

Metalozn. obrobka met. 2024, vol. 30 (112), 62-70
<https://doi.org/10.15407/mom2024.04.062>

УДК 669.14.018.29:669.11

Особливості взаємодії лігатури Fe-Ni-Cr-Cu-Mn з сірим чавуном

Пархомчук Ж. В., кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник, zhanna_parkhomchuk@ukr.net, ORCID 0000-0002-3026-8951

Вейс В. І., доктор філософії, науковий співробітник, valentynveis@gmail.com, ORCID 0000-0001-8889-2303

Железняк О. В., головний технолог, alekszel43@gmail.com, ORCID 0000-0001-8495-8045

Верховлюк А. М., доктор технічних наук, професор, завідувач відділу, anatoliiverkhovliuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-2670-4052

Науменко М. І., головний технолог, naumenkomi2016@gmail.com

Сергієнко Р. А., кандидат технічних наук, старший дослідник, rsruslan17@gmail.com, ORCID 0000-0003-3613-9330

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

Використання антифрикційних чавунів, що працюють в умовах змащування, для виготовлення деталей машин і механізмів на сьогодні є малоефективним і невиправданим через необхідність безперервного змащення. Останнє ускладнює обслуговування, ризик забруднення навколишнього середовища мастильними матеріалами, а також відносно низьку міцність і стійкість до ударних навантажень. В роботі досліджено можливість створення антифрикційного матеріалу зі здатністю до самозмащування в процесі експлуатації шляхом легування сірого чавуну лігатурою системи Fe-Ni-Cr-Cu-Mn. Процес отримання лігатури досліджено з перспективою розробки технологічних умов отримання високоентропійного сплаву ливарним способом.

Дослідження проведені з використанням методів металографічного, рентгенофазового та хімічного аналізів.

Розроблено технологічні режими виплавки лігатури системи Fe-Ni-Cr-Cu-Mn. Вона складається з двох твердих розчинів з ГЦК ґратками та складних карбідів $(FeCr)_7C_3$. За допомогою диференціально-скануючої калориметрії показано, що її температури ліквідус та солідус (1346 °C та 1004 °C відповідно) є відносно низькими і тому її доцільно використовувати для легування сірого чавуну. Це дозволяє уникнути значних перегрівів та витримки при легуванні і тим самим підвищити енергетичну ефективність процесу.

Встановлено, що оптимальна кількість добавки лігатури до сірого чавуну становить 0.5 % мас. част., а отриманий легований матеріал за своїм хімічним складом, структурою та властивостями максимально наближений до стандартизованих антифрикційних чавунів. Використання лігатури Fe-Ni-Cr-Cu-Mn надає можливість до розроблення енергетично

ефективного технологічного процесу виготовлення антифрикційного матеріалу здатного до самозмащування при терті.

Ключові слова: чавун, лігатура, структура, антифрикційні матеріали.

Зношування є однією з основних причин виходу з ладу великої кількості деталей машин та механізмів, що призводить до скорочення їхнього терміну служби та збільшення витрат на обслуговування. Для попередження зношування деталей з якісним суміщенням поверхонь, наприклад підшипників, широко використовуються антифрикційні чавуни через їх низький коефіцієнт тертя [1-5]. Однак такі матеріали працюють в умовах змащування і мають ряд суттєвих недоліків. Одним із основних є необхідність безперервного змащування і регулярної заміни мастила, оскільки забруднення змащувальної рідини змінює характер зношування, перетворюючи його на абразивне. Це, в свою чергу, значно збільшує витрати на експлуатацію. Крім того, антифрикційні чавуни характеризуються низькою міцністю до ударних навантажень, що обмежує їх застосування в умовах високих механічних дій та екстремальних умов експлуатації.

У зв'язку з нещодавнім скасуванням в Україні ГОСТ 1585-85, який регламентував використання низьколегованих хромом, міддю та нікелем антифрикційних чавунів типу АЧС, що працюють в умовах змащування, виникає необхідність у розробці нових матеріалів. Разом з цим зростає потреба у створенні антифрикційних матеріалів, здатних до самозмащування за рахунок утворення фаз, які виконують роль твердого мастила [6-8]. У даній роботі розглянута можливість розробки такого матеріалу шляхом легування сірого чавуну лігатурою системи Fe-Ni-Cr-Cu-Mn, що потенційно здатна підвищити міцність матриці та створити передумови для ефективного самозмащування. Процес створення Fe-Ni-Cr-Cu-Mn лігатури у дослідженні також розглядався для передумов створення високоентропійного сплаву такої ж системи. Його отримували за допомогою індукційної плавки на повітрі та в атмосфері аргону.

Для виплавки лігатури в якості шихтових матеріалів були використані чавун ЧН17Д3Х2 (15,72 % Ni, 3,25 % Cu, 2,51 % C, 2,15 % Si, 1,46 % Cr, 0,42 % Mn), низьковуглецевий ферохром марки ФХ010А, напівфабрикатний нікель, мідь марки М1. Через високу схильність до окиснення, марганець вводили до розплаву у вигляді лігатури Cu-Mn з масовою часткою марганцю в лігатурі 34 %.

Виливки перерізом 30 мм отримували литтям за моделями, що газифікуються. Розплав перегрівали до температури 1550 °С, витримували протягом 10 хв та розливали при температурі 1450 °С. Хімічний склад одержаної лігатури, визначений за допомогою рентгенофлуоресцентного експрес-аналізатора «Expert 3L», наведено в таблиці 1.

Металографічними дослідженнями встановлено, що мікроструктура даного сплаву (рис. 1) складається з первинних дендритів (фази з залишкової рідини, що формує міждендритний простір) та карбідів, які мають шестигранну форму в поперечному перерізі і голчасту в повздовжньому.

Рентгенофазовим аналізом (рис. 2) встановлено, що даний сплав складається з двох твердих розчинів на основі фаз з ГЦК ґратками та

Таблиця 1
Хімічний склад лігатури Fe-Ni-Cr-Cu-Mn

Table 1
Chemical composition of Fe-Ni-Cr-Cu-Mn ligature

Масова частка елементів, %								
Fe	Ni	Cr	Cu	Mn	C	Si	S	P
24.293	20.950	14.352	23.447	15.888	0.680	0.365	0.012	0.014
Атомна частка елементів, %								
Fe	Ni	Cr	Cu	Mn	C	Si	S	P
24.213	19.868	15.364	20.538	16.098	3.151	0.723	0.022	0.024

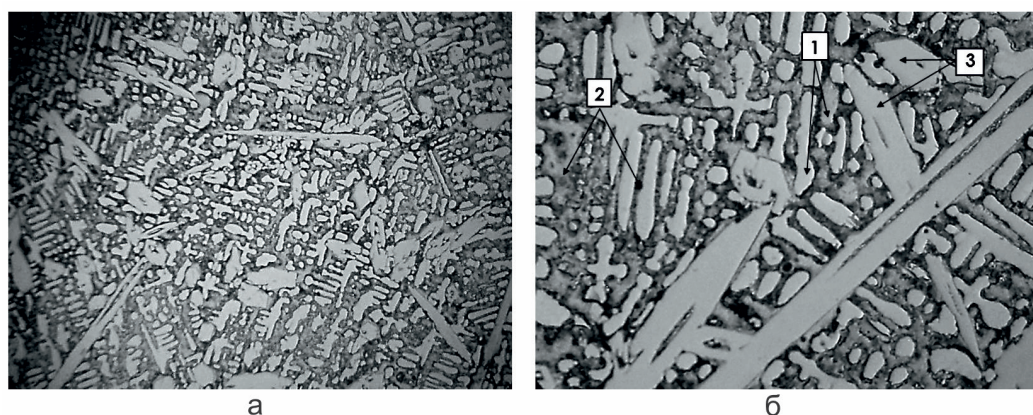


Рис. 1. Мікроструктура сплаву системи Fe Ni Cr Cu Mn (1 – первинні дендрити, 2 – міждендритний простір, 3 – карбіди, а – х 200, б – х 500).

Fig. 1. Microstructure of the alloy of the Fe-Ni-Cr-Cu-Mn system (1 – primary dendrites, 2 – interdendritic space, 3 – carbides, a – x 200, b – x 500).

складних карбідів $(\text{FeCr})_7\text{C}_3$. Перша з фаз збагачена залізом і найближчий її стехіометричний склад Fe_3Mn_7 , друга збагачена міддю з найближчим стехіометричним складом FeCu_4 .

Засобами диференціально-скануючої калориметрії встановлено температури ліквідус та солідус сплаву системи Fe-Ni-Cr-Cu-Mn, які складають відповідно 1346 °C та 1004 °C. Використання такого сплаву в якості лігатури має велику перспективу, пов'язану з значною енергетичною ефективністю. Оскільки порівняно з легуванням окремими елементами, температури плавлення яких сягають високих значень (наприклад, температура плавлення хрому = 1856 °C) зникає необхідність в значних перегрівках та витримках для повного їх розчинення.

Вище представлену лігатуру використовували для легування сірого чавуну наступного хімічного складу (табл. 2) і порівнювали його з легуванням чистими елементами в еквіатомному співвідношенні. Структура чавуну складалась з ферито-перлітної матриці, кількість перліту в якій становила 80 %, а фериту 20 % (П80Ф20), та дрібнопластинчастого графіту

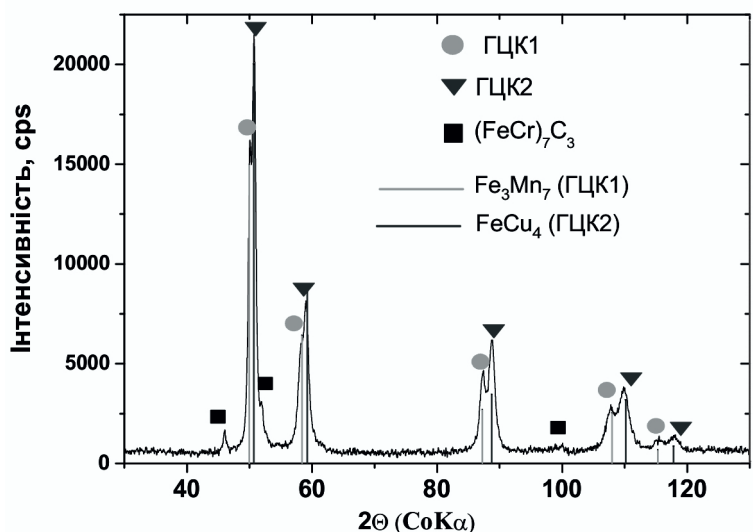


Рис. 2. Дифрактограма лігатури системи Fe-Ni-Cr-Cu-Mn у монохроматичному Co-Kα випромінюванні.

Fig. 2. Diffraction pattern of the Fe-Ni-Cr-Cu-Mn alloy system in monochromatic Co-Kα radiation.

Таблиця 2
Хімічний склад досліджених сплавів

Table 2
Chemical composition of the studied alloys

Сплав	Елементи, % мас. част.						
	Fe	Ni	Cu	Mn	Cr	Si	C
Вихідний сірий чавун	92.92	0.22	0.15	0.85	0.14	2.32	3.40
Сірий чавун, який леговано сплавом Fe-Ni-Cr-Cu-Mn							
0.5 % лігатури	92.93	≤ 0.20	0.21	0.89	0.22	2.14	3.41
2,0 % лігатури	92.04	0.39	0.59	1.26	0.41	2.04	3.27
5,0 % лігатури	90.77	0.96	1.12	1.35	0.66	1.86	3.28
Сірий чавун, який леговано окремими елементами Fe, Ni, Cr, Cu, Mn							
2,0 % суміші елементів	92.33	0.51	0.67	1.02	0.36	1.88	3.23
5,0 % суміші елементів	91.23	0.73	0.93	1.07	0.79	2.04	3.21

із середнім розміром включень 45 мкм (рис. 3 а). Лігатуру вводили як шихтовий матеріал в кількості 0.5 %, 2 % та 5 % за масою. Розплав нагрівали до температури 1400 °С і після витримки протягом 2-3 хв розливали в газифіковані моделі.

Металографічний аналіз показав, що при додаванні 0.5 % лігатури (рис. 3 б) сірий чавун має дисперсну перлітну структуру Пд 0.5 з

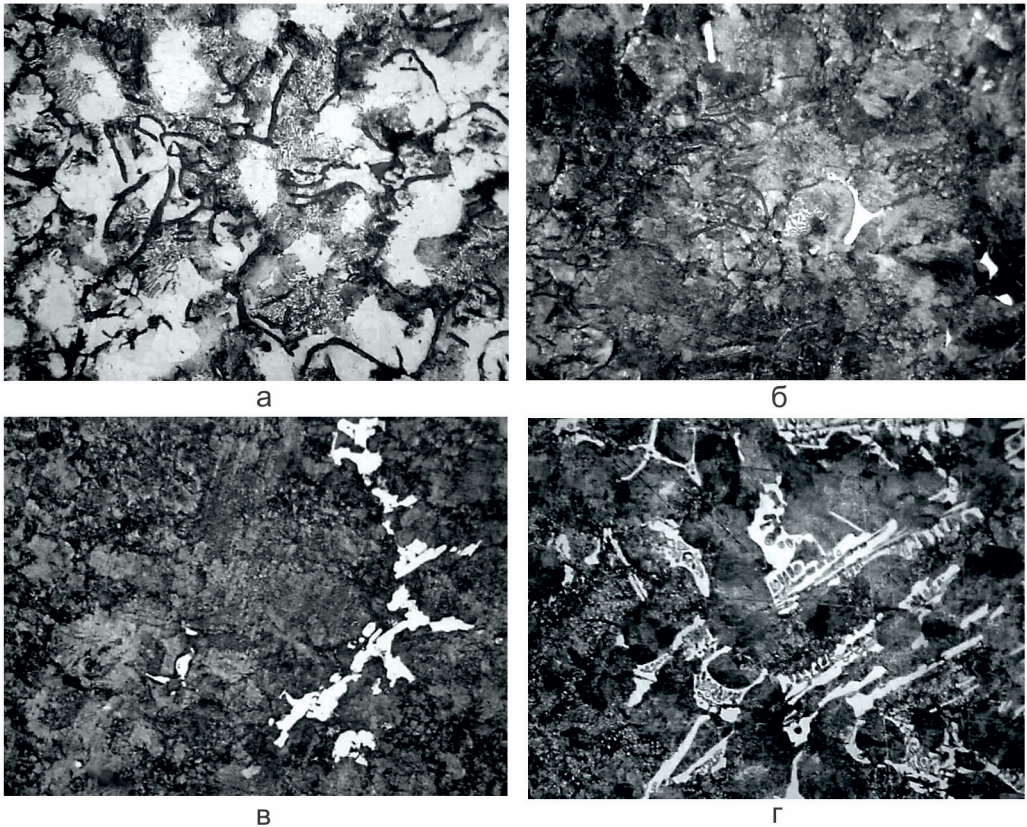


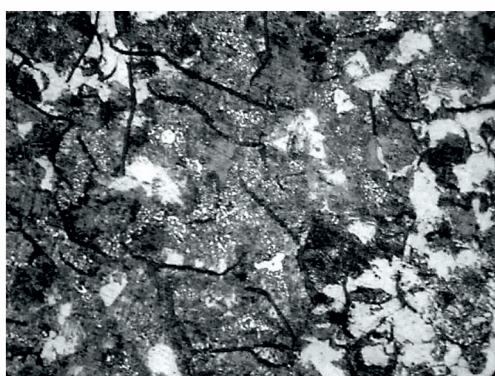
Рис. 3. Мікроструктура дослідного сірого чавуну, який оброблено лігатурою системи Fe Ni Cr Cu Mn (а – вихідн., б – 0.5 %, в – 2.0 %, г – 5.0 %, $\times 500$).

Fig. 3. Microstructure of the experimental gray cast iron treated with the Fe-Ni-Cr-Cu-Mn alloy system (a – initial, б – 0.5%, в – 2.0%, г – 5.0%, $\times 500$).

поодинокими включеннями цементиту (до 1 %). Додавання 2 % лігатури (рис. 3 в) спричиняє появу в перлітній матриці (Пд 0.5) цементитної сітки, яка займає площу до 5 %. Подальше збільшення вмісту лігатури до 5 % (рис. 3 г) спричиняє формування структури дисперсного перліту (Пд 0.5), цементитної сітки та цементиту ледебурита. Площа, яку займає перліт складає близько 80 % і, відповідно, близько 20 % займає цементит ледебуриту. Для всіх трьох сплавів характерний дрібнопластинчатий графіт дисперсністю 15-45 мкм.

Оскільки наявність цементиту в структурі антифрикційних чавунів за міжнародними стандартами не допускається, зразки отриманих сплавів було піддано термічній обробці, а саме графітизуючому відпалу при 930 °C протягом 4 год. В результаті термічної обробки вдалося повністю прибрати цементитні включення для сплаву, який містив з 0.5 % лігатури (рис. 4 а) та дещо зменшити його кількість для сплавів з вмістом лігатури 2,0 % та 5,0 % (рис. 4 б, в).

При легуванні сірого чавуну сумішшю окремих елементів (Fe, Ni, Cr, Cu, Mn) еквіатомного співвідношення металографічним аналізом (рис. 5)



а



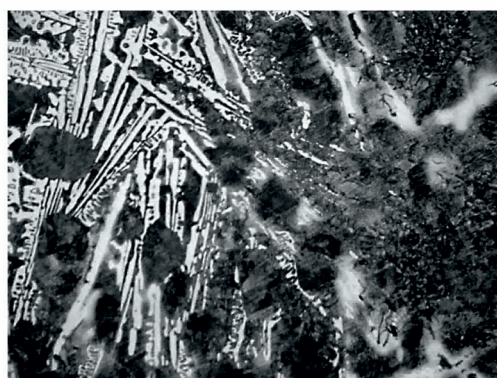
б



в

Рис. 4. Мікроструктура дослідного сірого чавуну, який містив 0,5 % (а), 2,0 % (б) та 5,0 % (в) лігатури після термообробки, x500.

Fig. 4. Microstructure of experimental gray cast iron containing 0.5 % (a), 2.0 % (b) and 5.0 % (c) of ligature after heat treatment, x500.



а



б

Рис. 5. Мікроструктура дослідного сірого чавуну легованого сумішшю окремих компонентів: а – 2,0 %, б – 5,0 %, x 500.

Fig. 5. Microstructure of experimental gray cast iron alloyed with a mixture of individual components: а – 2.0%, б – 5.0%, x 500.

встановлено, що формується перлітна структура дисперсністю Пд 0.5, яка займає площу близько 70 % при додаванні 2,0 % суміші та близько 60 % при додаванні 5,0 % суміші. Залишок складає цементит ледебуриту, який займає 30 % та 40 % площі відповідно. Графіт виділяється у вигляді міждендритних пластинок дисперсністю 25 мкм.

Утворення великої кількості карбідної фази в обох випадках імовірно пов'язано з хромом і його високою здатністю до карбідоутворення. Зі збільшенням кількості легуючих елементів в сплаві підвищується вміст хрому і, відповідно, кількість карбідної фази в структурі. На думку авторів, попередити несприятливий вплив хрому на структуру сплаву можливо за рахунок додаткового введення графітизуючих модифікаторів, наприклад, феросиліцію.

Відповідно до підвищення вмісту легуючих елементів в чавуні і кількості цементиту в структурі змінюються міцність та твердість досліджуваних сплавів (таблиця 3). Проведення термічної обробки та зменшення кількості цементиту в структурі також спричиняє зниження твердості від 10 % до 30 % в залежності від сплаву.

Таблиця 3
Механічні властивості досліджуваних сплавів

Table 3
Mechanical properties of the studied alloys

Сплав	Межа міцності σ_b , МПа	Твердість, НВ	Твердість після ТО, НВ
Вихідний сірий чавун	146	202	140
0.5 % лігатури	155	217	156
2 % лігатури	168	230	207
5 % лігатури	202	302	249
2 % суміші елементів	214	315	275
5 % суміші елементів	230	342	292

В результаті проведених досліджень встановлено, що оптимальна кількість добавки лігатури до сірого чавуну становить 0,5 % мас. част., а отриманий легований чавун за своїм хімічним складом, структурою та властивостями максимально наближений до стандартизованих антифрикційних чавунів. Використання отриманої лігатури з відносно низькою температурою плавлення відкриває перспективу до розроблення енергетично ефективного технологічного процесу виготовлення антифрикційного матеріалу здатного до самозмащування при терті та збереження навколишнього середовища за рахунок відмови від використання мастильних матеріалів.

Література

1. Cast Iron Science and Technology, ASM Handbook, Edited by Doru M. Stefanescu, ASM International, 2017, V. 1A. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v01a.a0006315>
2. Campbell, J. A Hypothesis for Cast Iron Microstructures. Metallurgical and Materials Transactions B, 40, 786 (2009). <https://doi.org/10.1007/s11663-009-9289-0>

3. Савуляк В. І., Янченко О. Б. Технологія стабільного забезпечення структури і експлуатаційних властивостей антифрикційних високовуглецевих сплавів зустрічним модифікуванням. *Металургія та матеріалознавство: міжвузівський збірник*, Луцьк: ЛНТУ, 2011, Вип. 31.
4. Ильченко В. Д., Марковский Е. А., Хоружий В. Я. Особенности структурного состояния антифрикционных сплавов на базе системы железо-медь, легированных серой и фосфором. *Процессы литья*, 2000, № 2, С. 69-75.
5. Верховлюк А. М., Сергієнко Р. А., Щерецький О. А. та ін. Сучасні уявлення про структуроутворення у графітизованих чавунах (огляд). *Металознавство та обробка металів*, 2018, № 1, С. 9-22.
6. Гусачук Д. А., Парфентьева І. О., Дмитріук М. В., Фещук Ю. П. Структурування гетерофазних сплавів на основі чавунів, легованих міддю: колективна монографія. Луцьк: ЛНТУ, 2022, 177 с.
7. Silman, G. I., Kamynin, V. V., & Goncharov, V. V. On the mechanisms of copper effect on structure formation in cast iron. *Metallurgical Science and Heat Treatment*, 49, 387–393 (2007). <https://doi.org/10.1007/s11041-007-0072-z>
8. Гусачук Д. А., Маткова А. В., Парфентьева І. О. Морфологія та характер розподілення мідистих включень у легованих міддю сірих чавунах. Наукові нотатки. *Міжвузівський збірник*, Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2011, Вип. 31, С. 199-203.

References

1. Stefanescu, D. M. (Ed.). (2017). *Cast Iron Science and Technology*, ASM Handbook, Vol. 1A. ASM International. [in English]. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v01a.a0006315>
2. Campbell, J. (2009). A hypothesis for cast iron microstructures. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 40, 786. [in English]. <https://doi.org/10.1007/s11663-009-9289-0>
3. Savulyak, V. I., Yachenko, O. B. (2011). Technology for stable provision of structure and operational properties of antifriction high-carbon alloys by reciprocal modification. *Metallurgy and Materials Science: Interuniversity Collection*, 31. Lutsk: LNTU. [in Ukrainian].
4. Ilchenko, V. D., Markovsky, E. A., Khoruzhyi, V. Y. (2000). Features of the structural state of antifriction alloys based on the iron-copper system, alloyed with sulfur and phosphorus. *Casting Processes*, 2, 69-75. [in Russian].
5. Verkhovliuk, A. M., Serhiienko, R. A., Shcheretskyi, O. A., et al. (2018). Modern views on the structure formation in graphite cast irons (review). *Metallurgy and Metalworking*, 1, 9-22. [in Ukrainian].
6. Husachuk, D. A., Parfentieva, I. O., Dmytriuk, M. V., Feshchuk, Y. P. (2022). *Structuring of heterophase alloys based on cast irons alloyed with copper: collective monograph*. Lutsk: LNTU. [in Ukrainian].
7. Silman, G. I., Kamynin, V. V., Goncharov, V. V. (2007). On the mechanisms of copper effect on structure formation in cast iron. *Metallurgical Science and Heat Treatment*, 49, 387-393. [in English]. <https://doi.org/10.1007/s11041-007-0072-z>
8. Husachuk, D. A., Matkova, A. V., Parfentieva, I. O. (2011). Morphology and distribution of copper inclusions in copper-alloyed gray cast irons. *Scientific Notes. Interuniversity Collection*, 31, 199-203. Lutsk: RVV LNTU. [in Ukrainian].

Одержано 05.12.24

Features of the Interaction of the Fe-Ni-Cr-Cu-Mn Alloy with Gray Cast Iron

Zh. V. Parkhomchuk, PhD, Senior Researcher, Senior Scientific Associate,
zhanna_parkhomchuk@ukr.net, ORCID 0000-0002-3026-8951

V. I. Veis, PhD, Researcher, valentynveis@gmail.com, ORCID 0000-0001-8889-2303

O. V. Zheleznyak, Senior Technologist, alekszel43@gmail.com,
ORCID 0000-0001-8495-8045

A. M. Verkhovliuk, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department,
anatoliiverkhovliuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-2670-4052

M. I. Naumenko, Senior Technologist, naumenkomi2016@gmail.com

R. A. Sergiienko, PhD, Senior Researcher, rruslan17@gmail.com,
ORCID 0000-0003-3613-9330

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine,
Kyiv, Ukraine

Summary

The use of antifriction cast irons operating under lubrication conditions for manufacturing machine and mechanism parts is currently inefficient and unjustified due to the need for continuous lubrication. This complicates maintenance, increases the risk of environmental contamination by lubricants, and also results in relatively low strength and resistance to impact loads. This work investigates the possibility of creating an antifriction material with self-lubricating capabilities during operation by alloying gray cast iron with the Fe-Ni-Cr-Cu-Mn alloy system. The process of obtaining the alloy is explored with the aim of developing technological conditions for producing a high-entropy alloy by casting.

The research was conducted using metallographic, X-ray phase, and chemical analysis methods. Technological modes for the production of the Fe-Ni-Cr-Cu-Mn alloy have been developed. It consists of two solid solutions with FCC lattices and complex carbides $(\text{FeCr})_7\text{C}_3$. It was shown that its liquidus and solidus temperatures (1346 °C and 1004 °C, respectively) are relatively low, which makes it suitable for alloying gray cast iron. This allows avoiding significant overheating and holding during alloying, thereby improving the energy efficiency of the process.

It was established that the optimal amount of alloy addition to gray cast iron is 0.5% by weight, and the resulting alloyed material, in terms of its chemical composition, structure, and properties, is closest to standardized antifriction cast irons. The use of the Fe-Ni-Cr-Cu-Mn alloy provides an opportunity to develop an energy-efficient technological process for producing an antifriction material capable of self-lubricating during friction.

Keywords: cast iron, alloy, structure, antifriction materials.