



Vol. 1 No. 1 (2023)

Available since: 2023

Published: 2 times a year

Founders: State University of Economics and Technology

ISSN: 3041-1246

E-mail: [ete@duet.edu.ua](mailto:ete@duet.edu.ua) Journal homepage: <https://ete.org.ua>

JEL: L610

DOI: 10.62911/ete.2023.01.01.10

## Development of briquette modifier composition to increase the stability of grinding media in iron ore fine grinding mills

Citation:


Suslo N., Huk Y., & Panchenko H. (2023). Development of briquette modifier composition to increase the stability of grinding media in iron ore fine grinding mills. *Scientific and practical journal "Economics and technical engineering"*, 1(1), 126–133.

<https://doi.org/10.62911/ete.2023.01.01.10>

Nataliia Suslo

*Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine*


e-mail: [suslo\\_nv@duet.edu.ua](mailto:suslo_nv@duet.edu.ua)

 ORCID iD: 0000-0001-9280-6316

Yelyzaveta Huk

*Assistant State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine*


e-mail: [huk\\_ys@duet.edu.ua](mailto:huk_ys@duet.edu.ua)

 ORCID iD: 0000-0002-8866-9467

Hanna Panchenko

*Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine*

e-mail: [panchenko\\_hm@duet.edu.ua](mailto:panchenko_hm@duet.edu.ua)

 ORCID iD: 0000-0001-7565-0380

**Abstract:** Recently, there has been a trend towards the use of modifiers in the form of briquettes produced by pressing highly dispersed materials with a binder. The choice of a rational composition of the briquette-modifier will improve the properties of cast irons and steels by increasing the assimilation of the modifying components and facilitating their introduction into the melt. Therefore, the possibility of using briquetted materials for modifying and alloying cast iron to improve melt quality, considered in this paper, is relevant. A literature analysis was carried out on the methods of producing briquettes. The influence of the main technological parameters of briquettes production on their quality characteristics is studied. It was found that the main limitation of the use of briquette modifiers is their high dissolution temperature (more than 1450 °C). The paper considers the possibility of reducing the briquette dissolution temperature by introducing the magnesium-aluminium alloy MAGR into its composition, which helps to accelerate the dissolution due to the internal rupture of the briquette from thermal shock. The rational composition of the modifier, which includes nanodispersed titanium carbonitride powder (35-40%), granular MAGR alloy (5-10%) and dispersed cast iron chips (the rest), was determined by laboratory tests. The proposed composition of the briquettes is appropriate in terms of the optimum dissolution temperature (1250°C) and increasing the rate of interaction of the briquette reagents with the melt. The experimental briquette modifiers were tested in industrial conditions at PJSC ArcelorMittal Kryvyi Rih. According to the results of the research, it was found that the use of the developed briquette-modifier in the manufacture of cast iron grinding balls increases their operational stability by 18-30%, which made it possible to reduce the cost of ore grinding.

**Keywords:** briquette, cast iron, modification, nanodispersed material, titanium carbonitride, research, temperature, composition

Received: 10/09/2023

Accepted: 25/10/2023




JEL: L610

### **Development of briquette modifier composition to increase the stability of grinding media in iron ore fine grinding mills**

Nataliia Suslo

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: suslo\_nv@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0001-9280-6316

Yelyzaveta Huk

Assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: huk\_ys@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0002-8866-9467

Hanna Panchenko

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: panchenko\_hm@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0001-7565-0380

**Abstract:** Recently, there has been a trend towards the use of modifiers in the form of briquettes produced by pressing highly dispersed materials with a binder. The choice of a rational composition of the briquette-modifier will improve the properties of cast irons and steels by increasing the assimilation of the modifying components and facilitating their introduction into the melt. Therefore, the possibility of using briquetted materials for modifying and alloying cast iron to improve melt quality, considered in this paper, is relevant. A literature analysis was carried out on the methods of producing briquettes. The influence of the main technological parameters of briquettes production on their quality characteristics is studied. It was found that the main limitation of the use of briquette modifiers is their high dissolution temperature (more than 1450 °C). The paper considers the possibility of reducing the briquette dissolution temperature by introducing the magnesium-aluminium alloy MAGR into its composition, which helps to accelerate the dissolution due to the internal rupture of the briquette from thermal shock. The rational composition of the modifier, which includes nanodispersed titanium carbonitride powder (35-40%), granular MAGR alloy (5-10%) and dispersed cast iron chips (the rest), was determined by laboratory tests. The proposed composition of the briquettes is appropriate in terms of the optimum dissolution temperature (1250<sup>0</sup>C) and increasing the rate of interaction of the briquette reagents with the melt. The experimental briquette modifiers were tested in industrial conditions at PJSC ArcelorMittal Kryvyi Rih. According to the results of the research, it was found that the use of the developed briquette-modifier in the manufacture of cast iron grinding balls increases their operational stability by 18-30%, which made it possible to reduce the cost of ore grinding.


**Keywords:** briquette, cast iron, modification, nanodispersed material, titanium carbonitride, research, temperature, composition

### **Розробка складу брикет - модифікаторів для підвищення стійкості мелючих елементів млинів тонкого помелу залізорудної сировини**

Наталія Сусло

к. т. н., доцент, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: suslo\_nv@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0001-9280-6316

Єлизавета Гук

асистент, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна


e-mail: huk\_ys@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0002-8866-9467

Ганна Панченко

к. т. н., доцент, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: panchenko\_hm@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0001-7565-0380

**Анотація:** Останнім часом намітилася тенденція застосування модифікаторів, виконаних у вигляді брикетів, отриманих шляхом пресування високодисперсних матеріалів із застосуванням сполучного. Вибір раціонального складу брикет-модифікатора дозволить поліпшити властивості чавунів і сталей, за рахунок збільшення засвоюваності компонентів, що модифікують, а також полегшить їх введення в розплав. Тому, розглянута в роботі можливість застосування брикетованих матеріалів для модифікування та легування чавуну з метою підвищення якості розплаву, є актуальною. Проведено аналіз літератури стосовно способів отримання брикетів. Досліджено вплив основних технологічних параметрів виготовлення брикетів на їх якісні характеристики. Виявлено, що основним обмеженням застосування брикет-модифікаторів є їх висока температура розчинення (більше ніж 1450°C). Розглянута можливість зниження температури розчинення брикету за рахунок введення в його склад магній-алюмінієвого сплаву МАгр, який сприяє пришвидшенню розчинення за рахунок внутрішнього розірвання брикету від термоудару. Шляхом лабораторних досліджень визначений раціональний склад модифікатора, в який входить нанодисперсний порошок карбонітриду титану (35-40%), гранульований сплав МАгр (5-10%) та дисперсна чавунна стружка (решта). Запропонований склад брикетів є доцільним, з точки зору оптимальної температури розчинення (1250°C) та збільшення швидкості взаємодії реагентів брикету з розплавом. Дослідні брикет-модифікатори пройшли апробацію в промислових умовах на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». За результатами дослідження встановлено: застосування розробленого брикет-модифікатора при виготовленні чавунних куль, що мелють, збільшує їх експлуатаційну стійкість на 18 – 30%, Це дозволяє знизити собівартість помелу руди.

**Ключові слова:** брикет, чавун, модифікування, нанодисперсний матеріал, карбонітрид титану, дослідження, температура, склад

## Вступ (Introduction)

У даний час все частіше використовують дрібнодисперсні матеріали (наноматеріали) для легування та модифікування розплавів з метою підвищення механічних та спеціальних властивостей деталей металургійного обладнання (кокосників, мелючих куль, конусів дробарок тощо). Основними проблемами при використанні дисперсних матеріалів у вигляді лігатур та модифікаторів є їх введення в розплав і засвоєння. Легкі дисперсні частинки при введенні їх у струмінь металу спливають на поверхню розплаву, тим самим не взаємодіючи повною мірою з ним, що призводить до зниження модифікуючої або легуючої дії та підвищеної їхньої витрати.

Існує багато різних способів введення модифікаторів у розплав (Abdelrahim et al., 2022), наприклад введення в ківш «дзвіночком», у вигляді дроту з порошковим модифікатором, але вони також не ефективні через значні економічні витрати, так як вимагають необхідність встановлення додаткового устаткування.

Останнім часом намітилася тенденція застосування модифікаторів, виконаних у вигляді брикетів, отриманих шляхом пресування високодисперсних матеріалів із застосуванням сполучного. Вибір раціонального складу брикет-модифікатора дозволить поліпшити

властивості чавунів і сталей, за рахунок збільшення засвоюваності компонентів, що модифікують, а також полегшить їх введення в розплав.

Проведений огляд літератури (Abdelrahim et al., 2022; Burtsev et al., 2018; Imasogie 2003), показав, що в залежності від природи та властивостей пресованого матеріалу можна виділити два основних способи технологічних процесів брикетування, а саме: холодне брикетування з використанням пов'язуючих матеріалів або без них та гаряче брикетування. Вибір технологічного процесу брикетування визначається вимогами до огрудкованого продукту та характеристиками вихідних матеріалів. У кожному конкретному випадку повинен застосовуватися процес, який, забезпечує задану якість брикетів (щільність, міцність, специфічні металургійні властивості), є найбільш технологічним, здійснюється з найменшими енергетичними витратами та висуває менш жорсткі вимоги до обладнання для брикетування.

Формування брикетів з дрібнофракційних матеріалів є складним комплексом механічних, фізико-хімічних, фізичних процесів взаємодії між компонентами, що входять до складу брикету. Крім того, необхідно враховувати призначення брикетів. Ряд літературних джерел (Jain et al., 2021; Kondrat'ev et al., 2014) присвячений брикетуванню шихтових матеріалів з відходів виробництва (металева стружка тощо), але що стосується брикетів для модифікування розплавів, то до них пред'являються вимоги зворотні до тих, які заявлені до шихтових брикетів, а саме:

- міцність брикету має бути достатньою лише для транспортування брикету;
- поверхнева щільність брикету повинна бути вищою, ніж внутрішня;
- термічна міцність мінімальна.

Виходячи з вище викладеного, метою роботи є створення такого складу брикетованого модифікатора, який дозволить зменшити витрати модифікатора за рахунок прискорення часу його розчинення, збільшити його засвоєння в рідкому розплаві без корінного переозброєння плавильної ділянки існуючих ливарних цехів та підвищити механічні та експлуатаційні властивості розплаву.

## Матеріали та методи (Materials and Methods)

В процесі дослідження був проведений аналіз літератури щодо існуючих складів брикет-модифікаторів та вплив складових брикетів на їх властивості.

Більш раціональним є моделювання та відпрацювання характеристик і режимів отримання брикетів в лабораторних умовах, коли є можливість проаналізувати різні варіанти складу, зареєструвати необхідні параметри процесу, чітко виділити вплив окремих технологічних факторів при пресуванні. Саме такий підхід розроблено в навчально-науковому технологічному інституті Державного університету економіки і технологій при розробці технологій брикетування широкого спектру дрібнофракційних матеріалів.

У розробленій методиці можна виділити такі основні етапи:

- Вивчення фізико-механічних характеристик дрібнофракційних матеріалів та складених із них шихт.
- Дослідження параметрів ущільнення брикетів.
- Вибір раціональних технологічних режимів отримання пресування.

## Результати (Results)

Відомості про особливості розплавлення в чавуні брикетованих модифікаторів становлять великий практичний інтерес, особливо враховуючи в їх складі широкий спектр концентрацій різних компонентів, відмінностей по щільності, пористості, формам і розмірам брикетів (Jain et al., 2021; Kondrat'ev et al., 2014; Nokhrina et al., 2022; Poluboyarov et al., 2015; Zhukov et al., 1989). Основним недоліком їх використання є висока температура обробки чавуну (1450<sup>0</sup>C) для забезпечення більш повної засвоюваності модифікатора та низька щільність, що не дозволяє брикетованому модифікатору прореагувати в повному обсязі.

Застосування ж брикетованих модифікаторів на основі нанодисперсних матеріалів дозволяє модифікувати чавун практично при будь-якій температурі розплаву вище 1200°C (Nokhrina et al., 2022; Poluboyarov et al., 2015; Suslo, 2015; Ten et al., 2013).

Метою роботи є створення такого складу брикетованого модифікатора, який дозволить зменшити витрати модифікатора за рахунок прискорення часу його розчинення, збільшити його засвоєння в рідкому чавуні без корінного переозброєння плавильної дільниці існуючих ливарних цехів та підвищити механічні та експлуатаційні властивості чавуну.

Мета досягається завдяки складу розробленого комплексного брикетованого модифікатора, що містить нанодисперсний порошок карбонітриду титану, додатково додається гранульований магній – алюмінієвий сплав МАgr та дисперсна чавунна стружка при такому співвідношенні компонентів, % мас.:

- карбонітрид титану 35...40
- сплав МАgr 5...10
- чавунна стружка решта.

Комплексний брикетований модифікатор також відрізняється від існуючих аналогів тим, що нанодисперсний порошок карбонітриду титану має розмір 10...100 нм.

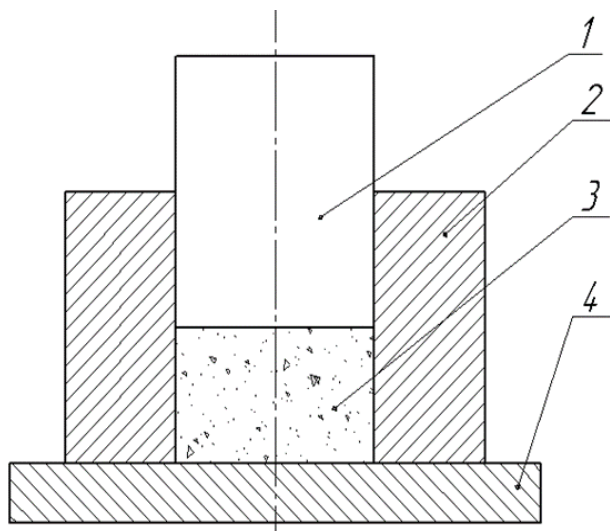
Введення в склад брикетованого модифікатора нанодисперсного порошку карбонітриду титану сприяє подрібненню дендритної структури аустеніту, так як його частини служать додатковими центрами кристалізації. Крім того, карбонітрид титану має саму високу мікротвердість (32000 МПа) з відомих карбідів і карбонітридів (Jain et al., 2021).

Гранульований магнієво–алюмінієвий сплав МАgr складається з 92-95% магнію і алюмінію 5-8%. Викликає зміну форми графіту від пластинчастої форми до кулястої і супроводжується глибокою графітизацією чавуну. Куляста форма графіту має менше відношення його поверхні до об'єму і тим самим визначає найбільшу щільність металевісної основи, а отже, і міцність чавуну. Крім того, бурхлива реакція магнію сприятиме прискорюванню розчинення брикету.

Чавунна стружка збільшує кількість центрів формування графітних включень, схильність до графітизації, засвоєння модифікатора у розплаві, підвищення однорідності структури чавуну, значно підвищує його вагу.

В лабораторних умовах була підготовлена експериментальна партія брикетів.

Шихта для брикетів готувалась шляхом змішування компонентів у шнековому змішувачі. Ущільнення шихти виконувалося в умовах її пресування в циліндровій матриці пуансонами з плоскими торцями (рис.1) при тиску до 7 МПа. Виготовлені брикети (рис.2) витримували упродовж 6 днів для забезпечення природного сушіння, після чого здійснювався контроль їх фізико-механічних та експлуатаційних властивостей, які вказані в таблиці 1.



**Рисунок 1.** Пресформа: 1 – пуансон; 2 – циліндрична матриця; 3 – шихта; 4 – п'ята

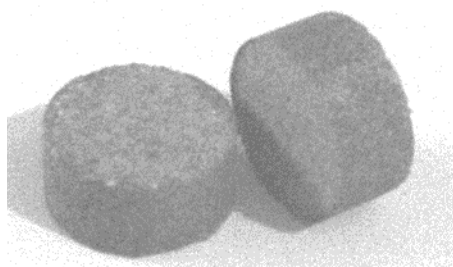


Рисунок 2. Компактований порошок у вигляді брикетів

Таблиця 1. Склад і властивості брикетів

№ п/п	Модифікатор	Склад брикет - модифікаторів, %				Властивості брикетів		Властивості куль	
		TiCN	SiC	MAgr	Чавунна стружка	термоміцність мПа	Час розчинення, хв	HRC	Ударна стійкість, кількість ударів
1	Відомий	55	Решта	-	-	-	7	48	30
2	-	30,0	-	7,5	Решта	10	2,8	49	35
3	Запропонований	35,0	-	7,5	Решта	11	3,0	50	34
4	Запропонований	37,5	-	7,5	Решта	12	3,2	51	34
5	Запропонований	40,0	-	7,5	Решта	13	3,5	53	35
6	-	42,5	-	7,5	Решта	15	4,0	54	32
7	-	37,5	-	4,0	Решта	14	3,8	52	30
8	Запропонований	37,5	-	5,0	Решта	13	3,8	50	32
9	Запропонований	37,5	-	7,5	Решта	12	3,2	50	34
10	Запропонований	37,5	-	10,0	Решта	10	2,5	49	35
11	-	37,5	-	11,0	Решта	9	2,0	49	35

Головна перевага комплексного брикетованого модифікатора полягає в кінетиці про розчинення в чавуні в порівнянні з розчиненням традиційних модифікаторів. При введенні в чавун роздробленого кускового модифікатора на його поверхні наростає скориночка розплаву, із-за чого процес розчинення сповільнюється, і лише після прогрівання (протікання, так званого, "інкубаційного періоду") частинка модифікатора починає розчинятися через плівку шлакових з'єднань, що утворюється, а значить з меншою ефективністю. Брикетований модифікатор, потрапляючи в метал піддається мимовільному дробленню від термічного удару на частинки зіставні за розмірами кластерним з'єднанням. Тим самим, практично відсутній "інкубаційний період" засвоєння модифікатора і різко скорочується час розчинення (тобто засвоєння модифікатора), а значить, зростає і ефективна дія на чавун.

Запропонований модифікатор пройшов випробування в ливарному цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» при обробці чавуну наступного складу: 3,2...3,6% С; 0,8...1,5% Si; 0,3...0,5% Mn; 0,3...0,6% Cr; 0,4...1,2% Ni; не більше 0,12% P і 0,10% S.

Вихідний чавун виплавляли в дуговій печі ДСН – 5т, розливали в ковші, на дно яких попередньо розміщували модифікатор із розрахунку його витрати 0.08% від маси рідкого чавуну. Модифікування проводилось «сендвіч» процесом. З модифікованого чавуну виливали

куль для дослідження їх структури і механічних властивостей. Результати досліджень приведені в таблиці 1.

З таблиці 1 видно, що найбільш високі результати отримані при наявності 35...40 % карбонітриду титану і 5...10% гранульованого магнієво– алюмінієвого сплаву МАгр (склад модифікаторів 3 - 5). При зменшенні кількості карбонітриду титану (склад 2) зменшується твердість чавуну. При збільшенні кількості карбонітриду титану (склад 6) підвищується твердість чавуну, але помітно зменшується ударна стійкість.

Сукупність ознак, які характеризують відоме рішення не забезпечують отримання нових властивостей і тільки наявність відмінних ознак запропонованих модифікаторів, дозволяє отримати нові властивості, новий технічний результат. Запропонований модифікатор може використовуватися при виготовленні куль для гірничо – металургійного обладнання і дозволить отримати значний економічний ефект.

Наприклад, запропонований комплексний брикетований модифікатор використовувався при відливанні дослідної партії чавунних куль, що мелють, які експлуатувалися на збагачувальній фабриці Новокриворізького гірничо-збагачувального комбінату (НКГЗКа) й показали більш високу експлуатаційну стійкість на 18 – 30%, що дозволило знизити собівартість помелу руди.

## **Висновки (Conclusions)**

Результати проведених досліджень дозволяють зробити висновок, що введення модифікаторів у розплав найдоцільніше здійснювати у вигляді брикетів.

Розроблений раціональний склад комплексного брикетованого модифікатора (35...40 % карбонітриду титану, 5...10 % сплаву МАгр, решта чавунна стружка), який дозволяє модифікувати чавун при температурах від 1200<sup>0</sup>С та не потребує додаткового обладнання.

Такий спосіб дозволить економізувати витрати на отримання необхідних механічних та експлуатаційних властивостей залізо-вуглецевих сплавів.

## **Конфлікт інтересів (Conflicts of interest)**

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

## **Фінансування (Funding)**

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування.

## **Внесок авторів (Authors contribution)**

Концептуалізація – С.Н.; формальний аналіз – С.Н. та П.Г.; методологія – С.Н. та Г.Є.; візуалізація – С.Н. та Г.Є.; оригінальна чернетка – С.Н.; перегляд і редагування – Г.Є та П.Г. Усі автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису.

## **Література (References)**

- Abdelrahim, A., Nguyen, H., Omran, M. et al. (2022). Development of Cold-Bonded Briquettes Using By-Product-Based Ettringite Binder from Ladle Slag. *J. Sustain. Metall.* 8, 468–487. <https://doi.org/10.1007/s40831-022-00511-1>
- Burtsev, V.T., Anuchkin, S.N. & Samokhin, A.V. (2018). Investigation into the Interaction of Exogenous Refractory Nanophases with a Fe–C–Si Melt (Cast Iron) at 1350<sup>0</sup>С: I. Justification of the Selection of Nanophases and the Study of Heterophase Interaction. *Nanotechnol Russia* 13, 585–593. <https://doi.org/10.1134/S1995078018060046>

- Burtsev, V.T., Anuchkin, S.N. & Samokhin, A.V. (2018). Investigation into the Interaction of Exogenous Refractory Nanophases with a Fe–C–Si Melt (Cast Iron) at 1350°C: II. Effect of Nanophases on Surface Tension, Density of Melt, and Mechanical Properties of Metal. *Nanotechnol Russia* 13, 594–601. <https://doi.org/10.1134/S1995078018060058>
- Imasogie, B.I. (2003). Microstructural features and mechanical properties of compacted graphite iron treated with calcium-magnesium based masteralloy. *J. of Materi Eng and Perform* 12, 239–243. <https://doi.org/10.1361/105994903770343060>
- Jain, AS., Chang, H. & Zhang, MX. (2021). Effect of TiB<sub>2</sub> addition on microstructure and mechanical properties of a hypereutectic high chromium cast iron. *J Mater Sci* 56, 19047–19059. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06429-5>
- Kondrat'ev, V.V., Balanovskii, A.E., Ivanov, N.A. et al. (2014). Evaluation of the Effect of Modifier Composition with Nanostructured Additives on Grey Cast Iron Properties. *Metallurgist* 58, 377–387. <https://doi.org/10.1007/s11015-014-9919-x>
- Nokhrina, O.I., Gizatulin, R.A., Golodova, M.A. et al. (2022). Alloying and Modification of Iron-Carbon Melts with Natural and Man-Made Materials. *Metallurgist* 65, 1429–1448. <https://doi.org/10.1007/s11015-022-01289-z>
- Poluboyarov, V.A., Korotaeva, Z.A., Zhdanok, A.A. et al. (2015). In-mold modification of iron: Influence of nanomodifiers on gray-iron performance. *Part 3. Steel Transl.* 45, 723–728. <https://doi.org/10.3103/S0967091215100137>
- Suslo N.V. (2015). Research on the effect of processing cast iron with complex briquetted modifiers on its properties. *State Higher Educational Institution "Priazov State Technical University"*, 31. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovaniya-vliyaniya-obrabotki-chuguna-kompleksnymi-briketirovannymi-modifikatorami-na-ego-svoystva>
- Ten, E.B., Rozhkova, E.V. & Konyukhova, A.I. (2013). Thermodynamic aspects of the modification of low-chromium cast iron. *Steel Transl.* 43, 717–719. <https://doi.org/10.3103/S0967091213110211>
- Zhukov, A.A., Dybenko, I.V., Abdullaev, É.V. et al. (1989). Novelties in the theory of graphitization. Modification of cast iron by inoculation. *Met Sci Heat Treat* 31, 99–107. <https://doi.org/10.1007/BF00738143>