



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-1-153-159>
УДК 621.785.53

Поступила 30.01.2026
Received 30.01.2026

ПРИМЕНЕНИЕ БИОУГЛЕРОДА ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПОРОШКОВОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ И НИТРОЦЕМЕНТАЦИИ СТАЛЕЙ

В. М. КОНСТАНТИНОВ, В. А. ЛЕШОК, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: vm.konstantinov@bntu.by
С. А. ЯНКОВСКИЙ, Томский политехнический университет, г. Томск, Россия, пр. Ленина, 30

Исследована возможность применения биоуглеродов в качестве углеродсодержащих компонентов порошковых составов для цементации и нитроцементации. Установлено, что толщина цементованных и нитроцементованных слоев для составов на основе биоуглерода выше, чем для составов на основе традиционного карбюризатора, полукокса и антрацита. Обсуждены причины ускорения процесса. Определено оптимальное содержание компонентов составов на основе биоуглерода для порошковой цементации и нитроцементации.

Ключевые слова. Интенсификация химико-термической обработки, цементация, нитроцементация, биоуглерод, ускорение диффузионных процессов.

Для цитирования. Константинов, В. М. Применение биоуглерода для интенсификации порошковой цементации и нитроцементации сталей / В. М. Константинов, В. А. Лешок, С. А. Янковский // Литье и металлургия. 2026. № 1. С. 153–159. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-1-153-159>.

APPLICATION OF BIOCHAR FOR INTENSIFYING POWDER CARBURIZING AND NITROCARBURIZING OF STEELS

V. M. KONSTANTINOV, V. A. LESHOK, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: vm.konstantinov@bntu.by
S. A. YANKOVSKY, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, 30, Lenina ave.

The possibility of using biochars as carbon-bearing components of powder mixtures for carburizing and nitrocarburizing was investigated. It was established that the thicknesses of carburized and nitrocarburized layers produced using biochar-based mixtures are greater than those obtained with mixtures based on conventional carburizers, semicoke, and anthracite. The reasons for the process acceleration were discussed. Optimal component contents of the biochar-based mixtures for powder carburizing and nitrocarburizing were determined.

Keywords. Intensification of thermochemical treatment, carburizing, nitrocarburizing, biocarbon, acceleration of diffusion processes.

For citation. Konstantinov V. M., Leshok V. A., Yankovsky S. A. Application of biochar for intensifying powder carburizing and nitrocarburizing of steels. Foundry production and metallurgy, 2026, no. 1, pp. 153–159. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-1-153-159>.

Введение

Одним из актуальных направлений интенсификации [1–5] порошковой цементации и нитроцементации (карбонитрирования) сталей [6–9] является замена традиционных углеродсодержащих компонентов насыщающих составов [10–12]. Среди многих углеродсодержащих материалов известны биоуглероды (биоуголь), получаемые пиролизом пищевых отходов [13]. Изучены особенности пористой структуры биоуглеродов [13], которые потенциально могут привести к повышению насыщающей способности. По оценкам Программы ООН по окружающей среде, объем пищевых отходов составляет порядка 931 млн. т в год. При этом значительная часть отходов направляется на полигоны и иные способы утилизации [14]. Поиск вторичного использования пищевых отходов является актуальной задачей [15].

Цель настоящей работы – исследовать возможность применения биоуглеродов в качестве углеродсодержащих компонентов порошковых составов для цементации и нитроцементации сталей, а также установить связь между особенностями пористой структуры углеродсодержащих компонентов и их насыщающей способностью.

Материалы и методы исследований

В качестве углеродсодержащих компонентов насыщающих смесей использовали биоуглерод из скорлупы кедрового ореха после пиролиза (далее – биоуглерод (кедр)); биоуглерод из кофейного жмыха после пиролиза (далее – биоуглерод (кофе)); карбюризатор на основе древесного угля; полукокс; антрацит.

Для получения биоуглерода исходную биомассу помещали в термостойкий контейнер и загружали в муфельную электрическую печь. Пиролиз проводили при 600 °С в течение 1 ч. Для исключения окисления материала в рабочем объеме муфеля формировали инертную атмосферу аргона (расход – 145 мл/мин). После выдержки контейнер охлаждали совместно с печью до комнатной температуры.

Характеристики пористой структуры углеродсодержащих материалов определяли методом низкотемпературной адсорбции-десорбции азота на адсорбционном анализаторе Sync420A (Германия). С помощью прибора рассчитывали удельную поверхность по методу Брунауэра – Эммета – Теллера; суммарный объем пор – по количеству адсорбированного азота; площадь и объем микропор – по методу t-plot; распределение объема пор – по модели ВЈН.

В качестве материала для диффузионного насыщения использовали сталь 20 (ГОСТ 1050-2013). В камерной электрической печи SNOL 7,2/1100 выполняли цементацию при 920 °С в течение 4 ч; нитроцементацию при 580 °С в течение 6 ч. Химико-термическую обработку (ХТО) проводили порошковым методом в контейнерах, для герметизации которых использовали систему плавкого затвора. Для каждого насыщающего состава обработку осуществляли не менее чем на трех образцах. Для выявления цементованного слоя после цементации образцы закаливали в воде с температурой 920 °С и затем подвергали отпуску при 160 °С с охлаждением на воздухе.

Металлографические исследования выполняли на оптическом микроскопе Leica (Германия). Для выявления структуры использовали стандартные металлографические реактивы. Морфологию углеродсодержащих материалов исследовали на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA3 (Чехия).

Микротвердость диффузионных слоев измеряли по Виккерсу на микротвердомере ПМТ-3М при нагрузке 100 гс. Измерения выполняли на поперечных шлифах от поверхности к сердцевине с построением профилей микротвердости. Значения микротвердости в каждой точке профиля определяли как среднее не менее пяти измерений.

За толщину цементованного слоя принимали расстояние от поверхности до точки, на которой микротвердость составляла 550 HV. За толщину нитроцементованного слоя принимали расстояние от поверхности до точки, на которой микротвердость превышала твердость сердцевины на 50 HV. Степень интенсификации ХТО определяли как относительное увеличение толщины диффузионного слоя по сравнению с базовым составом.

Результаты и их обсуждение

Выполнены сравнительные исследования биоуглеродов и традиционных порошковых насыщающих сред. По данным табл. 1, удельная поверхность биоуглеродов превышает значения для древесного угля в 1,9–2,1 раза, полукокса – в 3,4–3,7 раза, антрацита – в 5,9–6,5 раза. Суммарный объем пор биоуглеродов выше, чем для древесного угля в 2,9–3,1 раза, полукокса – в 4,8–5,0 раза, антрацита – в 12,4–13,0 раза. Площадь микропор для биоуглеродов больше, чем для древесного угля в 2,3 раза, а объем микропор – в 5,0–5,5 раза. Для полукокса и антрацита микропоры не выявлены.

Т а б л и ц а 1. Характеристика пористой структуры углеродсодержащих материалов

Материал	Удельная поверхность, м ² /г	Суммарный объем пор, см ³ /г	Площадь микропор, м ² /г	Объем микропор, см ³ /г
Биоуглерод (кедр)	15,72	0,065	5,742	0,011
Биоуглерод (кофе)	14,33	0,062	5,725	0,010
Древесный уголь	7,48	0,021	2,514	0,002
Полукокс	4,24	0,013	0	0
Антрацит	2,42	0,005	0	0

По данным табл. 2, доля микропор биоуглеродов превышает значения для древесного угля в 1,6–1,7 раза. Доля мезопор для биоуглеродов больше, чем для древесного угля в 1,8 раза, полукокса – в 1,2 раза, антрацита – в 1,3 раза. Доля макропор биоуглеродов меньше, чем для древесного угля в 6,7–9,4 раза, полукокса – в 5,3–7,4 раза, антрацита – в 6,0–8,4 раза.

Таблица 2. Распределение объема пор углеродсодержащих материалов

Материал	Доля пор по объему, с размерами			
	<2 нм, %	2–10 нм, %	10–50 нм, %	>50 нм, %
Биоуглерод (кедр)	17	54	24	5
Биоуглерод (кофе)	16	51	26	7
Древесный уголь	10	18	25	47
Полукокс	0	17	46	37
Антрацит	0	9	49	42

По данным сканирующей электронной микроскопии, установлено, что частицы биоуглерода в основном имеют размер 30–40 мкм (рис. 1). Доля частиц размером менее 30 мкм составляет 16%, более 40 мкм – 4%. Ребра и грани частиц в основном скруглены. Внутренняя структура характеризуется слоистым строением: в среднем 7–15 слоев на частицу при толщине отдельного слоя 2–3 мкм (рис. 2).

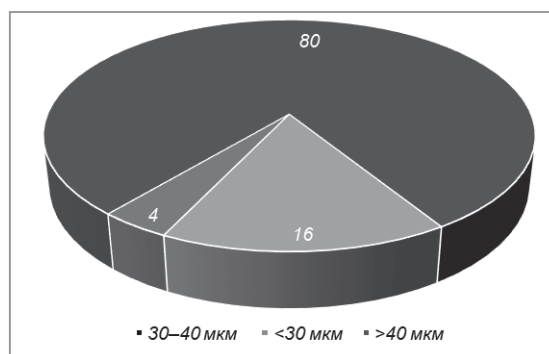
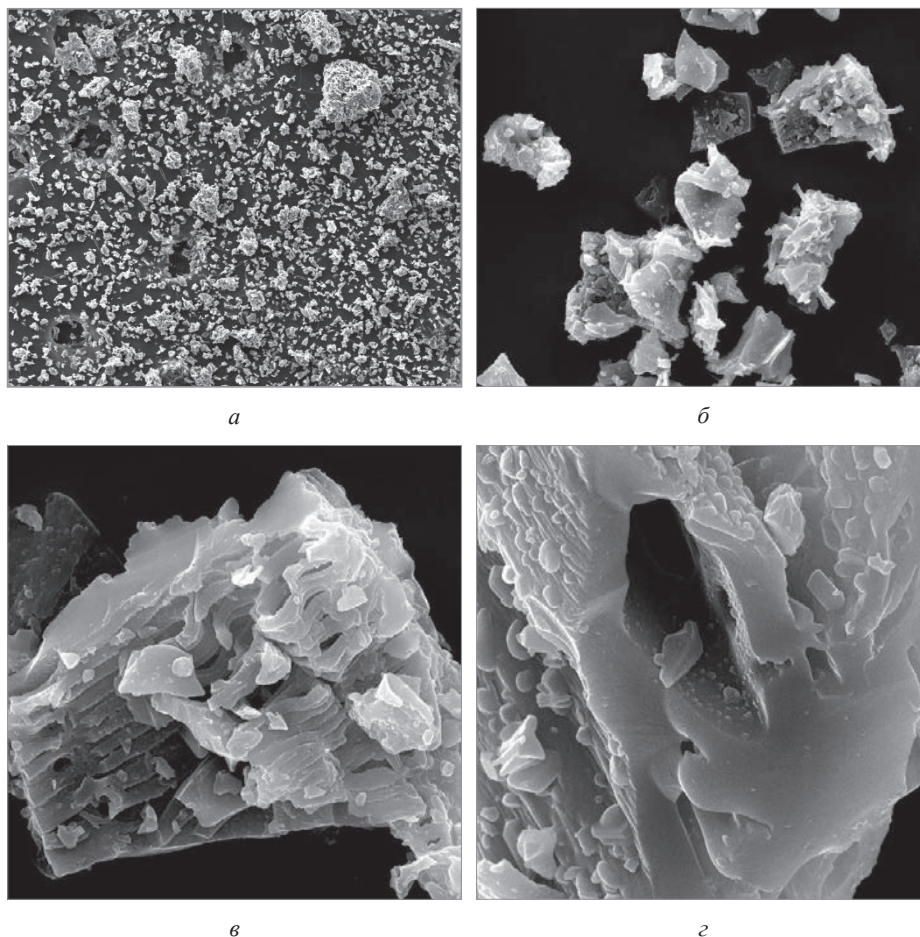


Рис. 1. Распределение размеров частиц биоуглерода

Рис. 2. Топография поверхности частиц биоуглерода: а – $\times 150$; б – $\times 2000$; в – $\times 10000$; г – $\times 20000$

На следующем этапе исследований был изучен процесс цементации и нитроцементации стали 20 в различных порошковых средах. По данным табл. 3, толщина цементованного слоя для составов на основе биоуглерода (рис. 3, *а*) выше, чем для составов на основе древесного угля на 20–21 % (рис. 3, *б*), полукокса – на 37–38, антрацита – на 48–49 %.

Т а б л и ц а 3. Влияние углеродсодержащего материала на толщину цементованного слоя

Состав для цементации, мас. %	Толщина цементованного слоя, мкм	Степень интенсификации, %
91 % биоуглерода (кедр) + 9 % BaCO_3	472	21
91 % биоуглерода (кофе) + 9 % BaCO_3	469	20
Карбюризатор древесноугольный (ГОСТ 2407-84)*	390	0
Карбюризатор полукоксовый (ГОСТ 5535-76)	343	–12
91 % антрацита + 9 % BaCO_3	316	–19

*Базовый состав.

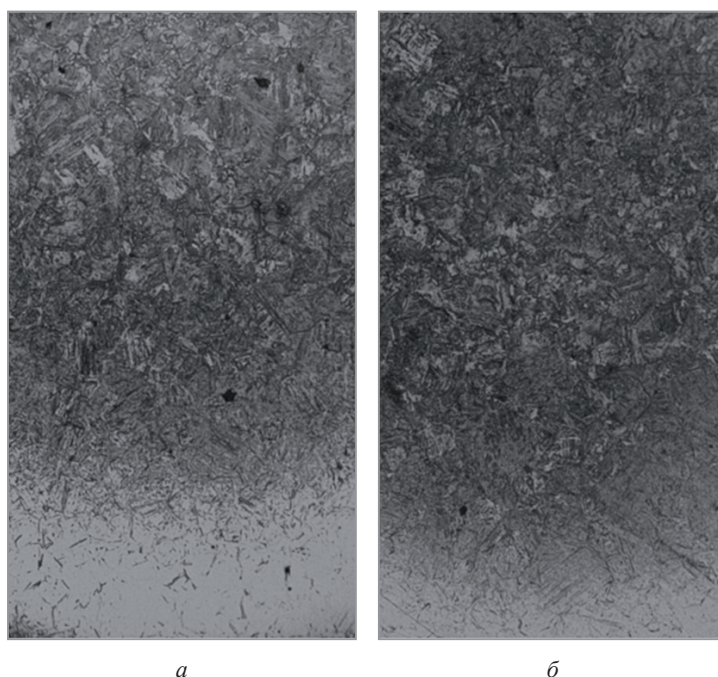


Рис. 3. Микроструктура после цементации в составе на основе древесного угля (*а*); биоуглерода (*б*)

Аналогичная картина установлена для процесса нитроцементации. По данным табл. 4, толщина нитроцементованного слоя для составов на основе биоуглерода (рис. 4, *а*) выше, чем для составов на основе древесного угля на 19–20 % (рис. 4, *б*), полукокса – на 34–35; антрацита – на 49–50 %.

Т а б л и ц а 4. Влияние углеродсодержащего материала на толщину нитроцементованного слоя

Состав для нитроцементации	Толщина нитроцементованного слоя, мкм	Степень интенсификации, %
30 % $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ + 55 % биоуглерода (кедр) + 15 % $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$	126	20
30 % $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ + 55 % биоуглерода (кофе) + 15 % $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$	125	19
30 % $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ + 55 % древесного угля + 15 % $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ *	105	0
30 % $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ + 55 % полукокса + 15 % $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$	93	–11
30 % $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ + 55 % антрацита + 15 % $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$	84	–20

*Базовый состав.

Установлено, что влияние содержания биоуглерода в насыщающей смеси носит нелинейный характер. По данным табл. 5, оптимальное содержание компонентов состава на основе биоуглерода для цементации 8–12 % BaCO_3 , 88–92 % биоуглерода.

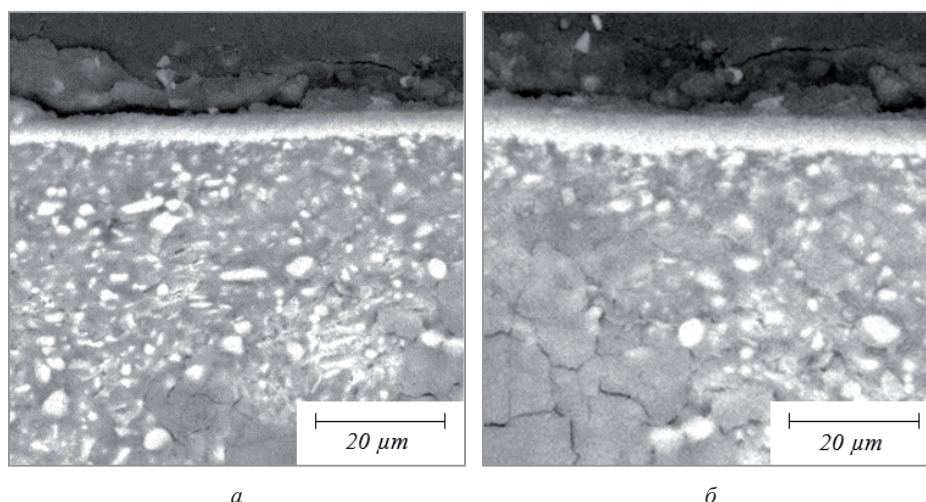


Рис. 4. Микроструктура после нитроцементации в составе на основе древесного угля (а); биоуглерода (б)

Таблица 5. Результаты изменения количества компонентов в составе для цементации на основе биоуглерода

Биоуглерод, мас. %	BaCO ₃ , мас. %	Толщина цементованного слоя, мкм	Степень интенсификации, %
Карбюризатор древесноугольный*		390	0
100	0	412	6
99	1	416	7
98	2	418	7
97	3	422	8
96	4	425	9
95	5	428	10
94	6	437	12
93	7	441	13
92	8	459	18
91	9	469	20
90	10	463	19
89	11	455	17
88	12	452	16
87	13	434	11
86	14	427	9
85	15	423	8
84	16	420	8
83	17	419	7
82	18	415	6
81	19	414	6
80	20	413	6

*Базовый состав.

Аналогичная ситуация установлена для процесса нитроцементации. По данным табл. 6, оптимальное содержание компонентов состава на основе биоуглерода для нитроцементации 20–30 % K₄[Fe(CN)₆], 55–70 % биоуглерода, 10–15 % (NH₂)₂CO.

Таблица 6. Результаты изменения количества компонентов в составе для нитроцементации на основе биоуглерода

K ₄ [Fe(CN) ₆], мас. %	Биоуглерод, мас. %	(NH ₂) ₂ CO, мас. %	Толщина нитроцементованного слоя, мкм	Степень интенсификации, %
30 % K ₄ [Fe(CN) ₆] + 55 % древесного угля + 15 % (NH ₂) ₂ CO*			105	0
30	45	25	111	6
30	50	20	116	10

$K_4[Fe(CN)_6]$, мас. %	Биоуглерод, мас. %	$(NH_2)_2CO$, мас. %	Толщина нитроцементованного слоя, мкм	Степень интенсификации, %
30	55	15	126	20
30	60	10	123	17
30	65	5	117	11
30	70	0	113	8
20	55	25	111	6
20	60	20	112	7
20	65	15	122	16
20	70	10	121	15
20	75	5	112	7
20	80	0	111	6

* Базовый состав.

Анализ классических положений ХТО сталей и сплавов позволяет полагать, что повышение толщины диффузионных слоев при цементации и нитроцементации связано с особенностями пористой структуры углеродсодержащих компонентов насыщающих составов. Существенное повышение удельной поверхности, суммарного объема пор, площади и объема микропор биоуглерода обуславливает повышение насыщающей способности порошковой смеси. Обнаружена корреляция характера распределения пор, их доли на реакционную поверхность насыщающей смеси. Это, очевидно, увеличивает концентрацию активного углерода в газовой среде реакционного пространства контейнера. Происходит ускорение первой и второй стадий процесса ХТО: образование насыщающего вещества и газотранспортные реакции в порошковой среде. Поэтому обоснованным является предположение о повышении насыщающей способности смеси за счет увеличения реакционной поверхности при увеличении удельной доли микропор. Большое значение имеет возможность увеличения доли мезопор, что потенциально может обеспечивать доступ к внутренней поверхности частиц, тем самым облегчая массоперенос и приводя к дальнейшему повышению насыщающей способности. Однако следует отметить, что увеличение доли макропор может увеличивать пустотность обсуждаемой насыщающей среды и тем самым приводить к снижению насыщающей способности.

Таким образом, представляет интерес применение биоуглеродов в составах для порошковой цементации и нитроцементации с целью интенсификации ХТО, а также одного из вариантов вторичного использования биоотходов.

Выводы

1. Показано, что толщина цементованного слоя для составов на основе биоуглерода выше, чем для составов на основе древесного угля на 20–21 %; полукокса – на 37–38; антрацита – на 48–49 %. Толщина нитроцементованного слоя для составов на основе биоуглерода выше, чем для составов на основе древесного угля на 19–20 %, полукокса – на 34–35, антрацита – на 49–50 %.
2. Определено, что оптимальное содержание компонентов состава на основе биоуглерода для цементации 8–12 % $BaCO_3$, 88–92 % биоуглерода. Оптимальное содержание компонентов состава на основе биоуглерода для нитроцементации 20–30 % $K_4[Fe(CN)_6]$, 55–70 % биоуглерода, 10–15 % $(NH_2)_2CO$.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Константинов, В. М.** Пути энергосбережения при термической и химико-термической обработке сталей за счет ускорения диффузионных процессов / В. М. Константинов, В. А. Кукареко // Литье и металлургия. – 2023. – № 4. – С. 72–80.
2. **Пантелеенко, Ф. И.** О классификации способов интенсификации процессов химико-термической обработки металлов и сплавов / Ф. И. Пантелеенко, Л. С. Ляхович, Б. С. Кухарев // Металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск: Вышэйшая школа, 1980. – С. 5–6.
3. **Константинов, В. М.** Ускоренная диффузия легирующих элементов в железе при химико-термической обработке порошков во вращающемся контейнере / В. М. Константинов // Доклады НАН Беларуси. – 2007. – Т. 51, № 2. – С. 103–107.
4. Интенсификация процессов химико-термической обработки сталей / Л. Г. Петрова [и др.]. – М.: МАДИ, 2019. – 160 с.
5. **Гринчук, П. С.** О проблемах развития отечественных технологий цементации конструкционных сталей / П. С. Гринчук, В. М. Константинов // Наука и инновации. – 2023. – № 1. – С. 21–23.
6. Материаловедение: учебник / Б. Н. Арзамасов [и др.]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 648 с.
7. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: справ. / Г. В. Борисенок [и др.]. – М.: Металлургия, 1981. – 424 с.
8. **Минкевич, А. Н.** Химико-термическая обработка сталей / А. Н. Минкевич. – М.: Mashgiz, 1950. – 432 с.
9. **Минкевич, А. Н.** Химико-термическая обработка металлов и сплавов / А. Н. Минкевич. – М.: Машиностроение, 1965. – 493 с.

10. Твердый карбюризатор: а.с. SU 111009 / Л.К. Лукша. – Оpubл. 01.01.1957.
11. Состав карбюризатора для цементации деталей из низкоуглеродистой стали: пат. RU 2690630 / М.В. Чучкалов [и др.]. – Оpubл. 04.06.2019.
12. Карбюризатор для цементации стальных изделий: а.с. SU 1836486 / И.М. Спиридонова [и др.]. – Оpubл. 23.08.1993.
13. Мисюкова, А.Д. Отходы переработки цитрусовой биомассы как энергетический ценный продукт / А.Д. Мисюкова, С.А. Янковский, А.С. Горшков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2021. – № 11. – С. 76–80.
14. Energy sector development: system dynamics analysis / M.Laimon [et al.] // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10. – Art. 134.
15. Using Biochar and Coal as the Electrode Material for Supercapacitor Applications / Y.Ding [et al.] // Frontiers in Energy Research. – 2020. – Vol. 7. – Art. 159.

REFERENCES

1. **Konstantinov V.M., Kukareko V.A.** Puti energosberezheniya pri termicheskoi i khimiko-termicheskoi obrabotke stali za schet uskoreniya diffuzionnykh protsessov [Ways of energy saving during thermal and chemical treatment of steel due to acceleration of diffusion processes]. *Lit'e i metallurgiya* = Foundry production and metallurgy, 2023, no. 4, pp. 72–80.
2. **Panteleenko F.I., Liakhovich L.S., Kukharev B.S.** O klassifikatsii sposobov intensifikatsii protsessov khimiko-termicheskoi obrabotki metallov i splavov [On the classification of methods for intensification of thermochemical treatment of metals and alloys]. *Metallurgiya: resp. mezhved. sb. nauch. tr.* = Metallurgy: Republican interdepartmental collection of scientific papers. Minsk, Vysheishaya shkola Publ., 1980, pp. 5–6.
3. **Konstantinov V.M.** Uskorennaya diffuziya legiruyushchikh elementov v zheleze pri khimiko-termicheskoi obrabotke poroshkov vo vrashchayushchemsya konteynere [Accelerated diffusion of alloying elements in iron during thermochemical treatment of powders in a rotating container]. *Doklady NAN Belarusi* = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, 2007, vol. 51, no. 2, pp. 103–107.
4. **Petrova L.G.** [et al.] *Intensifikatsiya protsessov khimiko-termicheskoi obrabotki stali* [Intensification of thermochemical treatment processes of steels]. Moscow, MADI Publ., 2019. 160 p.
5. **Grinchuk P.S., Konstantinov V.M.** O problemakh razvitiya otechestvennykh tekhnologii tsementatsii konstruktsionnykh stali [On the challenges in developing domestic carburizing technologies for structural steels]. *Nauka i innovatsii* = Science and Innovation, 2023, no. 1, pp. 21–23.
6. **Arzamasov B.N.** [et al.] *Materialovedenie: uchebnik* [Materials science: textbook]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2003, 648 p.
7. **Borisenok G.V.** [et al.] *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov: sprav.* [Thermochemical treatment of metals and alloys: handbook]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981, 424 p.
8. **Minkevich A.N.** *Khimiko-termicheskaya obrabotka stali* [Thermochemical treatment of steels]. Moscow, Mashgiz Publ., 1950, 432 p.
9. **Minkevich A.N.** *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov* [Thermochemical treatment of metals and alloys]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1965, 493 p.
10. **Luksha L.K.** *Tverdyi karbyurizator* [Solid carburizer]. Author's certificate SU 111009, publ. date 01 Jan 1957.
11. **Chuchkalov M.V.** [et al.] *Sostav karbyurizatora dlya tsementatsii detalei iz nizkouglerodistoi stali* [Carburizer composition for carburizing parts made of low-carbon steel]. Patent RU 2690630, publ. date 04 Jun 2019.
12. **Spiridonova I.M.** [et al.] *Karbyurizator dlya tsementatsii stal'nykh izdelii* [Carburizer for carburizing steel products]. Author's certificate SU 1836486, publ. date 23 Aug 1993.
13. **Misyukova A.D., Yankovskii S.A., Gorshkov A.S.** Otkhody pererabotki tsitrusovoi biomassy kak energeticheskii tsennyy produkt [Citrus biomass processing wastes as an energy-valuable product]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* = International Journal of Applied and Fundamental Research, 2021, no. 11, pp. 76–80.
14. **Laimon M.** [et al.] Energy sector development: System dynamics analysis. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, art. 134.
15. **Ding Y.** [et al.] Using Biochar and Coal as the Electrode Material for Supercapacitor Applications. *Frontiers in Energy Research*, 2020, vol. 7, art. 159.