавуну з різним рівнем механічних властивостей

Механічні характеристики	Ступінь сфероїдизації	Ферит та перліт у матриці
<p>Зразок 1</p> <p>Межа міцності – 352 МПа Відносне подовження – 6,7% Ступінь сфероїдизації <</p>		
<p>Зразок 2</p> <p>520–13,7 Межа міцності – 520 МПа Відносне подовження – 8,5% Ступінь сфероїдизації – 50% Співвідношення ферит/перліт: 20/80% Щільність часток – 100 мм²</p>		
<p>Зразок 3</p> <p>Межа міцності – 504 МПа Відносне подовження – 13,7% Ступінь сфероїдизації – 80% Співвідношення ферит/перліт: 80/20% Щільність часток – 150 мм²</p>		
<p>Зразок 4</p> <p>Межа міцності – 668 МПа Відносне подовження – 12,3% Ступінь сфероїдизації – 80% Співвідношення ферит/перліт: 20/80% Щільність часток – 200 мм²</p>		

великої кількості знімків дав змогу визначити, що мінімальний ступінь сфероїдизації для чавуну цього складу має бути не менше 50% для забезпечення виконання вимог стандарту для марки EN-GJS 500-7 до відносного подовження не менше 7%. Причому в дослідженому інтервалі складів та структурних характеристик зв'язок відносного подовження із співвідношенням ферит/перліт у матриці чавуну проявляється дуже слабо. Навіть за великих значень частки перліту в структурі за ступеня сфероїдизації не нижче 80% значення відносного подовження (10–16%) суттєво перевищують вимоги

стандарту (зразки 3 та 4). Другою характеристикою, яка впливає на пластичні характеристики, є питома кількість часток на одиницю площі. Стандарт ISO 945-1:2019 передбачає як розмірні характеристики графітних часток їх розмір та кількість на одиницю площі. Розрахунок цих параметрів проводиться тільки для часток IV–VI типів форми, він не враховує наявності виділень іншого типу. Але для структур з високим ступенем сфероїдизації отримані дані збігаються з літературними [7; 8] щодо позитивного впливу диспергування графітних часток на значення відносного подовження (табл. 3).

Мікроструктура та властивості зразків з близьким ступенем сфероїдизації, але різним розміром графітних часток

Механічні характеристики	Ступінь сфероїдизації	Ферит та перліт у матриці
<p>Зразок 5</p> <p>Межа міцності – 435 МПа Відносне подовження – 12,3% Ступінь сфероїдизації – 80% Співвідношення ферит/перліт: 95/5% Щільність часток – 80 мм⁻²</p>		
<p>Зразок 6</p> <p>Межа міцності – 517 МПа Відносне подовження – 16,3% Ступінь сфероїдизації – 80% Співвідношення ферит/перліт: 80/20% Щільність часток – 200 мм⁻²</p>		

З наведених даних видно, що з подрібненням графітної фази відносне подовження зростає з 12,3% до 16,3% навіть за більшого вмісту перліту в структурі.

Залежність характеристик міцності від співвідношення ферит/перліт має набагато складніший характер. Очевидно, що межа міцності зростає за збільшення частки перліту в структурі, але також значення міцності збільшуються за підвищення ступеня сфероїдизації та зменшення розміру сфероїдизованих часток (табл. 4).

З табл. 4 видно, що максимальні значення міцності досягаються тільки за одночасного досягнення високого ступеня сфероїдизації (не нижче 80%), високої щільності часток, а також частки перліту в структурі матриці не нижче 80%.

Узагальнюючи наведені дані, доходимо таких висновків:

1. Комплекс механічних характеристик залежить від таких параметрів мікроструктури, як ступінь сфероїдизації графітних часток та їх дисперсність, але характер залежності різний. Вплив ступеня сфероїдизації має пороговий характер, і її значення нижче 50% не дає змоги отримати значення відносного подовження вище 6–8%, тоді як зменшення розміру і підвищення щільності позитивно впливає на характеристики як міцності, так і пластичності.

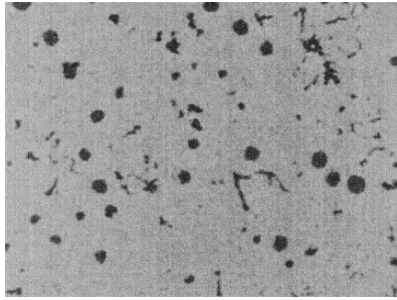
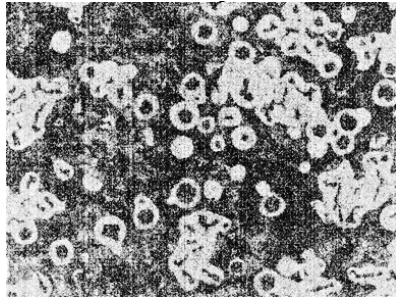
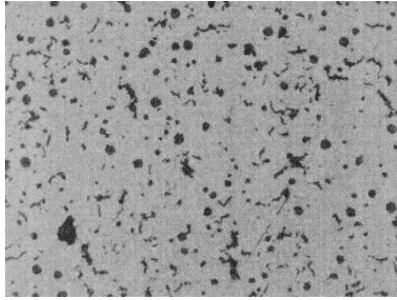
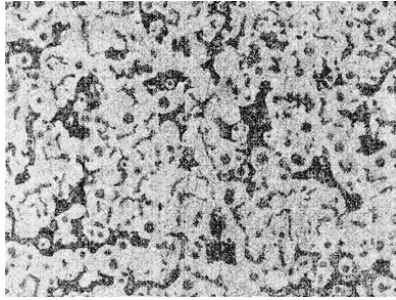
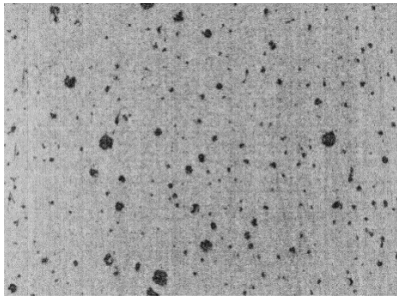
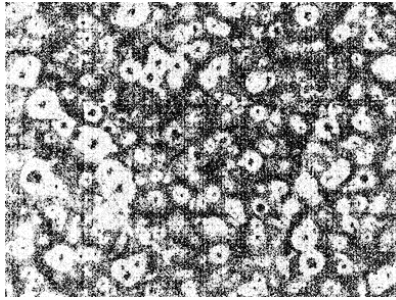
В дослідженому діапазоні щільностей часток від 50 мм⁻² до 200 мм⁻² подрібнення часток приводить до одночасного зростання міцності та пластичності.

2. Вплив співвідношення фериту та перліту в матриці в дослідженому інтервалі коливань хімічного складу має підпорядковане значення. Зростання міцності за збільшення долі перліту спостерігається тільки за умови отримання сприятливих параметрів графітної фази, причому зростання міцності приводить до деякого зниження пластичності матеріалу.

3. Подальші дослідження необхідно спрямувати на дослідження методів керування дисперсністю графітної фази, бо цей параметр найбільш сильно впливає як на міцність, так і на пластичність високоміцного чавуну, і подрібнення часток дає змогу одночасно підвищувати значення обох параметрів. Також для досягнення прогресу в підвищенні міцності чавуну необхідно продовжувати дослідження задля керування структурним складом металевої матриці, тому що у високоміцних чавунах по EN 1563:2018 структурний склад матриці більшою мірою обумовлений умовами охолодження відливки і меншою мірою – хімічним складом. Згідно зі стандартом, діапазони коливань складу феритних та перлітних чавунів перебиваються. Це потребує пошуку інших засобів впливу на формування структури.

Таблиця 4

Мікроструктура та властивості зразків з різним співвідношенням ферит/перліт

Механічні характеристики	Ступінь сфероїдизації	Ферит та перліт у матриці
<p>Зразок 7</p> <p>Межа міцності – 520 МПа Відносне подовження – 8,5% Ступінь сфероїдизації – 80% Співвідношення ферит/перліт: 20/80% Щільність часток – 70 мм⁻²</p>		
<p>Зразок 8</p> <p>Межа міцності – 622 МПа Відносне подовження – 9,9% Ступінь сфероїдизації – 80% Співвідношення ферит/перліт: 80/20% Щільність часток – 150 мм⁻²</p>		
<p>Зразок 9</p> <p>Межа міцності – 658 МПа Відносне подовження – 12,3% Ступінь сфероїдизації – 80% Співвідношення ферит/перліт: 20/80% Щільність часток – 200 мм⁻²</p>		

ЛІТЕРАТУРА:

1. Saravanan V.S. An Introduction to Ductile Iron Metallurgy and Melting Practice: Ductile Iron Technology. LAP LAMBERT Academic Publishing (October 18, 2012), 76 p.
2. ASTM A536 Standard Specification for Ductile Iron Castings. URL: <https://www.astm.org/a0536-84r19e01.html>.
3. ДСТУ EN 1563:2015 Литво. Чавун з кулястим графітом. Технічні умови (EN 1563:2011, IDT). URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=63675.
4. Кропивний В.М., Босий М.В., Кузик, О.В. Кропивна А.В. До питання структуроутворення високоміцного чавуну при використанні діаграм стану систем «Fe-Si», «Mg-Si» та «Fe-Si-Mg». *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2023. Col. 7 (38). P. II. P. 34–42. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.34-42](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.34-42).
5. Liu Ch., Du Y., Ying T., Zhang L., Zhang X., Wang X., Yan G., Jiang B. Effects of graphite nodule count on mechanical properties and thermal conductivity of ductile iron. *Materials Today Communications*. 2022. Vol. 31. June. 103522. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103522>.
6. Singh S., Yadav S., Kumar A. Improvement of Nodularity Value of Graphite in Ductile Iron and Its Effect on Mechanical Properties *Macromolecular Symposia*. 2023. Vol. 407. Issue 1. February. First published: 23 February 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/masy.202200118>.
7. Mojisola T., Seidu S.O., Olubam P.A., Adediran A.A. Effect of preconditioning on the microstructure and mechanical properties of ductile cast iron. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 62. Supplement 1. P. 23–29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.081>.
8. Nilsson K.-F., Vokál V. Analysis of ductile cast iron tensile tests to relate ductility variation to casting defects and material microstructure *Materials Science and Engineering*. 2009. Vol. 502. Issues 1–2. 25 February. P. 54–63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.09.082>.
9. Doru M., Stefanescu L.P., Dix R., Ruxanda C., Corbitt-Coburn T.S. Tensile Properties of Thin Wall Ductile Iron. *Transactions American Foundry Soc*. 2002. Vol. 1102002. P. 1149–1161.

REFERENCES:

1. Saravanan V.S. (2012). An Introduction to Ductile Iron Metallurgy and Melting Practice: Ductile Iron Technology. LAP LAMBERT Academic Publishing (October 18, 2012), 76 p.
2. ASTM A536 Standard Specification for Ductile Iron Castings. 2019. Retrieved from: <https://www.astm.org/a0536-84r19e01.html>.
3. DSTU EN 1563:2015 Lytvo, Chavun z kulyastym graphytom. Tekhnichny umovy [Casting. Ductile iron. Technical Specification] (EN 1563:2011, IDT). Electronic recourse. Retrieved from: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=63675. [in Ukrainian]
4. Kropivnyi V.M., Bosyi M.V., Kuzyk O.V., Kropivna A.V. (2023). Do pytannya strukturoutvorennya vysokomytsnogo chavunu pry vykorystanny diagram stanu system "Fe-Si", "Mg-Si" ta "Fe-Si-Mg" [Concerning the problem of structure formation of the ductile iron with using of equilibrium diagrams of "Fe-Si", "Mg-Si" ta "Fe-Si-Mg" systems]. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. Col. 7 (38). P. II. P. 34–42. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.34-42](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.34-42). [in Ukrainian]
5. Chen Liu, Yuzhou Du, Tao Ying, Liandong Zhang, Xinyu Zhang, Xin Wang, Guojun Yan, Bailing Jiang. (2022) Effects of graphite nodule count on mechanical properties and thermal conductivity of ductile iron. *Materials Today Communications*, Volume 31, June, 103522. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103522>.
6. Sudesh Singh, Susheel Yadav, Amitesh Kumar. (2023) Improvement of Nodularity Value of Graphite in Ductile Iron and Its Effect on Mechanical Properties *Macromolecular Symposia* Volume 407, Issue 1. February 2023. 2200118 First published: 23 February. <https://doi.org/10.1002/masy.202200118>.
7. Mojisola T., Seidu S.O., Olubam P.A., Adediran A.A. (2022). Effect of preconditioning on the microstructure and mechanical properties of ductile cast iron. *Materials Today: Proceedings*. Volume 62. Supplement 1. P. 23–29. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.081>
8. Karl-Fredrik Nilsson, Vratko Vokál (2009). Analysis of ductile cast iron tensile tests to relate ductility variation to casting defects and material microstructure *Materials Science and Engineering: A* Volume 502. Issues 1–2. 25 February. P. 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.09.082>.
9. Doru M., Stefanescu L.P., Dix R., Ruxanda C., Corbitt-Coburn T.S. (2002). Tensile Properties of Thin Wall Ductile Iron. *Transactions American Foundry Soc.* Vol. 1102002. P. 1149–1161.