

Леушин И.О., Вахидов У.Ш., Рябова Л.И., Субботин А.Ю., Шиляев А.А.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТРАБОТАННЫХ АВТОШИН В КАЧЕСТВЕ КАРБЮРИЗАТОРА ПРИ ВЫПЛАВКЕ СИНТЕТИЧЕСКОГО ЧУГУНА

Аннотация. В настоящее время в связи с ограниченным доступом и дороговизной первичных шихтовых материалов производственники все чаще обращаются к технологии выплавки синтетического чугуна, получаемого из железоуглеродистых материалов, стального лома, возврата собственного производства, листовой обрезки, высадки тонколистовой стали, стружки и других низкосортных дешевых стальных отходов, обедненных углеродом, посредством управляемого науглероживания расплава. В контексте общего тренда экологизации разработок авторами данной статьи ранее был предложен и успешно опробован в условиях действующего производства вариант применения материала отработавших автошин в качестве карбюризатора стального расплава. Целью данной работы стало описание и объяснение поведения выбранного материала при нагреве в широком диапазоне температур и поиск теоретических оснований и предпосылок его применения в качестве карбюризатора стального расплава на синтетический чугун. При этом применялись теоретические методы исследования, не предполагающие непосредственных экспериментов с материалом, а опирающиеся на уже имеющуюся и полученную информацию о нем, – оценка возможности и условий протекания химических реакций и термодинамический расчёт изменения состава материала от температуры по методике профессора А.М. Куткина. В итоге показано, что в условиях проведения индукционной плавки стали создаются температурные условия, достаточные для получения из материала отработавших автошин графитоподобных структур и в конечном итоге углерода для науглероживания металлического расплава, а также для удаления из системы элементов, ухудшающих качество получаемого металла.

Ключевые слова: синтетический чугун, карбюризатор, отработавшие автошины, стальной расплав, науглероживание, низкотемпературный пиролиз, карбонизация, графитизация

Введение

В настоящее время в связи с ограниченным доступом и дороговизной первичных шихтовых материалов производственники все чаще обращаются к технологии выплавки синтетического чугуна, получаемого из железоуглеродистых материалов, стального лома, возврата собственного производства, листовой обрезки, высадки тонколистовой стали, стружки и других низкосортных дешевых стальных отходов, обедненных углеродом, посредством управляемого науглероживания расплава [1].

Накоплен уже солидный опыт плавки такого чугуна в электрических индукционных печах и производства из него литых заготовок деталей ответственного и особо ответственного назначения, например, локомотивных и вагонных колодок, фрикционных клиньев, коленчатых валов, блоков цилиндров, головки блока двигателей внутреннего сгорания и др., работающих при высоких силовых нагрузках и повышенных температурах [2-6].

При этом для науглероживания металлического расплава в качестве карбюризаторов крупные предприятия, например автомобильные заводы ГАЗ и КамАЗ, используют бой графитовых электродов дуговых электропечей, природный графит, кокс, термоантрацит или специальные комплексные углеродсодержащие композиции. Некоторые из них, имея вполне удовлетворительный набор технологических свойств (зольность, расход, степень усвоения металлическим расплавом), характеризуются дефицитностью и высокой ценой, другие доступны и дешевы, но уступают первым в технологичности и содержат в своем составе

повышенное количество серы, являющейся для чугуна вредной примесью и препятствующей эффективному модифицированию.

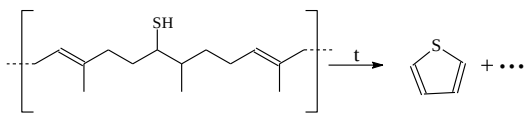
На этом фоне в контексте общего тренда экологизации разработок авторами данной статьи был предложен и успешно опробован в условиях действующего производства вариант применения материала отработавших автошин в качестве карбюризатора стального расплава. Синтетическая резина, являющаяся основным компонентом состава этого материала, по данным ряда информационных источников, более чем на 90% представляет собой высокомолекулярный углеводород, претерпевающий термодеструкцию и выделяющий углерод в интервале рабочих температур плавки [7-9].

Целью данной работы было описание и объяснение поведения выбранного материала при нагреве в широком диапазоне температур и поиск теоретических оснований и предпосылок его применения в качестве карбюризатора стального расплава на синтетический чугун.

При этом применялись теоретические методы исследования, не предполагающие непосредственных экспериментов с материалом, а опирающиеся на уже имеющуюся и полученную информацию о нем, – оценка возможности и условий протекания химических реакций и термодинамический анализ изменений состава материала в зависимости от температуры.

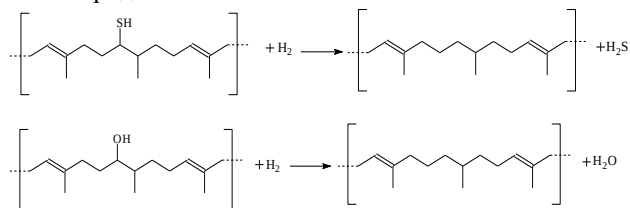
Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

Поскольку, как известно, автошины получают с использованием полимерного материала, то его основа содержит достаточно большое количество углерода, который можно использовать для получения ряда



Тиофен достаточно устойчив за счет ароматичности, но у него не очень высокая температура кипения и в условиях проведения процесса он находится в газообразном состоянии.

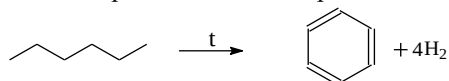
За счет освобождения водорода полимерная цепь может освобождаться от групп различных химических элементов в виде летучих продуктов, приведём примерные схемы этих процессов для удаления серы и кислорода:



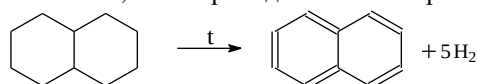
Следует отметить, что освобождение от серы наиболее трудно протекает именно для тиофена, однако его газообразное состояние в условиях процесса и дальнейшее повышение температуры реакционной смеси позволяют сделать предположение о том, что значительных количеств серы в образующейся графитоподобной части за счет тиофена ожидать не приходится.

При повышении температуры до 800°C и выше увеличивается скорость описанных выше процессов и добавляются новые трансформации. Тут можно говорить о реакциях, обычно относимых к процессам риформинга в нефтепереработке.

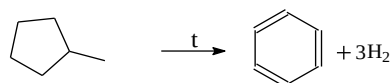
Во-первых, к процессам циклизации углеводородных цепей добавляются процессы дегидроциклизации, подобно приведенной ниже реакции:



Во-вторых, происходит дегидрирование циклических соединений, приводящее к образованию ароматических систем, как в приводимом ниже примере:

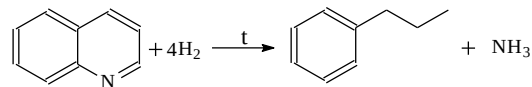


В-третьих, углеводороды, содержащие в своей структуре пятичленные циклы, изомеризуются в структуры с шестичленным циклом. Такая трансформация может происходить без выделения водорода и образования ароматической системы, но в дальнейшем за счет дегидрирования превращаться в ароматическое соединение. Но возможными становятся одновременная изомеризация и отщепление водорода. Пример именно такой дегидроизомеризации выглядит так:

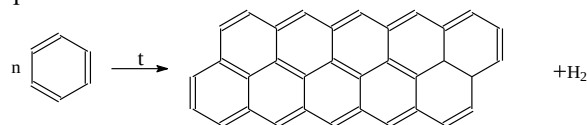


В приведенных выше трех примерах трансформаций намеренно заострено внимание на значительном

количестве выделяющегося в них водорода. В таких условиях становится еще более благоприятным отщепление неуглеводородных групп. Для наглядности приведем пример отщепления азота из его достаточно устойчивого соединения хинолина:



Еще одним из процессов, протекающих при повышении температуры, является коксообразование. Этот процесс связан с реакциями уплотнения на поверхности металла:



Нетрудно заметить, что структура образующегося при коксообразовании агломерата полностью совпадает с общепринятыми представлениями о структуре графита, что подтверждает образование этого продукта в рассматриваемых условиях.

Если учесть, что реакции образования ароматических соединений из предельных и циклических соединений идут с поглощением тепла, а реакции гидрокрекинга и гидрирования углеводородов происходят с его выделением, то с ростом температуры образование графитоподобных агломератов становится преобладающим, что используется в производстве углеродных волокон и по аналогии может стать источником углерода в рассматриваемом нами процессе.

Термодинамический расчет изменения состава материала отработавших автошин как системы в зависимости от температуры, выполненный с использованием методики профессора А.М. Кутына* [17], подтверждает сказанное выше. В частности, наблюдающееся при температурах от 400 К образование метана уменьшается с ростом температуры, тогда как водород, образование которого при тех же 400 К практически отсутствует, после 700 К уже начинает выделяться в заметных количествах вплоть до 1400 К, когда наблюдается максимум на уровне 0,122 мольной доли в равновесной газовой фазе, с последующими снижением до 0,08 при 1500 К и стабилизацией (рис. 1).

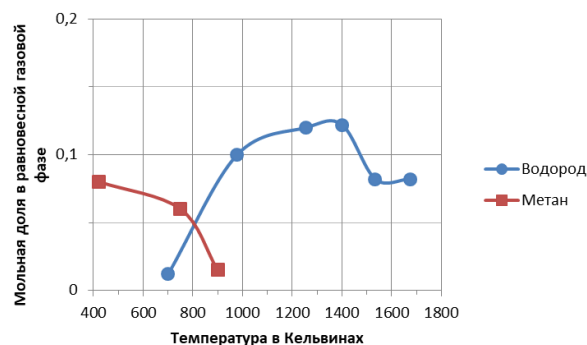


Рис. 1. Изменение количества образующихся водорода и метана в зависимости от температуры

* В работе принимал участие д-р хим. наук, профессор А.М. Кутын

Наряду с этим термодинамический расчет показывает максимальное количество образовавшегося углерода (графита) на уровне 0,07 мольной доли, фиксируется в температурном диапазоне от 950 до 1400 К (рис. 2).

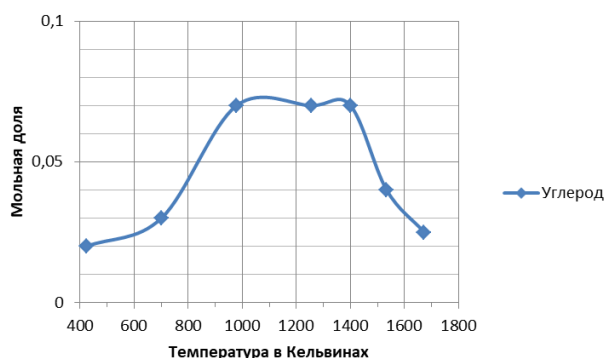


Рис. 2. Зависимость количества образующегося углерода от температуры

Заключение

Резюмируя сказанное выше, можем заключить, что в условиях проведения индукционной плавки стали создаются температурные условия, достаточные для получения из материала отработавших автошин графитоподобных структур и в конечном итоге углерода для науглероживания металлического расплава, а также для удаления из системы элементов, ухудшающих качество получаемого металла. Основным путём их удаления станет образование газообразных продуктов. Однако при этом необходимо учитывать, что ряд этих продуктов обладает неприятным запахом, а также способствует коррозии металлических частей оборудования, хотя это и будет проявляться в максимальной степени при температурах, допускающих конденсацию влаги.

Список источников

1. Шумихин В.С., Лузан П.П., Жельнис М.В. Синтетический чугун. Киев: Наукова думка, 1971. 159 с.
2. Туракулов М.Р., Турсунов Н.К., Юнусов С.З. Выплавка синтетического чугуна в индукционной тигельной печи с учетом нормы расхода карбюризаторов // *Universum: технические науки*. 2024. №4-4(121). С. 34-41.
3. Дьяконов О.М. Отходы черных металлов, их безопасная и экономичная переработка // *Литье и металлургия*. 2025. №1. С. 58-66.
4. Фарисов Р.Д., Козловский В.Н., Иоффе М.А. Применение концепции бережливости в массовом чугунолитейном производстве // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2022. №9. С. 386-392.
5. Выплавка синтетического чугуна с использованием материалов, содержащих карбид кремния / Гребнев Ю.В., Жаркова В.Ф., Гребнев Д.Ю., Габельченко А.И. // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2022. №7(266). С. 94-97.
6. Чайкин А.В. Теория и практика модифицирования ответственных железнодорожных отливок из серого чугуна высоких марок // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2024. Т. 80, №5. С. 37-44.
7. Применение материала изношенных автомобильных шин для науглероживания синтетического чугуна индукционной выплавки / Леушин И.О., Рябова Л.И., Вахидов У.Ш., Субботин А.Ю., Шилиев А.А. // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2025. №7. С. 26-30.
8. Производство синтетического чугуна с использованием материала изношенных автомобильных шин / Леушин И.О., Вахидов У.Ш., Рябова Л.И., Шилиев А.А. // *Литейное производство*. 2026. №4. С. 3-7.
9. Пат. 2853871 Российская Федерация, МПК C21C 1/08, C22C 37/00. Применение карбюризатора для науглероживания синтетического чугуна / Леушин И.О., Шилиев А.А., Рябова Л.И.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева». 2025114281; заявл. 27.05.2025; опубл. 26.12.2025.
10. Производство углеродных волокон. История, перспективы / Жарков Г.М., Скивка Е.М., Куликов М.В., Куликова Т.А. // XV международная научно-практическая конференция молодых ученых, посвященная 64-й годовщине полета Ю.А. Гагарина в космос: сборник научных статей (Краснодар, 15–16 апреля 2025 года). Краснодар: Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков им. А.К. Серова, 2025. С. 250-255.
11. Клименко И.В. Углеродные волокна на основе пекка: состояние производства и модификация свойств // *Химическая физика*. 2022. Т. 41, №2. С. 70-77.
12. Нурмухаметова А.Н., Зенитова Л.А. Углеродное волокно. Конъюнктура рынка, структура спроса, перспективные рынки продуктов на его основе, области применения // *Бутлеровские сообщения*. 2022. Т. 72, №10. С. 102-130.
13. Жданкова Д.С., Тимофеев П.А., Тимофеев А.Н. Углеродные и карбидокремниевые волокна, используемые для армирования керамоматричных композиционных материалов // *Сварочное производство*. 2023. №1. С. 5-10.
14. Углеродные волокна [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://xumuk.ru/encyklopedia/2/4640.html> (дата обращения: 22.05.2026).
15. Кукарцев В.А. Разработка высокотемпературной технологии производства синтетического чугуна в индукционных тигельных печах промышленной частоты: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2016. 22 с.

16. Туракулов М.Р., Турсунов Н.К., Юнусов С.З. Инновационный способ выплавки синтетического чугуна // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов: материалы международной научно-практической конференции (Гомель, 16-17 ноября 2023 года). Гомель: Белорусский государственный университет транспорта, 2023. С. 94-95.
17. Кутяин А.М., Кацнельсон К.М., Медвежкая В.Ю. Метод расчета равновесных и условно равновесных состояний многокомпонентных гетерогенных систем // Применение математических методов для описания и изучения физико-химических равновесий: тезисы докл. VI Всес. школы семинара. Новосибирск, 1989. С. 64-66.

Сведения об авторах

Леушин Игорь Олегович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. Email: igoleu@yandex.ru.

Вахидов Умар Шахидович – доктор технических наук, профессор, проректор по работе с промышленными партнерами, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. Email: mto@nntu.ru.

Рябова Любовь Игоревна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. Email: kafmto@mail.ru.

Субботин Андрей Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология электрохимических производств и химия органических веществ», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. Email: an_s_temp@mail.ru.

Шиляев Александр Алексеевич – аспирант кафедры «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. Email: sashashil46@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

THERMODYNAMIC PREREQUISITES FOR USING WASTE TYRES AS A CARBURIZER IN THE MELTING OF SYNTHETIC IRON

Leushin Igor O. – Dr. Sci. (Tech), Prof., Head of the Department of metallurgical technologies and equipment, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia.

Vakhidov Umar Sh. – Dr. Sci. (Tech), Prof., Vice-Rector for Work with Industrial Partners, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia.

Ryabova Liubov I. – Cand. Eng., Associate Prof., Associate Prof. of the Department of metallurgical technologies and equipment, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia.

Subbotin Andrey Yu. – Cand. Eng., Associate Prof., Associate Prof. of the Department of technology of electrochemical production and chemistry of organic substances, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia.

Shilyaev Alexander A. – postgraduate student of the Department of metallurgical technologies and equipment, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia.

Abstracts. Currently, due to the limited access and expensive raw materials of beech materials, manufacturers are increasingly turning to the technology of smelting synthetic cast iron obtained from iron ore materials, steel scrap, return of their own production, Sheet cutting, carving of fine steel, shavings and other low-grade low-carbon steel scrap through controlled remelting. In the context of the overall trend of greening the developments by the authors of this article, the use of used tires as a steel melt carburetor was previously proposed and successfully tested under current production conditions. The aim of this work was to describe and explain the behavior of the selected material during heating in a wide temperature range and to find theoretical grounds and prerequisites for its application as a carbonizer for the smelting of steel on synthetic cast iron. Theoretical research methods were applied, not involving direct experiments with the material, but based on existing and obtained information about it, - assessment of the possibility and conditions of chemical reactions and thermodynamic calculation of the change in material composition as a function of tempera-

ture using the methodology of professor A.M. Kutin. In the end, it is shown that induction smelting conditions create temperature conditions sufficient to obtain from material of exhaust autoshafts graphite-like structures and eventually carbon for the bonding of a metal melt and to remove from the system elements that impair the quality of the metal obtained.

Keywords: synthetic cast iron, carbonizer, used car tires, steel plating, carbonization, low-temperature pyrolysis, carbonation, graphitization

References

1. Shumikhin V.S., Luzan P.P., Zhelnis M.V. Synthetic Cast Iron. Kyiv: «Naukova Dumka», 1971. 159 p.
2. Turakulov M.R., Tursunov N.K., Yunusov S.Z. Smelting of Synthetic Cast Iron in an Induction Crucible Furnace Taking into Account the Norm of Carburer Consumption // *Universum: Technical Sciences*. 2024, no. 4-4(121), pp. 34-41.
3. Dyakonov O.M. Ferrous Metal Waste, Their Safe and Economical Recycling // *Casting and Metallurgy*. 2025, no. 1, pp. 58-66.
4. Farisov R.D., Kozlovsky V.N., Ioffe M.A. Application of the Lean Concept in Mass Cast Iron Production // *Bulletin of Tula State University. Technical Sciences*. 2022, no. 9, pp. 386-392.
5. Grebnev Y.V., Zharkova V.F., Grebnev D.Y., Gabelchenko A.I. Smelting of Synthetic Cast Iron Using Materials Containing Silicon Carbide // *Bulletin of Volgograd State Technical University*. 2022, no. 7(266), pp. 94-97.
6. Chaikin A.V. Theory and practice of modifying critical railway castings made of high-grade gray cast iron // *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical, and Economic Information*. 2024, vol. 80, no. 5, pp. 37-44.
7. Leushin I.O., Ryabova L.I., Vakhidov U.Sh., Subbotin A.Yu., Shilyaev A.A. Use of worn automobile tire material for carburizing synthetic cast iron in induction melting // *Herald of Volgograd State Technical University*. 2025, no. 7, pp. 26-30.
8. Leushin I.O., Vakhidov U.Sh., Ryabova L.I., Shilyaev A.A. Production of synthetic cast iron using worn automobile tire material // *Foundry Production*. 2026, no. 4, pp. 3-7.
9. Pat. 2853871 Russian Federation, IPC C21C 1/08, C22C 37/00. Use of a carburizer for carburizing synthetic cast iron / Leushin I.O., Shilyaev A.A., Ryabova L.I.; patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev». 2025114281; filed 27.05.2025; published 26.12.2025.
10. Zharkov G.M., Skivka E.M., Kulikov M.V., Kulikova T.A. Production of carbon fibers. History, prospects // XV International Scientific and Practical Conference of Young Scientists dedicated to the 64th anniversary of Y.A. Gagarin's flight into space: collection of scientific articles (Krasnodar, April 15-16, 2025). Krasnodar: Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots named after A.K. Serov, 2025, pp. 250-255.
11. Klimenko I.V. Carbon fibers based on PEEK: production status and modification of properties // *Chemical Physics*. 2022, vol. 41, no. 2, pp. 70-77.
12. Nurmukhametova A.N., Zenitova L.A. Carbon fiber. Market conditions, demand structure, promising markets for its products, areas of application // *Butlerov Communications*. 2022, vol. 72, no. 10, pp. 102-130.
13. Zhdankova D.S., Timofeev P.A., Timofeev A.N. Carbon and silicon carbide fibers used for reinforcing ceramic-matrix composite materials // *Welding Production*. 2023, no. 1, pp. 5-10.
14. Carbon fibers [Electronic resource]. Access mode: <https://xumuk.ru/encyklopedia/2/4640.html> (date of the application 22.05.2026).
15. Kukartsev V.A. Development of high-temperature technology for the production of synthetic cast iron in industrial frequency induction crucible furnaces: abstract of the dissertation ... for the degree of Candidate of Technical Sciences. Krasnoyarsk, 2016. 22 p.
16. Turakulov M.R., Tursunov N.K., Yunusov S.Z. Innovative method of smelting synthetic cast iron // *Innovative development of transport and construction complexes: Materials of the international scientific-practical conference (Gomel, November 16-17, 2023)*. Gomel: Belarusian State University of Transport, 2023, pp. 94-95.
17. Kutyin A.M., Katsnelson K.M., Medvetskaya V.Yu. A method for calculating equilibrium and conditional equilibrium states of multicomponent heterogeneous systems // *Abstracts of the report VI Vses. schools of the seminar «Application of mat. methods for the description and study of physico-chemical. balances»*. Novosibirsk, 1989, pp. 64-66.

Ссылка на статью:

Термодинамические предпосылки использования отработанных автошин в качестве карбюризатора при выплавке синтетического чугуна / Леушин И.О., Вахидов У.Ш., Рябова Л.И., Субботин А.Ю., Шильяев А.А. // *Теория и технология металлургического производства*. 2026. №3(58). С. 35-40. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-35-40](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-35-40)
 Leushin I.O., Vakhidov U.Sh., Ryabova L.I., Subbotin A.Yu., Shilyaev A.A. Thermodynamic prerequisites for using waste tyres as a carburizer in the melting of synthetic iron. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 58, no. 3, pp. 35-40. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-35-40](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-35-40)