

<https://doi.org/10.15407/plit2025.02.003>

УДК: 669.131.6:546.76:546.711.669.782

С.І. Клименко, канд. техн. наук; ст. наук. співроб.;

e-mail: ukrdepl15@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-2431-451X>

А.М. Верховлюк, докт. техн. наук, проф., завідувач відділу;

e-mail: anatoliiverkhovliuk@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-2670-4052>

В.Л. Лахненко, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.;

e-mail: lakhnenko@ptima.kiev.ua; <https://orcid.org/0000-0003-3551-7635>

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

ОСОБЛИВОСТІ КОВШОВОЇ ОБРОБКИ СІРОГО ЧАВУНУ ЛІГАТУРАМИ, ЩО МІСТЯТЬ ХРОМ І КРЕМНІЙ

Розглянуто процеси ковшової обробки сірого чавуну лігатурами, що містять хром і кремній. Показано, що застосування хрому для обробки сірого чавуну без компенсації його відбілюючої дії за рахунок відповідних добавок призводить до суттєвого зростання твердості у зразках різного діаметру (від 20 до 120 мм), при цьому більш чутливими до дії хрому є зразки меншого діаметру. Проведено порівняльні дослідження ефективності одночасного застосування для підвищення механічних властивості сірого чавуну хрому та кремнію, які вводились у розплав у вигляді комплексної лігатури, виплавленої із силікокальцію й ферохрому, а також суміші цих феросплавів. Показано переваги використання такої лігатури. Застосування лігатури дозволяє суттєво підвищити механічні властивості сірого чавуну. Межа міцності на розрив різко зростає зі збільшенням кількості введеної лігатури, сягаючи значення 300 МПа при присадці 1,0 % від маси рідкого металу (міцність необробленого чавуну становила 150 МПа). При подальшому збільшенні кількості введеної лігатури зростання міцності на розрив уповільнюється. Аналогічно змінюється міцність на вигин. При введенні 1,0 % лігатури міцність на вигин зростає з 340 до 490 МПа, а подальше збільшення кількості введеної лігатури не призводить до її суттєвого підвищення. Збільшення міцності чавуну супроводжується зростанням твердості, але значно меншим, ніж при обробці хромом без кремнію. Ефективність застосування запропонованої лігатури підтверджено дослідно-промисловою перевіркою. Лігатуру можна рекомендувати для підвищення механічних властивостей чавуну у виробничих умовах. При цьому поетапне введення лігатури дозволить одержати з однієї плавки чавуну різних марок. Використання для обробки сірого чавуну суміші феросплавів (силікокальцію і ферохрому) виявилось не таким ефективним. Аналогічні за кількістю присадки призводять до значно меншого підвищення механічних властивостей у порівнянні із застосуванням комплексної лігатури. Добавки, введені у вигляді механічної суміші, погано оюється, що не дає можливості досягти бажаного результату.

Ключові слова: чавун, лігатура, феросплави, плавка, механічні властивості.

Вступ

Модифікування та легування сплавів дає можливість в широких межах регулювати процес структуроутворення при твердненні виливків і одержувати литий метал високої якості. Стосовно чавуну вони дозволяють змінити структурні складові, які формуються при первинній кристалізації та евтектоїдному перетворенні, а також їх кількісне співвідношення і морфологію, що зумовлює відповідну зміну механічних властивостей. Модифікування та легування можна віднести до найважливіших технологічних операцій виготовлення чавунних виливків [1–9].

Однією з поширених задач впливу на умови кристалізації сплавів є підвищення їх міцності. Зростання міцності сприяє збільшення частки перліту в структурі чавуну, що досягається введенням елементів-стабілізаторів. Одним із доступних елементів, що використовують для підвищення міцності чавуну, є хром, який сприяє виділенню диспергованого графіту та утворенню зернистого перліту, внаслідок чого помітно підвищується міцність металевої основи чавуну. Однак у цьому випадку підвищення міцності супроводжується значним зростанням твердості, що не завжди прийнятно, оскільки ускладнює подальшу механічну обробку литих заготовок.

Метою даної роботи було визначення ефективності сумісної обробки чавуну хромом і кремнієм, що вводились у різний спосіб. Дослідний чавун обробляли механічною сумішшю ферохрому та силікокальцію, а також, для порівняння, виплавленою на основі цих феросплавів комплексною лігатурою.

Методика експериментів

Дослідження твердості чавуну при обробці його ферохромом проводили на циліндричних зразках діаметром від 20 до 120 мм і довжиною 220 мм, які заливали в сирі піщані форми. Базовий чавун виплавляли в індукційній печі з кислотою футерівкою. Усі плавки характеризувались приблизно однаковими температурними режимами: перегрів до 1470 ± 10 °C, заливання при 1330 ± 10 °C. Ферохром у подрібненому або гранульованому стані вводили на дно ковша перед випуском рідкого металу з печі.

При дослідженні спільного впливу хрому й кремнію на властивості чавуну зазначені елементи вводили в чавун у вигляді суміші ферохрому та силікокальцію, а також виплавленої на основі цих феросплавів комплексною лігатурою. Температура чавуну становила 1430–1450 °C, а хімічний склад був такий, мас. %: C — 3,5; Si — 1,6; Mn — 0,6; S — 0,1.

Лігатуру виплавляли в лабораторній індукційній печі з кислим футеруванням. Спочатку розплавляли силікокальцій, потім його перегрівали на 50–100 °C і вводили ферохром, який завчасно було подрібнено до фракції 30–40 мм.

Відомо, що ферохром має питому вагу вище, ніж питома вага силікокальцію, тому він розміщався на дні рідкої ванни та інтенсивно розчинявся. Процес виплавки лігатури протікав спокійно, піроефекту не спостерігалось, але руйнування терівки відбувалось доволі швидко (за 2–3 плавки). Хімічний склад вихідних феросплавів та одержаної лігатури представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад та температури плавлення фероматеріалів для обробки сірого чавуну

№ п/п	Феросплави та лігатура	Масова частка елементів, %								T _{пл} , °C
		Fe	Cr	Si	C	Mn	Ca	P	S	
1	ФХ 800	24,9	65,0	2,0	8,0	–	–	0,03	0,06	~ 1550
2	ФСК 30	15,4	–	55,8	0,5	–	26,4	0,20	0,09	~ 1160
3	Лігатура	–	30,0	31,0	0,37	–	12,0	0,02	0,02	~ 1235

Зазвичай у рідкий чавун вводять не більше 3 % твердих добавок через неминуче зниження температури розплаву, яке при більшій кількості введених присадок може

бути критичним. Це зумовлює необхідність доволі високої концентрації легуючих елементів у лігатурі, що було враховано при визначенні її хімічного складу.

Для визначення вмісту елементів у чавуні використовували хімічний і спектральний аналізи.

Результати та обговорення

Дослідження показало, що обробка чавуну ферохромом сприяє суттєвому підвищенню твердості в різних перетинах виливків (рис. 1). При цьому менші перетини є більш чутливими до такої обробки. Отже, введення хрому в сірий чавун повинно супроводжуватися одночасною компенсацією його відбілюючої дії за рахунок добавок кремнію, міді або нікелю. Використання дорогіших і дефіцитних нікелю та міді не завжди є виправданим, тому кремній у низці випадків виглядає більш привабливим. Одночасна обробка розплаву лігатурами, що містять хром і кремній, — один з ефективних способів підвищення комплексу властивостей чавуну та вирівнювання їх за перетином виливка [4, 5]. Зазвичай для цього використовують добавки на основі ферохрому й феросиліцію або силікокальцію у вигляді механічної суміші. Слід зазначити, що ефективність такої обробки багато в чому залежить від ступеня засвоєння вказаних елементів. Ферохром має високу температуру плавлення, а саме вище температури рідкого чавуну, що може бути причиною недостатнього його засвоєння останнім [3–4, 6, 9].

На рис. 2 представлено зростання масової частки кремнію та хрому в чавуні від кількості добавки лігатури. При збільшенні кількості добавок на 0,5 % розрахована масова частка кремнію зростає відповідно на 0,1 %, а хрому — на 0,2 %. Фактично (пунктирні лінії на графіках) це співвідношення не виконується через неповне

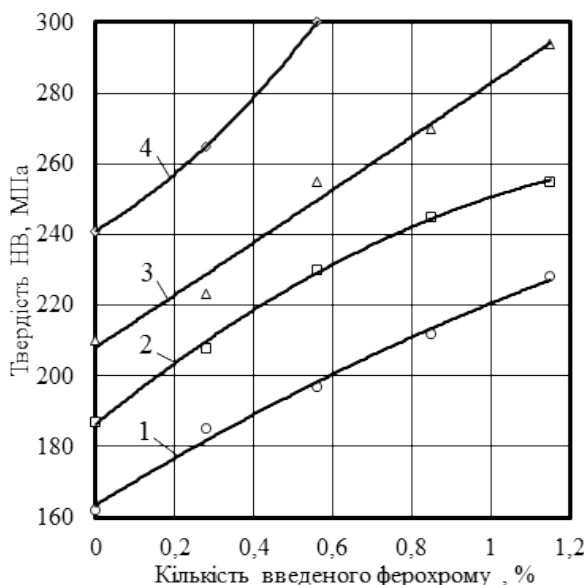
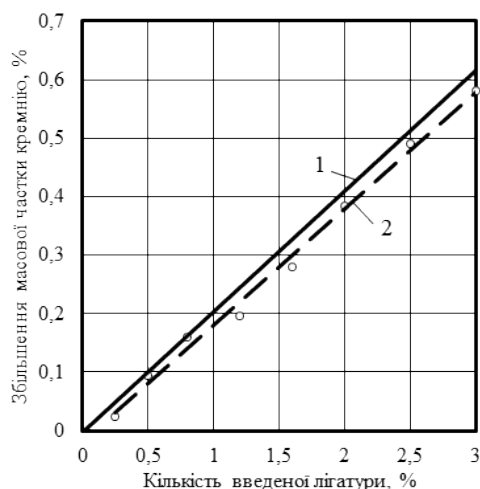
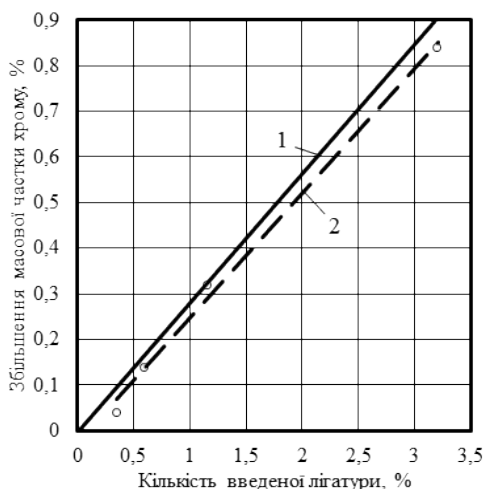


Рис. 1. Вплив добавок ферохрому ФХ 800 на твердість чавуну, що містить 3,11 % С та 1,64 % Si



а



б

Рис. 2. Підвищення в чавуні масової частки кремнію (а) та хрому (б) при обробці лігатурою: 1 — розрахунок; 2 — фактичне підвищення

засвоєння лігатури. Ще більша невідповідність спостерігається при добавці в чавун суміші ферохрому та силікокальцію. Хром із суміші феросплавів засвоюється чавуном набагато гірше, ніж із лігатури, а його масова частка коливається в порівняно великих межах. Засвоєння хрому при використанні лігатури сягає 97 %.

Залежність механічних властивостей чавуну від кількості присадки лігатури або механічної суміші феросплавів (ферохром + силікокальцій) показано на рис. 3. При використанні суміші показники механічних властивостей чавуну, порівняно з вихідним чавуном, спочатку різко зростають, а в подальшому ефективність дії суміші знижується. Чавун марки СЧ 200 (ДСТУ 8833:2019) можна одержати при введенні ~ 1,5 % суміші. Оброблений таким чином чавун має межу міцності на розрив (σ_B) 210 МПа, на вигинання ($\sigma_{\text{виг.}}$) — 440 МПа і твердість НВ — на рівні 200 МПа.

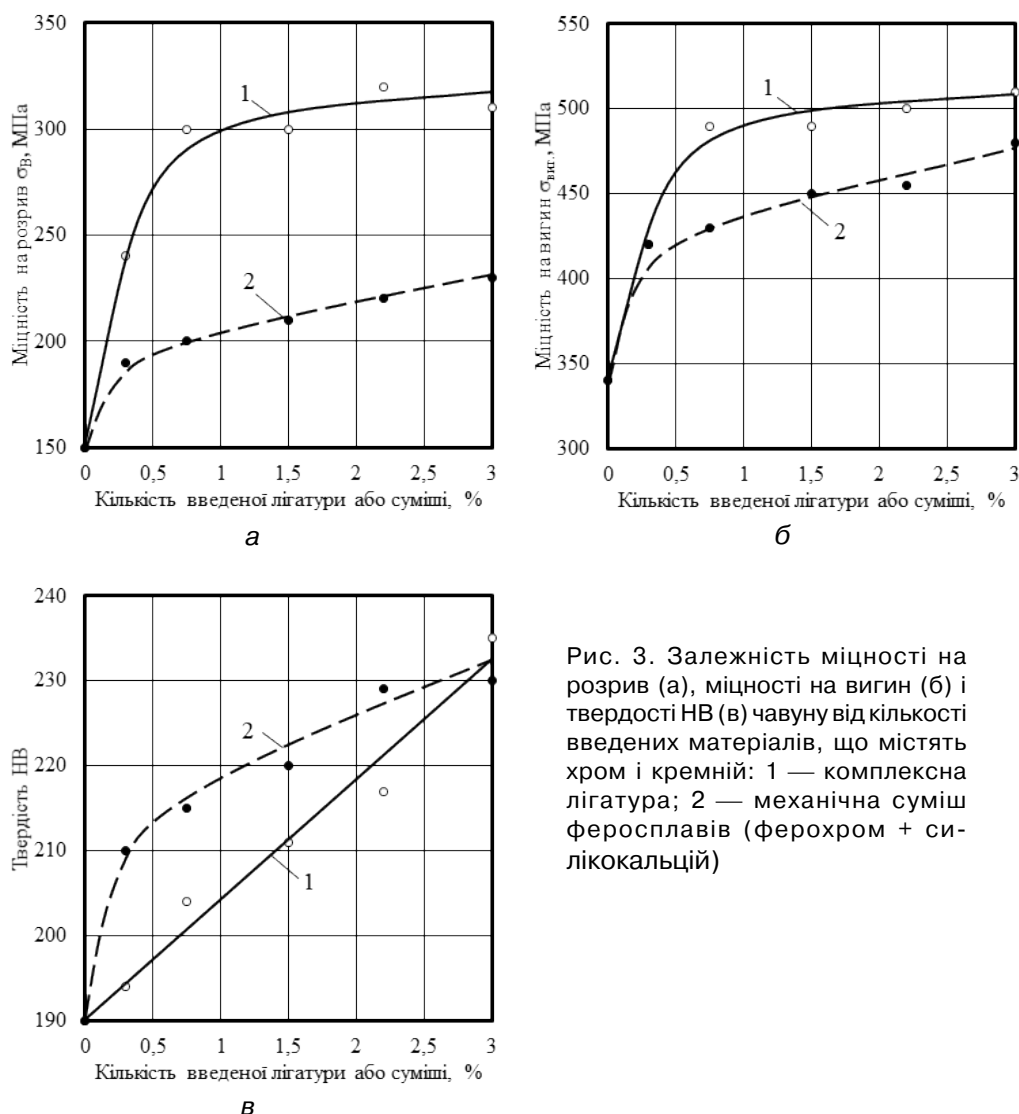


Рис. 3. Залежність міцності на розрив (а), міцності на вигин (б) і твердості НВ (в) чавуну від кількості введених матеріалів, що містять хром і кремній: 1 — комплексна лігатура; 2 — механічна суміш феросплавів (ферохром + силікокальцій)

Використання лігатури показало вищу її ефективність, порівняно з присадками феросплавів. Межа міцності на вигин різко зростає в міру збільшення кількості лігатури до 1,5 % від маси рідкого металу й досягає значень вище 500 МПа. σ_B зростає в міру збільшення кількості добавок і при присадці 1,0 % лігатури від маси рідкого металу досягає значення 300 МПа. При подальшому збільшенні кількості добавки

межа міцності підвищується не так швидко. Твердість НВ зростає в усьому інтервалі, а при оптимальній кількості добавки (1,5 %) лише трохи перевищує 200 МПа, що не повинно створювати значних труднощів при механічній обробці.

При введенні 0,2 % лігатури з вихідного чавуну марки СЧ 150 можна одержати чавун марки СЧ 200, при добавці 0,3%, відповідно, СЧ 250, при 1 % — СЧ 300. Ефективність застосування запропонованої лігатури для позапічної обробки рідкого чавуну підтвердила дослідно-промислова перевірка. В індукційній печі з кислою футерівкою виплавляли базовий чавун, у ковші додавали необхідну кількість лігатури, при цьому контролювали хімічний склад одержаних таким чином чавунів (табл. 2). Результати досліджень міцності дослідних чавунів представлено на рис. 4. При збільшенні кількості лігатури, що вводиться, одночасно й пропорційно зростають міцність на розрив і міцність на вигин, що забезпечує одержання різних марок чавуну з однієї плавки.

Таблиця 2

Хімічний склад сірого чавуну після обробки лігатурою

№ п/п	Кількість введеної лігатури, %	Масова частка елементів, %					
		C	Si	Mn	Cr	S	P
1	—	3,30	1,66	0,59	0,07	0,05	0,14
2	0,5	3,30	1,82	0,60	0,40	0,05	0,12
3	1,0	3,54	1,80	0,57	0,49	0,05	0,14
4	2,0	3,30	1,90	0,66	0,75	0,06	0,13

Висновки

При ковшовій обробці сірого чавуну небажано вводити добавки, що містять хром і кремній, у вигляді механічної суміші феросплавів. Виплавлена на їх основі комплексна лігатура дозволяє одержати більш прогнозований результат за рахунок повнішого засвоєння компонентів. Таку лігатуру можна рекомендувати для використання в ливарних цехах, у тому числі для одержання різних марок чавуну з єдиного базового розплаву.

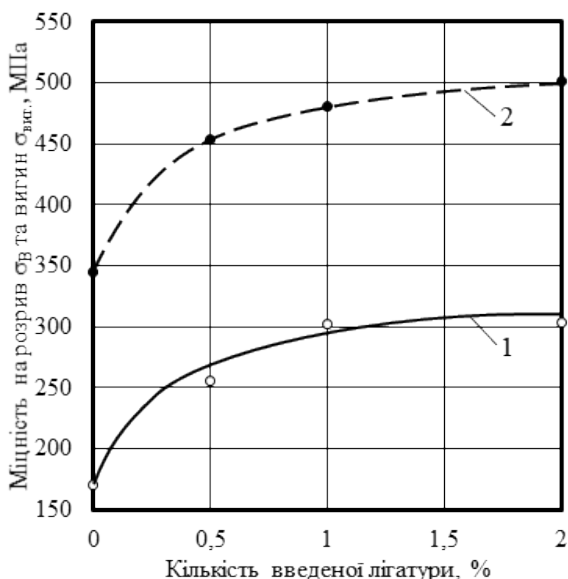


Рис. 4. Міцність чавуну в залежності від кількості введеної лігатури: 1 — міцність на розрив (σ_B); 2 — міцність на вигин ($\sigma_{Bиг}$)

Список літератури

- 1 Гиршович Н. Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. Москва-Ленинград: Машиностроение, 1966. 562 с.
- 2 Справочник по чугунному литью / под. ред. Н. Г. Гиршовича. Ленинград: Машиностроение, 1978. 761 с.
- 3 Українська радянська енциклопедія у 12 т. / гол. ред. М. П. Бажан; редкол. О. К. Антонов та інш. 2-ге вид. Київ: Головна редакція УРЕ, 1974-1985 рр.
- 4 Шумихин В. С., Лузан П. П., Жельнис М. В. Синтетический чугун. Киев: Наукова думка, 1991. 158 с.
- 5 Ващенко К. И., Шумихин В. С. Плавка и выпечная обработка чугуна для отливок. Киев: Вища школа, 1992. 246 с.
- 6 ДСТУ 8833:2019 «Виливки з сірого чавуну з пластинчастим графітом. Загальні технічні умови».
- 7 Неижко И. Г. Графитизация и свойства чугуна. Київ: Наукова думка, 1989. 204 с.
- 8 Хільчевський В. В. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів: наук. посіб. Київ: Либідь, 2002. 328 с.
- 9 Klymenko S., Verkhovliuk A., Sevoïn A., Akimov O., Ponomarenko O., Penziev P. Determining rational complex modifying and alloying additives to improve the mechanical characteristics of gray cast iron. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.*, 2024, V. 6, No 12 (132), p. 1523. doi:<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.318552>

Надійшла 17.10.2024

References

- 1 Girshovich N. G. Kristallizatsiya i svoystva chuguna v otlivkah. MoskvaLeningrad: Mashinostroenie, 1966. 562 s [in Russian].
- 2 Spravochnik po chugunnomu lityu / pod. red. N. G. Girshovicha. Leningrad: Mashinostroenie, 1978. 761 s [in Russian].
- 3 Ukrainska radianska entsyklopediia u 12 t. /hol. red. M. P. Bazhan: redkol. O. K. Antonov ta insh. 2-he vyd. Kyiv: Holovna redaktsiia URE, 19741985 rr [in Ukrainian].
- 4 Shumihin V. S., Luzan P. P., Zhelnis M. V. Sinteticheskii chugun. Kiev: Naukova dumka, 1991. 158 s [in Russian].
- 5 Vaschenko K. I., Shumihin V. S. Plavka i vnepechnaya obrabotka chuguna dlya otlivok. Kiev: Vischa shkola, 1992. 246 s [in Russian].
- 6 DSTU 8833:2019 «Vylyvky z siroho chavunu z plastynchastym hrafitom. Zahalni tekhnichni umovy» [in Ukrainian].
- 7 Neizhko I. G. Grafizatsiya i svoystva chuguna. Kyiv: Naukova dumka, 1989. 204 s [in Russian].
- 8 Khilchevskiy V. V. Materialoznavstvo i tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv: nauk. posib. Kyiv: Lybid. 2002. 328 s [in Ukrainian].
- 9 Klymenko S., Verkhovliuk A., Sevoïn A., Akimov O., Ponomarenko O., Penziev P. Determining rational complex modifying and alloying additives to improve the mechanical characteristics of gray cast iron. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.*, 2024, V. 6, No 12(132), p. 1523. doi:<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.318552>

Received 17.10.2024

S.I. Klymenko, PhD (Engin), Senior Research Scientist; e-mail: ukrdeplit15@ukr.net;
<https://orcid.org/0000-0002-2431-451X>

A.M. Verkhovliuk, Dr. Sci (Engin), Prof., Head of the Department;
e-mail: anatoliiverkhovliuk@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-2670-4052>

V. L. Lakhnenko, PhD (Engin), scientific secretary; e-mail: lakhnenko@ptima.kiev.ua;
<https://orcid.org/0000-0003-3551-7635>

Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine).

JOINT INFLUENCE OF Cr AND Si ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF GRAY IRON

The processes of ladle treatment of gray cast iron with master-alloy containing chromium and silicon are considered. It is shown that the use of chromium for the treatment of gray cast iron without compensating for its bleaching effect by means of appropriate additives leads to a significant increase in hardness in samples of different diameters (from 20 to 120 mm), with samples of smaller diameter being more sensitive to the action of chromium. Comparative studies of the effectiveness of simultaneous use to improve the mechanical properties of gray cast iron of chromium and silicon, which were introduced into the melt in the form of a complex master-alloy melted from silicate calcium and ferrochrome, as well as a mixture of these ferroalloys, were conducted. The advantages of using such an master-alloy are shown. The use of an master-alloy allows to significantly improve the mechanical properties of gray cast iron. The tensile strength increases sharply with an increase in the amount of introduced ligature, reaching a value of 300 MPa when adding 1.0 % of the mass of liquid metal (the strength of raw cast iron was 150 MPa). With a further increase in the amount of introduced ligature, the increase in tensile strength slows down. The bending strength changes similarly. With the introduction of 1.0 % of ligature, the bending strength increases from 340 to 490 MPa, and a further increase in the amount of introduced ligature does not lead to its significant increase. The increase in the strength of cast iron is accompanied by an increase in hardness, but much less than when treated with chromium without silicon. The effectiveness of the proposed master-alloy has been confirmed by experimental and industrial testing. The ligature can be recommended for increasing the mechanical properties of cast iron in production conditions. At the same time, the phased introduction of the alloy will master-alloy to obtain cast irons of different grades from one melt. The use of a mixture of ferroalloys (silicocalcium and ferrochrome) for the treatment of gray cast iron turned out to be not so effective. Similar additives in quantity lead to a much smaller increase in mechanical properties compared to the use of a complex master-alloy. Additives introduced in the form of a mechanical mixture are poorly absorbed, which does not allow to achieve the desired result.

Keywords: cast iron, ligature, ferroalloys, melting, mechanical properties