

## Материаловедение и технологии материалов Materials science and materials technology

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК: 621.785.52: 621.791.754.6

doi: 10.30987/2782-5957-2025-6-62-76

### НОВЫЙ СПОСОБ НАУГЛЕРОЖИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕЦИАЛЬНОЙ ПАСТЫ МЕТОДОМ АРГОНОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ

Константин Васильевич Макаренко<sup>1</sup>, Александр Викторович Вдовин<sup>2</sup>, Александр Леонидович Украинцев<sup>3✉</sup>, Денис Николаевич Савинов<sup>4</sup>, Мурат Акбулатович Байдимиров<sup>5</sup>, Наталья Викторовна Дмитриева<sup>6</sup>

<sup>1,2,3</sup> Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

<sup>4</sup> ЗАО «Брянский Арсенал», Брянск, Россия

<sup>5</sup> ООО "КЕРАМАКС", Челябинск, Россия

<sup>6</sup> Брянский государственный инженерно-технологический университет, Брянск, Россия

<sup>1</sup> makkon1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7195-0500>

<sup>2</sup> vdovin.alexander.v@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6014-0043>

<sup>3</sup> alex.ukraintsev2015@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-1923-9386>

<sup>4</sup> dan.sawinov2011@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6514-102X>

<sup>5</sup> m.baydimirov@keramaks.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4662-3093>

<sup>6</sup> nata-v.dmitrieva@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-1502-2010>

#### Аннотация

В статье предложен новый способ поверхностного упрочнения стальных изделий с использованием аргонодуговой наплавки и науглероживающих паст на основе сварочного флюса и графитового порошка. Исследованы различные составы паст, варьируя соотношение компонентов с целью оптимизации структуры и свойств (твердости) поверхностного слоя. Проведен анализ микроструктур, химического состава и твердости наплавленного слоя. Установлено, что оптимальные составы паст обеспечивают формирование в поверхностном слое карбидных структур, что существенно повышает твердость. Наибольшая эффективность достигнута при использовании паст с повышенным содержанием графита, где образуется мелкодисперсная структура с равномерным распределением упрочняющих карбидных фаз. Твердость поверхностного слоя достигает 49 HRC, что делает предложенную технологию перспективной для применения в машиностроении. Разработанный способ превосходит традиционные способы упрочнения, такие как химико-термическая обработка (ХТО), в частности, цементация, за счет более быстрого формирования упрочняющих высокоуглеродистых фаз. На разработанный состав пасты для нового способа науглероживания был получен патент РФ. Предложенный способ науглероживания поверхности может быть использован для упрочнения деталей, подверженных высоким нагрузкам и износу,

что способствует повышению их эксплуатационных характеристик и срока службы деталей.

**Цель исследования:** разработать новый способ науглероживания поверхности стальных изделий посредством аргонодуговой наплавки с использованием науглероживающих паст и оптимизировать состав разрабатываемой пасты для обеспечения оптимальной структуры поверхностного слоя.

**Задача:** разработка нового способа науглероживания поверхности стальных изделий методом аргонодуговой наплавки с использованием специальных науглероживающих паст для повышения твердости и эксплуатационных свойств поверхностного слоя стальных деталей.

**Методы исследования:** 1) Подготовка паст из сварочного флюса и графита; 2) Аргонодуговая наплавка на стальные образцы; 3) Анализ микроструктуры, твердости и химического состава; 4) Контроль качества упрочненного слоя.

**Новизна работы:** 1) Новый способ упрочнения с использованием аргонодуговой наплавки и специальных паст. 2) Оптимизированные составы паст обеспечивают науглероживание поверхности при аргонодуговой наплавке и как следствие высокую твердость. 3) Технология быстрее и эффективнее традиционных методов цементации, которые можно представить как альтернативу предлагаемому способу.

**Результаты исследования:** 1) Науглероживающие пасты составов №3–№5, представленные в статье, обеспечивают получение карбидных структур с высокой твердостью; 2) Наибольшая твердость (49 HRC) достигнута с пастой №5, содержащей графитовый порошок и сварочный флюс в соотношении 80/20 %; 3) Отсутствие дефектов в виде различных несплошностей в наплавленном слое.

**Вывод:** Разработанный способ аргонодуговой

наплавки для науглероживания поверхностности стальных деталей с использованием специальных паст эффективен для упрочнения стальных изделий, его применение обеспечивает высокую твердость поверхностного слоя деталей.

**Ключевые слова:** поверхность, химико-термическая обработка, цементация, сталь, наплавка, паста, состав, микроструктура, твердость.

Ссылка для цитирования:

Макаренко К.В. Новый способ науглероживания поверхности стальных изделий с использованием специальной пасты методом аргонодуговой наплавки / К.В. Макаренко, А.В. Вдовин, А.Л. Украинцев, Д.Н. Савинов, М.А. Байдимиров, Н.В. Дмитриева // *Транспортное машиностроение*. – 2025. – № 6. – С. 62-76. doi: 10.30987/2782-5957-2025-6-62-76.

Original article

Open Access Article

## A NEW METHOD OF CARBURIZING THE SURFACE OF STEEL PRODUCTS USING A SPECIAL PASTE BY ARGON ARC WELDING

Konstantin Vasilyevich Makarenko<sup>1</sup>, Aleksandr Viktorovich Vdovin<sup>2</sup>, Aleksandr Leonidovich Ukraintsev<sup>3</sup>✉, Denis Nikolaevich Savinov<sup>4</sup>, Murat Akbulatovich Baydimirov<sup>5</sup>, Natalya Viktorovna Dmitrieva<sup>6</sup>

<sup>1,2,3</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

<sup>4</sup> ZAO Bryansk Arsenal, Bryansk, Russia

<sup>5</sup> KERAMAX LLC, Chelyabinsk, Russia

<sup>6</sup> Bryansk State Technological University of Engineering, Bryansk, Russia

<sup>1</sup> makkon1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7195-0500>

<sup>2</sup> vdovin.alexander.v@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6014-0043>

<sup>3</sup> alex.ukraintsev2015@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-1923-9386>

<sup>4</sup> dan.savinov2011@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6514-102X>

<sup>5</sup> m.baydimirov@keramaks.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4662-3093>

<sup>6</sup> nata-v.dmitrieva@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-1502-2010>

### Abstract

The paper proposes a new method for surface hardening of steel products using argon arc welding and carburizing pastes based on welding flux and graphite powder. Various compositions of pastes are studied, varying the ratio of components in order to optimize the structure and properties (hardness) of the surface layer. The microstructures, chemical composition and hardness of the deposited layer are analyzed. It is found out that optimal paste compositions ensure the formation of carbide structures in the surface layer, which significantly increases hardness. The greatest efficiency is achieved when using pastes with high graphite content, where a finely dispersed structure is formed with a uniform distribution of reinforcing carbide phases. The hardness of the surface layer reaches 49 HRC, which makes the proposed technology promising for use in mechanical engineering. The developed method is superior to traditional hardening methods such as chemical heat treatment, in particular, carburization, due to the faster formation of hardening high-carbon phases. A patent of the Russian Federation is obtained for the developed paste composition for a new method of carburization.

The proposed method of surface carburization can be used to harden parts subjected to high loads and wear, which contributes to an increase in their performance and service life of parts.

**The study objective:** to develop a new method for carburizing the surface of steel products by means of argon arc welding using carburizing pastes and to optimize the composition of the paste developed to ensure an optimal surface layer structure.

**The task:** to develop a new method for carburizing the surface of steel products by argon-arc welding using special carburizing pastes to increase the hardness and operational properties of the surface layer of steel parts.

**Research methods:** 1) Preparation of pastes from welding flux and graphite; 2) Argon arc welding of steel samples; 3) Analysis of microstructure, hardness and chemical composition; 4) Quality control of the reinforced layer.

**The novelty of the work:** 1) A new method of hardening using argon arc welding and special pastes. 2) Optimized paste compositions ensure surface carburization during argon arc welding and, as a result,

high hardness. 3) The technology is faster and more efficient than traditional methods of carburization, which can be presented as an alternative to the proposed method.

**The study results:** 1) Carburizing pastes of compositions No.3-No.5 presented in the paper ensure the production of carbide structures with high hardness; 2) The highest hardness (49 HRC) is achieved with paste No.5 containing graphite powder and welding

flux in a ratio of 80/20%; 3) The absence of defects as various discontinuities in the deposited layer.

**Conclusion:** The developed argon arc welding method for carburizing the surface of steel parts using special pastes is effective for hardening steel products, its use ensures high hardness of the surface layer of parts.

**Keywords:** surface, chemical and thermal treatment, carburization, steel, surfacing, paste, composition, microstructure, hardness.

#### *Reference for citing:*

*Makarenko KV, Vdovin AV, Ukraintsev AL, Savinov DN, Baydimirov MA, Dmitrieva NV. A new method of carburizing the surface of steel products using a special paste by argon arc welding. Transport Engineering. 2025;6:62-76. doi: 10.30987/2782-5957-2025-6-62-76.*

## **Введение**

Многие детали машин в процессе эксплуатации контактируют поверхностями и вследствие этого подвержены механическому износу. Наиболее яркие представители данного класса деталей — это зубчатые колеса, валы, оси и шестерни. Так как контакт при работе происходит в поверхностном слое в машиностроении применяются технологии поверхностного упрочнения. Наиболее широко используемыми технологиями поверхностного упрочнения являются: химико-термическая обработка (ХТО), поверхностная закалка, поверхностная пластическая деформация (ППД) и различные комбинированные процессы.

ХТО сочетает одновременное термическое и химическое воздействие на поверхность, которое приводит к изменению в поверхностном рабочем слое химического состава сплава, что как следствие влечет за собой изменение структуры и свойств поверхности детали [1]. ХТО применяют для повышения твердости, износо- и задиростойкости, коррозионной стойкости, а создаваемые в поверхностном слое структуры дополнительно обеспечивают остаточные напряжения сжатия, что в совокупности увеличивает надежность и долговечность деталей машин. К наиболее широко распространенным методам ХТО относятся цементация, азотирование и нитроцементация. В меньшей степени используют диффузионное насыщение металлами и более тяжелыми элементами, например, диффузионное насыщение Si именуют силицированием. Возможно

насыщение поверхности одновременно несколькими элементами или созданием многослойных структурных зон. В основе процессов ХТО лежат диффузионные явления, которые в сплавах протекают сравнительно медленно, поэтому основной недостаток присущий данной технологии поверхностного упрочнения, — это существенная длительность процесса. Диффузия элементов в сплаве может быть ускорена путем повышения температуры, однако этот способ идентификации процесса как правило приводит к неравномерному распределению химических компонентов в структуре сплава, росту зерна и формированию в поверхностном слое неблагоприятной микроструктуры [2]. Поэтому основным направлением повышения эффективности способов ХТО в последнее время стал поиск новых способов энергетического воздействия для повышения эффективности данной технологии.

Одной из наиболее широко используемых технологий ХТО является цементация, - насыщение поверхности деталей из низкоуглеродистых сталей углеродом. В результате науглероживания поверхностного слоя в нем формируется эвтектоидная и заэвтектоидная структура, представленная включениями цементита, что приводит к повышению твердости поверхности изделия и его износостойкости. Цементацию проводят в твердых, жидких и газообразных карбюризаторах [3]. Разновидностью газовой цементации является вакуумная технология, которая реализуется при температурах 800 – 1050 °С и разрежении око-

ло 0,6 кПа в среде углеродсодержащего газа (этилена, ацетилена или пропана) [4]. Наиболее прогрессивным способом цементации является плазменная (ионная имплантация) или как ее ранее называли технология цементации в низкотемпературной плазме тлеющего разряда [5 – 8]. Кроме плазменной цементации, существуют современные технологии комбинированного высокоэнергетического воздействия в сочетании с насыщением поверхности углеродам, к ним относятся электронно-лучевые и лазерные процессы воздействия на поверхность [9, 10].

Одной из разновидностей плазменных технологий является использование электрической сварочной дуги для поверхностного упрочнения [11]. При этом дуговые процессы применяют и при цементации стальных деталей [12]. Электрическая сварочная дуга представляет собой устойчивый и мощный электрический дуговой разряд между электродом и деталью [13]. Газовая среда становится проводником электрического тока только при условии ионизации газов, т. е. при переходе их в плазменное состояние, в которое представлено электрически заряженными частицами – электронами и ионами. При сварке во время зажигания дуги происходит первоначальная ионизация газовой среды, затем ионизация непрерывно поддерживается в процессе горения дуги. Для усиления процесса ионизации и повышения эффективности электрической дуги в

сварочной практике применяют активирующие флюсы [14]. Активирующие флюсы содержат компоненты, которые являются соединениями (чаще всего оксидами) элементов с наибольшей степенью ионизации, такие элементы являются химически активными: K, Na, Li, Al, Ti и т.д. [15, 16] Но наиболее распространенными и легкодоступными являются соединения Ca, Mn, Mg и Si, которые входят в составы большинства флюсов, а также свободно в виде оксидов и карбонатов (CaO, CaCO<sub>3</sub>, MnO, MgO, SiO<sub>2</sub>) [17]. Аргонодуговая технология сварки/наплавки имеет характерные особенности: во-первых, аргон защищает дугу и поверхность детали от негативного воздействия атмосферы; во-вторых, ионизация аргона в межэлектродном происходит ступенчато, что требует меньшего напряжения для поддержания дугового разряда; в-третьих, глубина проплавления при наплавке в аргоне сравнительно мала, что требует дополнительного использования активирующих флюсов [18]. Исходя из этого было предложено применять в работе комплексную науглероживающую пасту. В качестве науглероживающего компонента было принято использовать графитовый порошок, вследствие его химической инертности, а для активизации процесса ионизации сварочный флюс, компоненты которого при их диссоциации повышают потенциал ионизации дуги, обеспечивая тем самым большую глубину проплавления и науглероживающего слоя.

## Методика исследования

Для науглероживания поверхности при электродуговой наплавке использовали специально разработанную пасту. В качестве компонентов пасты применяли сва-

рочный флюс АН-60, производства ООО "КЕРАМАКС", химический состав которого представлен в табл. 1, и графитовый порошок.

Химический состав в % сварочного флюса АН-60

Таблица 1

Table 1

*Chemical composition of welding flux AN-60 in %*

SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	CaF <sub>2</sub>	S	P
42-46	>0,9	<0,05	<10	<3	36-41	5-9	<0,05	<0,05

Предварительно сварочный флюс был измельчен в шаровой мельнице и просеян через сито с размером ячейки 0,2 мм.

После этого флюс и графит прокаливали для удаления из них влаги. Прокалка производилась в муфельной электропечи

СНОЛ 6/10-В при температуре 250 °С в течение 2-х часов.

В результате чего получили два порошкообразных компонента: сварочный флюс и графитовый порошок.

После предварительной подготовки компонентов пасты в соответствии со схемой технологического процесса, описанной ранее, было принято решение провести оп-

тимизацию химического состава паст для наплавки с целью обеспечения наилучших показателей при науглероживании поверхности стальных образцов. Для этого, путем варьирования соотношения базовых компонентов пасты – графита и сварочного флюса, использовали шесть разных вариантов составов пасты, которые представлены в табл. 2.

Таблица 2

Экспериментальные составы наплавочных паст

Table 2

*Experimental compositions of surfacing pastes*

№ пасты	Соотношение компонентов пасты в объемных долях		
	Графит по ГОСТ 17022-81	Флюс АН60 по ГОСТ 9087 – 81	Спирт изопропиловый по ГОСТ 9805-84
1	–	1	1
2	0,5	0,5	1
3	0,6	0,4	1
4	0,7	0,3	1
5	0,8	0,2	1
6	1	–	1

Цементации подвергают стали различных марок с разным содержанием углерода и степенью легирования [19–25], в отечественной промышленности преимущественно используют низкоуглеродистые, низко- и среднелегированные стали. Для оценки качества цементации применяют качественные кипящие стали, например, в работе [26] для изготовления фольговых «проб» использовали сталь 08кп. В наших экспериментах в качестве исходного материала для наплавки использовали пластины толщиной 5 мм из стали 10кп по ГОСТ 1050-2013. Перед наплавкой пластину зачищали от следов коррозии кордщетками посредством использования угловой шлифовальной машинки.

Пасту перед использованием несколько раз встряхивали для более равномерного перемешивания исходных компонентов. На поверхность пластины пасту наносили кистью до полного окрашивания поверхности под наплавку без просветов. Давали ей подсохнуть при комнатной температуре в течение 10 минут для испарения изопропилового спирта. После этого проводили наплавку для каждого состава не менее 3 параллельных валиков с пере-

крытием соседнего около 20 % исходной ширины наплавленного валика.

Наплавку проводили аргонодуговым способом неплавящимся вольфрамовым электродом, предварительно заточенным на точильном станке на угол 30°. Для наплавки использовали универсальную аргонодуговую установку мод. TIG-203 AC/DC Pulse. Величина сварочного тока 125 А. В качестве защитного газа использовали аргон высшего сорта по ГОСТ 10157-79.

Визуальным контролем оценивали отсутствие явных дефектов после наплавки. Для обнаружения скрытых дефектов использовали ультразвуковой дефектоскоп мод. УД2-70. Измеряли твердость наплавленного слоя на стационарном твердометре Роквелла мод. ТК-2М. Химические состав поверхности наплавленных образцов исследовали на оптическом эмиссионном спектрометре *SPECTROMAXx*. Представленный химический состав является средним арифметическим по результатам 3-х замеров. Для микроструктурных исследований делали поперечные разрезы наплавленных слоев и подготавливали металлографические шлифы, которые травили 4 %

спиртовым раствором азотной кислоты. Данный способ травления для выявления микроструктуры упрочненного слоя после цементации является стандартным и регламентируется ГОСТ 33189-2014 и 5639-82. Исследование микроструктуры проводили на цифровом металлографическом микроскопе мод. МЕТ 3Т. При идентификации структурных составляющих и фаз в наплавленном слое и зоне сплавления ана-

лизировались характерные морфологические признаки [27]. Рентгеноспектральный микроанализ [28] для идентификации силикарбидов в структуре наплавленного слоя проводили на растровом электронном микроскопе *Zeiss EVO MA 10*, оснащённом энергодисперсионным спектрометром «X-Max», при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе пучка 0.5 нА, в соответствии с ГОСТ Р ИСО 22309-2015.

## Результаты

Результаты определения химического состава модифицированного поверхностного слоя после аргонодуговой наплавки

для паст различного состава представлены в табл. 3.

Таблица 3

Химический состав испытываемых образцов

Table 3

*Chemical composition of the tested samples*

№ образца, соответствует № пасты в табл. 2	Среднее содержание элементов, в масс. %						
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
1	0,23	0,254	0,454	0,044	0,055	0,241	0,023
2	0,78	0,266	0,74	0,011	0,018	0,052	0,037
3	0,83	0,257	0,7	0,011	0,016	0,047	0,038
4	0,73	0,15	0,63	0,0098	0,015	0,048	0,036
5	1,01	0,117	0,55	0,0084	0,01	0,051	0,035
6	0,75	0,011	0,365	0,0088	0,017	0,051	0,023

Результаты оптического металлографического анализа представлены на рис. 1–7. На рис. 1 показана микроструктура исходной стали, она представляет собой ферритно-перлитную металлическую матрицу с относительно мелким зерном.

Балл зерна 8 по ГОСТ 5639-82.

Результаты дефектоскопического контроля, исследования микроструктуры, глубины и твердости наплавленных слоев представлены в табл. 4.



Рис. 1. Микроструктура исходной стали 10кп, используемой в эксперименте,  $\times 100$  (травление: здесь и далее 4 % спиртовой раствор азотной кислоты)

*Fig. 1. Microstructure of the original 10kp steel used in the experiment,  $\times 100$  (etching: from here on 4% alcohol solution of nitric acid)*



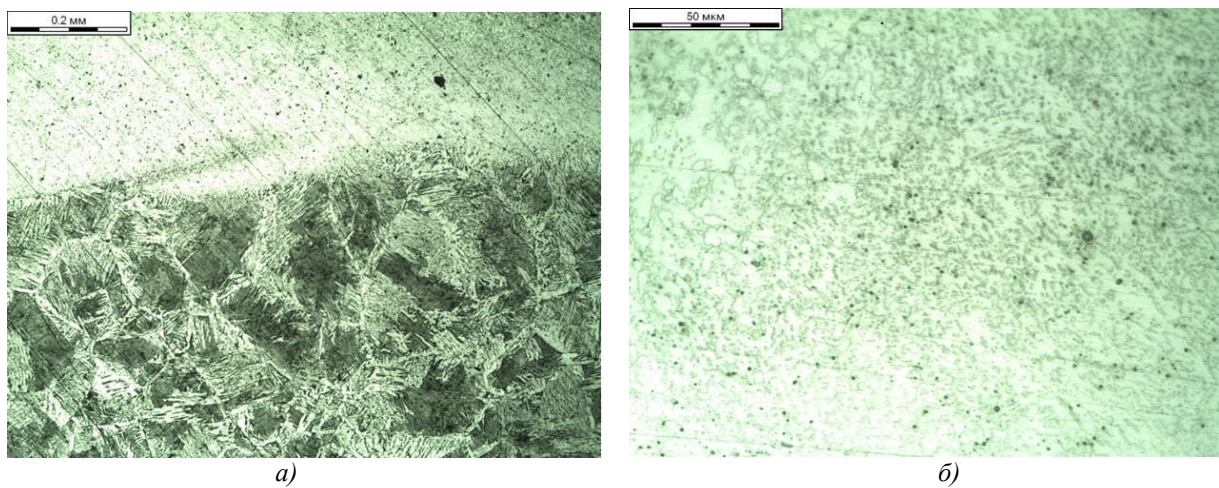


Рис. 2. Микроструктура наплавленного слоя (состав пасты № 1 из табл. 2):  $a - \times 100$ ;  $б - \times 500$   
 Fig. 2. Microstructure of the deposited layer (composition of paste No. 1 from Table 2):  $a - \times 100$ ;  $б - \times 500$

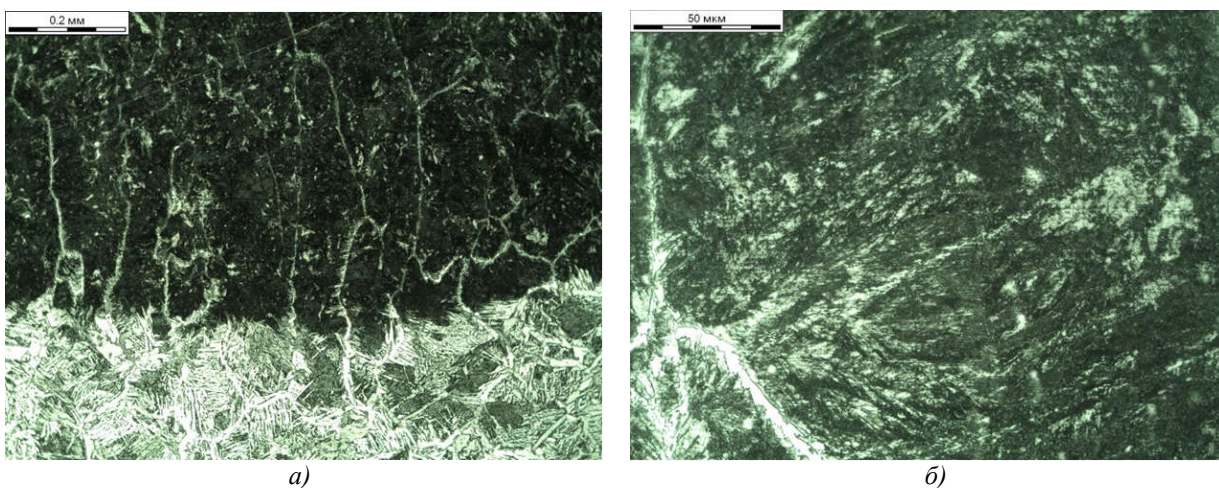


Рис. 3. Микроструктура наплавленного слоя (состав пасты № 2 из табл. 2):  $a - \times 100$ ;  $б - \times 500$   
 Fig. 3. Microstructure of the deposited layer (composition of paste No. 2 from Table 2):  $a - \times 100$ ;  $б - \times 500$

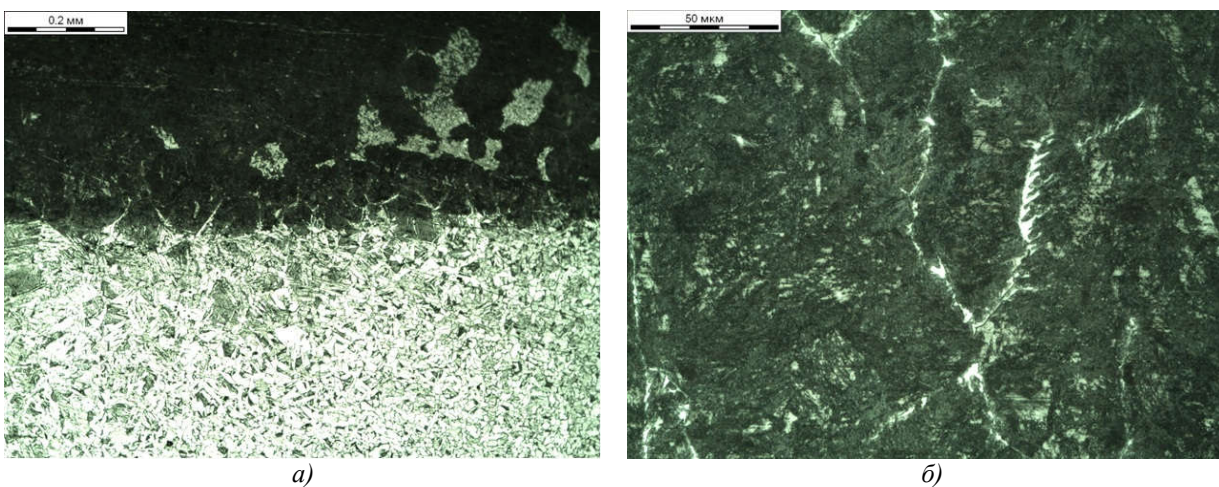
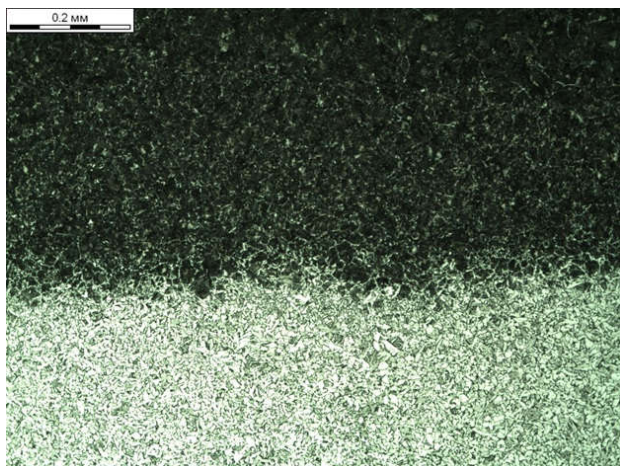
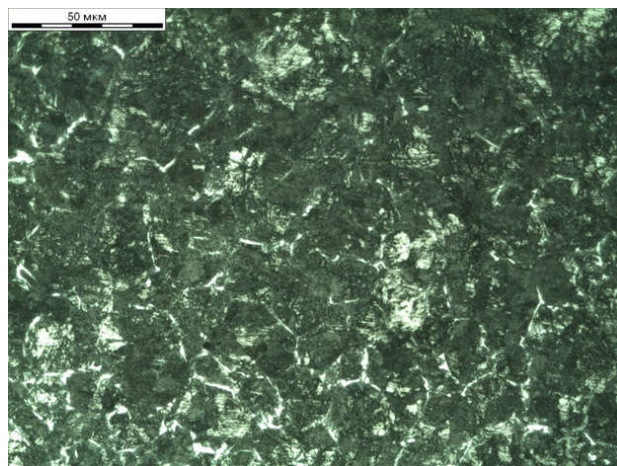


Рис. 4. Микроструктура наплавленного слоя (состав пасты № 3 из табл. 2):  $a - \times 100$ ;  $б - \times 500$   
 Fig. 4. Microstructure of the deposited layer (composition of paste No. 3 from Table 2):  $a - \times 100$ ;  $б - \times 500$



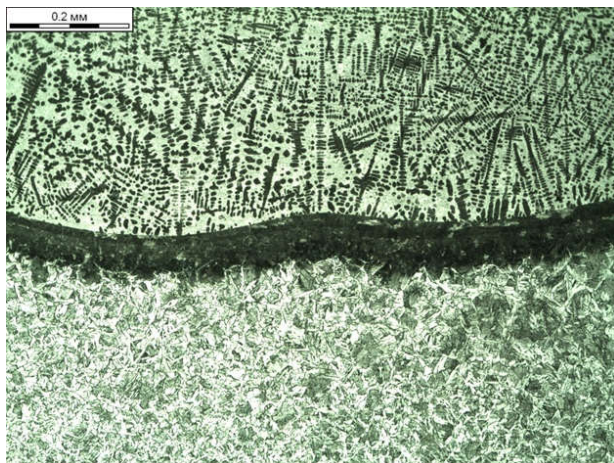


*a)*

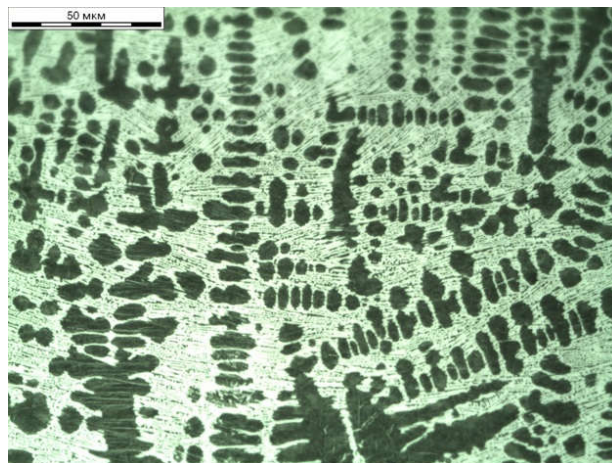


*б)*

Рис. 5. Микроструктура наплавленного слоя (состав пасты № 4 из табл. 2): *a* –  $\times 100$ ; *б* –  $\times 500$   
*Fig. 5. Microstructure of the deposited layer (composition of paste No. 4 from Table 2): a –  $\times 100$ ; b –  $\times 500$*

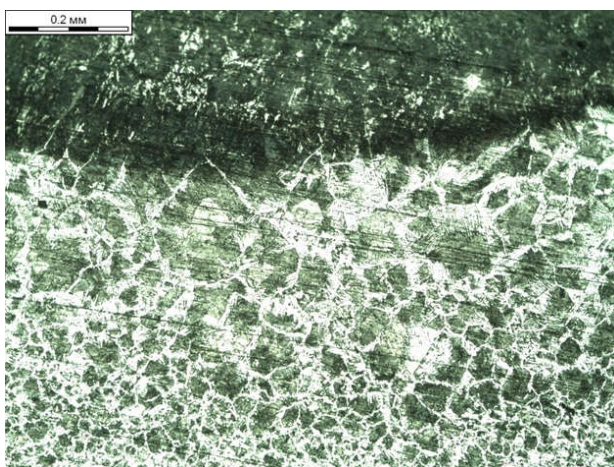


*a)*



*б)*

Рис. 6. Микроструктура наплавленного слоя (состав пасты № 5 из табл. 2): *a* –  $\times 100$ ; *б* –  $\times 500$   
*Fig. 6. Microstructure of the deposited layer (composition of paste No. 5 from Table 2): a –  $\times 100$ ; b –  $\times 500$*



*a)*



*б)*

Рис. 7. Микроструктура наплавленного слоя (состав пасты № 6 из табл. 2): *a* –  $\times 100$ ; *б* –  $\times 500$   
*Fig. 7. Microstructure of the deposited layer (composition of paste No. 6 from Table 2): a –  $\times 100$ ; b –  $\times 500$*



Результаты идентификации структурных составляющих, глубина  
и твердость наплавленных слоев

Table 4

*Results of finding structural components, depth and hardness of deposited layers*

№ п/п	Наличие пор и горячих трещин в наплавленном слое	Результаты исследования наплавленного слоя		
		Средняя твердость, HRC	Структура наплавленного слоя*	Толщина слоя, мм
1.	да	23	С	2,25
2.	нет	32	Т + ЦВ	1,8
3.	нет	44	Т + ЦВ + К	1,25
4.	нет	45	Т + ЦС + К	1,3
5.	нет	49	ЦЭ + МО	0,7
6.	нет	37	Т + МО	1,7

Примечание: \* К – специальные карбиды; С – сорбит; Т – троостит; МО – мартенсит отпуска; ЦЭ – цементит эвтектический; ЦС – цементит свободный; ЦВ – цементит вторичный

Микроструктура наплавленного слоя, полученного при использовании пасты № 1, изготовленной полностью на основании измельченного сварочного флюса, представлена на рис. 2. Она отличается структурой сорбита отпуска, сравнительно низкой твердостью (23 HRC), которая не может обеспечить высокий уровень износостойкости. Кроме того, в объеме наплавленного слоя и на поверхности были обнаружены дефекты газового происхождения. В качестве примера можно продемонстрировать газовую пору, дислоцированную в верхней части рис. 2а. Зона сплавления и зона термического влияния представляют собой структуру перегретой стали с характерными включениями видманштетового феррита. Однако, представленный наплавленный слой имеет наибольшую глубину, что объясняется активирующим действием сварочного флюса АН-60, компоненты которого повышают степень ионизации сварочной дуги и тем самым увеличивают глубину проплавления. При этом пасту №1 нельзя рекомендовать для использования, так как в ней фактически отсутствует науглероживающий компонент (графитовый порошок) поэтому изменение химического состава и получение упрочняющих цементитных структурных составляющих в поверхностном слое не наблюдается.

В пасте № 2 объемное соотношение графита и сварочного флюса 50:50. Дополнительное науглероживание из графита, вводимого пастой, привело к появлению

заэвтектоидной структуры стали, представленной трооститом и цементитом вторичным (рис. 3). Цементит вторичный располагается преимущественно по границам зерен в виде «тонких нитей», ортогонально ориентирован к поверхности наплавки (рис. 3а). Механизм формирования структуры с закономерным расположением цементита по границе зерен объясняется зернограничной диффузией углерода, которая отличается более высокими коэффициентами диффузии [29]. Присутствие в структуре наплавленного слоя высокоуглеродистой цементитной фазы привело к росту твердости до среднего значения 32 HRC. Однако сама по себе структура имеет ряд недостатков. Во-первых, сравнительно крупное зерно стали обусловленное перегревом при наплавке неблагоприятно сказывается на распределении свойств в поверхностной упрочненной зоне. Во-вторых, вторичный цементит, имеющий относительно малую толщину, зернограничное расположение и ортогональную ориентацию, приводит к формированию дефекта характерного для процесса цементации, так называемой цементитной сетки.

Паста № 3 имеет более подходящую структуру (рис. 4). Металлическая матрица представлена трооститом, который за счет своей дисперсности имеет высокую прочность и твердость. Негативная ориентация вторичного цементита отсутствует. Кроме него в структуре присутствуют специальные карбиды, которые представлены сили-

кокарбидами железа, именно они обеспечивают существенный рост твёрдости и ожидаемый рост абразивной износостойкости. Они распределены в объеме матрицы более равномерно. Образование сили-

кокарбидов произошло в несколько этапов. На первом этапе при металлургическом процессе происходит восстановление оксида кремния из компонентов сварочного флюса, по реакции:



Основную роль в этой реакции играет углерод, который, при диссоциации графита, способствует восстановлению кремния из оксида. На втором этапе восстановленный кремний легирует металл сварочной ванны. На заключительном этапе в процессе затвердевания повышенная локальная концентрация кремния будет способствовать образованию силикокар-

бидов в наплавленном слое, которые обеспечивают повышение твердости науглероженного слоя. Для идентификации силикокарбидов использовали метод электронной микроскопии в совокупности с зондовым рентгеновским микроанализом, результаты исследования представлены на рис. 8.

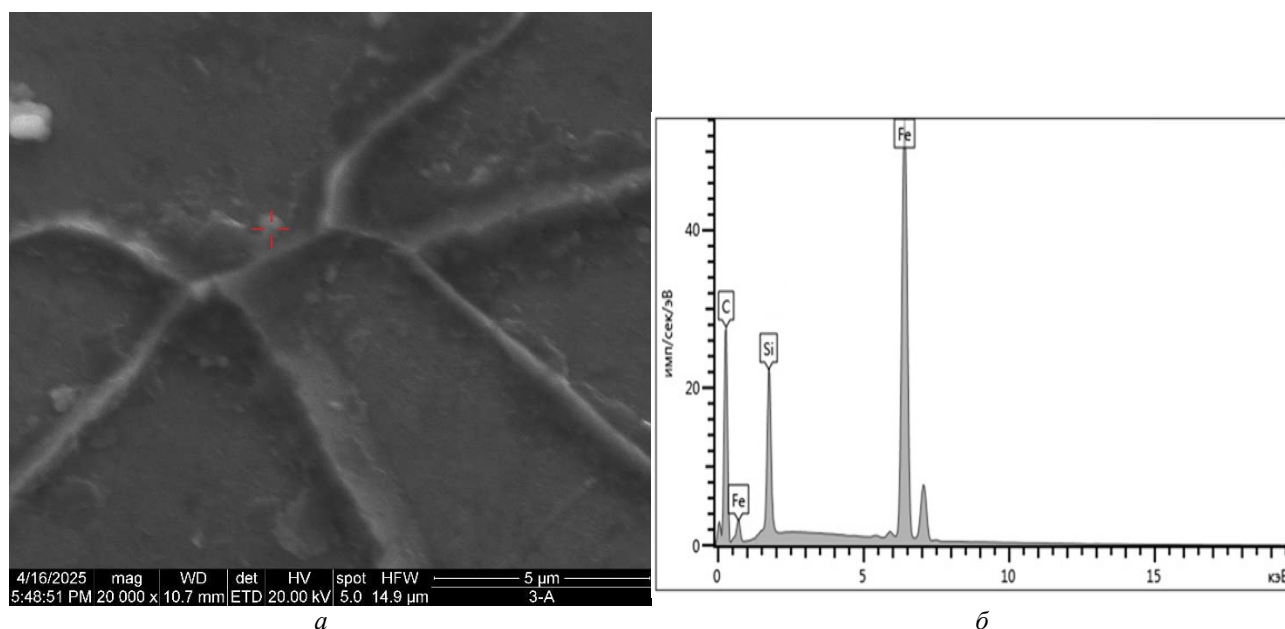


Рис. 8. Микроструктура наплавленного слоя (состав пасты № 3 из табл. 2):

$a - \times 20000$ ;  $b -$  рентгеновский спектр

Fig. 8. Microstructure of the deposited layer (composition of paste No. 3 from Table 2):

$a - \times 20000$ ;  $b -$  X-ray spectrum

Однако микроструктура слоя, представленная на рис. 4б имеет характерные признаки цементитной сетки, которая является структурным дефектом слоя. Поэтому паста № 3 не может быть признана наилучшей по структуре и свойствам.

Еще в большей степени отвечает основным целям данной работы структура, полученная в наплавленном слое при использовании пасты № 4 (рис. 5). Вторичный цементит в такой структуре отсутствует, размер зерна относительно мал.

Упрочняющие фазы представлены свободным цементитом и специальными карбидами. Малый размер зерна, высокая дисперсность фаз и разнообразие упрочняющих карбидных фаз способствуют повышению средней твердости наплавленного слоя (45 HRC), что будет благоприятно сказываться на износостойкости деталей машин.

При использовании пасты № 5 степень науглероживания еще больше и, как следствие, при этом в структуре напла-

ленного слоя возникает однородная структура доэвтектического чугуна (рис. 6). Данный факт указывает на изменение механизма формирования наплавленного слоя. Для формирования данной структуры первоначально произошло расплавление поверхностного слоя с последующим перемешиванием компонентов пасты с расплавленным слоем, в результате чего на поверхности стальной заготовки возник слой жидкого доэвтектического чугуна. Быстрые скорости охлаждения, обусловленные интенсивным теплоотводом, обеспечили формирование мелкодисперсной структуры аустенитных дендритов и ледебурита. Кроме мелкодисперсного ледебурита в структуре присутствует мартенсит отпуска, который образовался на базе аустенитных дендритов. Поэтому средняя твердость, полученная в наплавленном слое, наивысшая (49 HRC) из всех вариантов использования состава экспериментальных наплавочных паст. Структура отличается однородностью по сечению. В наплавленном слое отсутствуют сварочные дефекты (трещины и поры). В зоне сплавления присутствует переходная структура, представленная эвтектоидом.

Важная особенность формирования эвтектических структур в поверхностном слое состоит в том, что кристаллизующиеся в этих структурах фазы не находятся в равновесии друг с другом. На рис. 9 приведена энергетическая схема неравновесной кристаллизации чугуна при значительном переохлаждении для случая формирования эвтектики  $\gamma + \text{Ц}$  [30].

Видно, что обе твердые фазы, формирующиеся при кристаллизации, находятся в условиях локального равновесия с участками жидкой фазы  $L_\gamma$  и  $L_{\text{Ц}}$ , существенно отличающимися по составу. Кристаллизующийся аустенит состава  $\gamma_1$  пересыщен углеродом (содержит углерод в количестве  $C_{\gamma-L}$ ) относительно равновесного для данной температуры состава  $\gamma_0$ , т.е. состава  $C_{\gamma-\text{Ц}}$  в условиях равновесия  $\gamma-\text{Ц}$ , достигаемых в процессе гомогенизирующего отжига при данной температуре. Избыток углерода при гомогенизирующем отжиге или при достаточно медленном охлаждении чугуна выделяется из пере-

сыщенного аустенита в виде пластинчатых или игольчатых включений вторичного цементита. Если пересыщение аустенита достаточно большое, то образующиеся аустенитно-цементитные участки отличаются высокой плотностью расположения цементитных пластин.

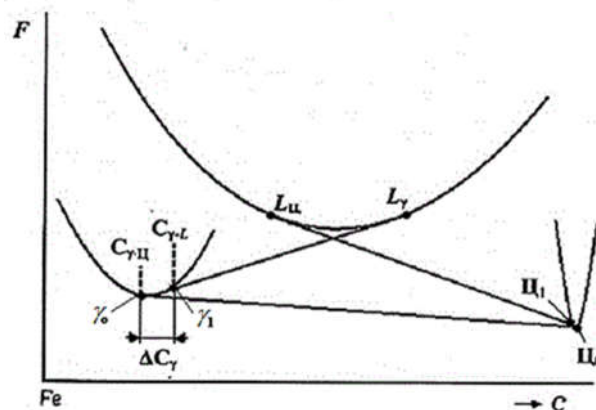


Рис. 9. Схема неравновесной кристаллизации чугуна при значительном переохлаждении для случая формирования эвтектики  $\gamma + \text{Ц}$ :  $\gamma_1$  и  $\text{Ц}_1$  – аустенит и цементит, кристаллизующиеся из переохлажденного расплава,  $\gamma_0$  и  $\text{Ц}_0$  – те же фазы, находящиеся в равновесии друг с другом,  $L_\gamma$  и  $L_{\text{Ц}}$  – участки расплава, находящиеся в локальном равновесии с соответствующими кристаллизующимися фазами,  $C_{\gamma-\text{Ц}}$  и  $C_{\gamma-L}$  – содержание углерода в аустените  $\gamma_0$  и  $\gamma_1$  соответственно,  $\Delta C_\gamma$  – пересыщение углеродом кристаллизующегося аустенита  $\gamma_1$

Fig. 9. Scheme of nonequilibrium crystallization of cast iron with significant supercooling for the case of formation of the eutectic  $\gamma + \text{C}$ :  $\gamma_1$  and  $\text{Ц}_1$  are austenite and cementite crystallizing from the supercooled melt,  $\gamma_0$  and  $\text{Ц}_0$  are the same phases in equilibrium with each other,  $L_\gamma$  and  $L_{\text{C}}$  are sections of the melt in local equilibrium with the corresponding crystallizing phases,  $C_{\gamma-\text{C}}$  and  $C_{\gamma-L}$  are the carbon content in austenite  $\gamma_0$  and  $\gamma_1$ , respectively,  $\Delta C_\gamma$  is the carbon supersaturation of the crystallizing austenite  $\gamma_1$

Последняя паста №6, полученная на базе только графитового компонента, не обеспечила получение высокоуглеродистых карбидных фаз, она представлена только трооститом и мартенситом отпуска (рис. 7). Это, как следствие, привело к падению твердости до 37 HRC, что не отвечает цели работы.

Резюмируя представленные исследования, можно отметить, что в наибольшей степени основной цели работы отвечают пасты № 3–№ 5. Именно данные составы будут в дальнейшем использоваться для



наплавки на рабочие поверхности деталей машин для оценки влияния разработанной технологии на эксплуатационные свойства (в частности, на износостойкость). На специальную пасту, используемую для науг-

## Заключение

Проведенные исследования позволили разработать новую технологию поверхностного науглероживания и упрочнения стальных изделий с использованием аргонодуговой наплавки и специально разработанных науглероживающих паст. В ходе эксперимента были изучены шесть различных составов науглероживающих паст на основе сварочного флюса АН-60 и графитового порошка. Установлено, что наиболее эффективными являются пасты №3–5, которые обеспечивают формирование в поверхностном слое высокоуглеродистых.

Наибольшая твердость (49 HRC) была достигнута при использовании пасты № 5, в которой соотношение компонентов сварочного флюса/графита, было 20/80. Использование данной пасты позволило обеспечить в поверхностном слое стальной пластины структуры доэвтектического чу-

лерживания и, оптимизированного по микроструктуре и твердости состава, методом аргонодуговой наплавки был получен патент РФ [31].

гуна с равномерно распределенными мелкодисперсными карбидными фазами с эвтектическим строением.

Полученные результаты демонстрируют перспективность применения аргонодуговой наплавки с науглероживающими пастами для поверхностного упрочнения стальных изделий. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оценку эксплуатационных характеристик деталей, обработанных по данной технологии, а также на оптимизацию параметров наплавки для различных типов сталей и условий эксплуатации.

Разработанная технология может быть успешно внедрена в машиностроительной отрасли для повышения долговечности и надежности деталей, работающих в условиях интенсивного механического износа.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Wołowiec-Korecka, E. Carburising and Nitriding of Iron Alloys / Emilia Wołowiec-Korecka. – Switzerland AG: Springer, 2024. 185 p. – doi.org/10.1007/978-3-031-59862-3.
2. Интенсификация процессов химико-термической обработки сталей : [монография] / Л.Г. Петрова, В.А. Александров, П.Е. Демин, А.С. Сергеева; под ред. Л.Г. Петровой. М.: МАДИ, 2019. 160 с.
3. Parrish, G. Carburizing: Microstructures and Properties / Geoffrey Parrish. – Ohio, Materials Park: ASM International, 1999. 247 p. – DOI: 10.1361/cmap1999p001.
4. Определение углеродного потенциала и коэффициента массопереноса углерода при вакуумной цементации сталей / Ю.С. Семёнов, А.Е. Смирнов, Л.П. Фомина, С.Н-у. Абсаттаров // Металловедение и термическая обработка металлов. 2024. № 1. С. 8-13. – doi.org/10.30906/mitom.2024.1.8-13.
5. Hosmani, S.S. An Introduction to Surface Alloying of Metals / Santosh S. Hosmani, P. Kuppusami, Rajendra Kumar Goyal. – New Delhi: Springer, 2014. 133 p.
6. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. В 2-х т. Т. I. / И.В. Суминов, П.Н. Белкин, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин, Б.Л. Крит, А.М. Борисов // Под общей редакцией И.В. Суминова. М.: Техносфера, 2011. 464 с.
7. Берлин, Е.В. Упрочнение стальных деталей плазмохимической обработкой : справоч. пособ. / Е.В. Берлин, Н.Н. Коваль, Л.А. Сейдман. М. ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. 468 с.
8. Влияние фрикционной обработки и низкотемпературной плазменной цементации на микротвердость и электромагнитные характеристики метастабильной аустенитной стали / Р.А. Саврай, П.А. Скорынина, А.В. Макаров, Л.Х. Коган, А.И. Меньшаков // Физика металлов и металловедение. 2023. № 8. С. 748-755. – DOI: 10.31857/S0015323023600697.
9. Davis, J.R. Surface Hardening of Steels / Ed. by J.R. Davis. – Ohio, Materials Park: ASM International, 2002. 319 p. – DOI: 10.1361/shos2002p001.
10. Materials Surface Processing by Directed Energy Techniques / Ed. By Yves Pauleau // School of Electrochemical and Electrometallurgical Engineering National Polytechnic Institute of Grenoble, Grenoble, France. – Oxford: Elsevier, 2006. 722 p.
11. Упрочнение металлических поверхностей электрической дугой / А. Е. Михеев, А. В. Гири, С. С. Ивасев, Р. В. Карпов // Вестник Сибирского гос-

- ударственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева, 2005. № 5. С. 220-223.
12. Домбровский, Ю.М. Влияние параметров микродуговой цементации и борирования стали на строение диффузионного слоя / Ю.М. Домбровский, М.С. Степанов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. № 11 – 12, т. 63. С. 922-934.
13. Рябцев, И.А. Теория и практика наплавочных работ / И.А. Рябцев, И.К. Сенченков. К.: «Эко-технология», 2013. 400 с.
14. Красиков, П.П. Исследование формирования корневых швов при сварке в защитных газах с применением флюсовых паст: дис. ... канд. техн. наук 2.5.8 Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки) / Волгоградский государственный технический университет. Волгоград, 2022. 169 с.
15. Кипер, Р.А. Свойства веществ : Справочник по химии / Р. А. Кипер. Хабаровск, 2013. 1016 с.
16. Украинцев, А.Л. Разработка состава активирующего флюса на базе традиционных оксидных элементов для технологии А-TIG / А.Л. Украинцев, К. В. Макаренко // Новые горизонты: сборник материалов и докладов X научно-практической конференции с международным участием, Брянск, 14 апреля 2023 года. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2023. С. 321-324.
17. Исследование энергоэффективности процесса А-TIG сварки нержавеющей стали с использованием индивидуальных флюсов-оксидов / Р.М. Саидов, М. Куш, П. Майр, К. Хоефер, Й. Хуанг, Д. Р. Комилова // *Comp. nanotechnol.*, 2017. № 3. С. 36-44.
18. Потапьевский, А.Г. Сварка сталей в защитных газах плавящимся электродом. Техника и технология будущего: монография / А.Г. Потапьевский, Ю.Н. Сараев, Д.А. Чинахов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 208 с.
19. Влияние цементации на структуру и коррозионную стойкость низкоуглеродистой стали С22 / Ф. З. Бенлахреддже, Э. Ноуиджер, Л. Яхиа, А. Ноуиджер // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2022. № 4. С. 41-44. – doi.org/10.30906/mitom.2022.4.41-44.
20. Влияние химико-термической и поверхностных механических обработок на микроструктуру, свойства и сопротивление усталости стали 20Х / В. П. Кузнецов, А. В. Корелин, В. В. Воропаев, А. С. Юровских, А. С. Скоробогатов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2025. № 1. С. 28-39. – doi.org/10.30906/mitom.2025.1.28-39.
21. Савицкий, Я. Влияние стадий вакуумной цементации на деформации в шлицевых соединениях из сталей 16MnCr5, AMS6265 и 17CrNiMo7-6 // Я. Савицкий, К. Дубовский, П. Згорняк // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2020. № 9. С. 31-35. – doi.org/10.30906/mitom.2020.9.31-35.
22. Смирнов, А.Е. Управление фазовым составом комплексно-легированных теплостойких сталей при вакуумной цементации и закалке / А. Е. Смирнов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2020. № 9. С. 45-52. – doi.org/10.30906/mitom.2020.9.45-52.
23. Исследование равномерности микротвердости образцов стали 40Х после цементации / Д.О. Щуркин, А.С. Ахмедова, В.А. Кошуро, А.А. Фомин // *Закономерности развития современного естествознания, техники и технологий*. Белгород, 30 января 2018 г. Сборник науч. тр. по материалам Международной науч.-прак. конфер. Под общей редакцией Е.П. Ткачевой, 2018. С. 203-206.
24. Трибологическое поведение стали 20 после локальной цементации при струйном электролитно-плазменном нагреве / Е.В. Сокова, И.М. Наумов, М.А. Носова, Л.М. Маркина, Р.Д. Белов, В.А. Гапонов // *Кайбышевские чтения*. Уфа, 16–20 октября 2023 г. Сборник материалов Третьей Международной школы-конфер. молодых ученых. Уфа, 2023. С. 127-128.
25. Илюшин, В.В. Термическая обработка крупногабаритных поковок из стали 12ХН3А, подвергающихся глубокой цементации / В.В. Илюшин, Н.А. Данилова // *Известия тульского государственного университета. Технические науки*. 2008. № 4. С. 137-142.
26. Тельдеков, В.А. Оптимизация технологии цементации втулок звена гусениц в атмосфере газовой смеси / В.А. Тельдеков, Л.М. Гуревич // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2020. № 10 (245). С. 82-87. – DOI: 10.35211/1990-5297-2020-10-245-82-87.
27. Краткая энциклопедия по структуре материалов / Под ред. Д.В. Мартина. М.: Техносфера, 2011. 608 с.
28. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ в примерах практического применения / М.М. Криштал, И.С. Ясников, В.И. Полунин, А.М. Филатов, А.Г. Ульяновков. Под общ. ред. М.М. Криштала. М.: Техносфера, 2009. 208 с.
29. Зернограничная диффузия и свойства наноструктурных материалов / Ю.Р. Колобов, Р.З. Валиев, Г.П. Грабовецкая и др. – Новосибирск: Наука, 2001. 232 с.
30. Сильман, Г.И. Проявление аустенитно-карбидного расслоения в жидком чугуна / Г.И. Сильман, К.В. Макаренко // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2012. № 9. С. 24-26.
31. Патент RU 2755912 C1 Российская Федерация. Науглероживающая паста для наплавки : № заявки 2021103164 : заявл. 09.02.2021: опубл. 22.09.2021 / Макаренко К.В., Савинов Д.Н., Вдовин А.В. 6 с.

## REFERENCES

1. Wołowiec-Korecka E. Carburising and nitriding of iron alloys. Switzerland AG: Springer; 2024. doi.org/10.1007/978-3-031-59862-3.
2. Petrova LG, Alexandrov VA, Demin PE, Sergeeva AS. Intensification of chemical and steel thermal treatment: monograph. Moscow: MADI; 2019.
3. Parrish G. Carburizing: microstructures and properties. Ohio: Materials Park: ASM International; 1999. DOI: 10.1361/cmap1999p001.
4. Semenov YuS, Smirnov AE, Fomina LP, Absattarov SN. Determination of carbon potential and carbon mass transfer coefficient during vacuum carburization of steels. *Metallovedenie I Termicheskaya Obrabotka Metallov*. 2024;1:8-13. doi.org/10.30906/mitom.2024.1.8-13.
5. Hosmani SS, Kuppusami P, Rajendra Kumar Goyal. An introduction to surface alloying of metals. New Delhi: Springer; 2014.
6. Suminov IV, Belkin PN, Epelfeld AV, Lyudin VB, Crete BL, Borisov AM. Plasma-electrolytic modification of the surface of metals and alloys. Moscow: Technosphaera; 2011.
7. Berlin EV, Koval NN, Seidman LA. Hardening of steel parts by plasma chemical treatment: reference book. Vologda: Infra-Enzheneriya; 2021.
8. Savrai RA, Skorynina PA, Makarov AV, Kogan LH, Menshakov AI. The influence of frictional treatment and low-temperature plasma carburizing on the microhardness and electromagnetic properties of metastable austenitic steel. *Physics of Metals and Metallography*. 2023;8:748-755. DOI: 10.31857/S0015323023600697.
9. Davis JR. Surface hardening of steels. Ohio, Materials Park: ASM International; 2002. DOI: 10.1361/shos2002p001.
10. Yves Pauleau, editor. Materials surface processing by directed energy techniques. Grenoble (France): School of Electrochemical and Electrometallurgical Engineering National Polytechnic Institute of Grenoble. Oxford: Elsevier; 2006.
11. Mikheev AE, Giri AV, Ivasev SS, Karpov RV. Hardening of metal surfaces with an electric arc. *The Siberian Aerospace Journal*. 2005;5:220-223.
12. Dombrovskii YuM, Stepanov MS. Impact of microarc carburizing and boriding of steel on diffusion layer structure. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy (Izvestiya Vuzov. Chernaya metallurgiya)*. 2020;11-12(63):929-934.
13. Ryabtsev IA, Senchenkov IK. Theory and practice of surfacing operations. Kiev: Eko-tekhnologiya; 2013.
14. Krasikov PP. Study of forming root welds when welding in protective gases using flux pastes [dissertation]. [Volgograd (RF)]: Volgograd State Technical University; 2022.
15. Kiper RA. Properties of substances: handbook of chemistry. Khabarovsk; 2013.
16. Ukraintsev AL, Makarenko KV. Development of an activating flux composition based on traditional oxide elements for A-TIG technology. Collection of materials and reports of a scientific and practical conference with international participation, April 14, 2023: New Horizons; Bryansk: Bryansk State Technical University; 2023.
17. Saidov RM, Kush M, Mayr P, Hoefer K, Huang Y, Komilova DR. Study of the energy efficiency of A-TIG welding of stainless steels using individual flux oxides. *Comp. Nanotechnol*. 2017;3:36-44.
18. Potapyevsky AG, Saraev YuN, Chinakhov DA. Welding of steels in protective gases with a melting electrode. Engineering and technology of the future: monograph. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University; 2012.
19. Benlahrejhe FZ, Nouijer E, Yahia L, Nouijer A. Effect of carburization on the structure and corrosion resistance of low-carbon steel C22. *Metallovedenie I Termicheskaya Obrabotka Metallov*. 2022;4:41-44. doi.org/10.30906/mitom.2022.4.41-44.
20. Kuznetsov VP, Korelin AV, Voropaev VV, Yurovskikh AS, Skorobogatov AS. The effect of thermochemical and surface mechanical treatments on the microstructure, properties and fatigue resistance of 20Cr4' steel. *Metallovedenie I Termicheskaya Obrabotka Metallov*. 2025;1:28-39. doi.org/10.30906/mitom.2025.1.28-39.
21. Savitsky Ya, Dubovsky K, Zgorniyak P. Effect of individual stages of vacuum carburizing on deformations in splines of steels 16MnCr5, AMS6265 and 17CrNiMo7-6. *Metallovedenie I Termicheskaya Obrabotka Metallov*. 2020;9:31-35. doi.org/10.30906/mitom.2020.9.31-35.
22. Smirnov AE. Control of phase composition of complexly alloyed high-temperature steels under vacuum carburizing and quenching. *Metallovedenie I Termicheskaya Obrabotka Metallov*. 2020;9:45-52. doi.org/10.30906/mitom.2020.9.45-52.
23. Shchurkin DO, Akhmedova AS, Koshuro VA, Fomin AA. Study of microhardness uniformity of 40X steel samples after carburizing. Collection of Scientific Papers on the Proceedings of International Scientific Practical Conference, January 30, 2018: Patterns of Development of Modern Science, Engineering and Technology; Belgorod; 2018.
24. Sokova EV, Naumov IM, Nosova MA, Markina LM, Belov RD, Gaponov VA. Tribological behavior of steel 20 after local carburizing under jet electrolytic-plasma heating. Collection of Materials of the Third International School Conference of Young Scientists, October 16-20, 2023: Kaibyshev Readings; Ufa; 2023.
25. Ilyushin VV. Heat treatment of coarse-grained forgings made of 12XH3A steel exposed to deep carburizing. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*. 2008;4:137-142.
26. Teldekov VA, Gurevich LM. Optimization of the technology of carburizing track links in gas-air mixture. *Izvestia VSTU*. 2020;10(245):82-87. DOI: 10.35211/1990-5297-2020-10-245-82-87.



27. Martin DV, editor. Concise encyclopedia on the structure of materials. Moscow: Technosphaera; 2011.
28. Krishtal MM, Yasnikov IS, Polunin VI, Filatov AM, Ulyanenko AG. Scanning electron microscopy and X-ray spectrum microanalysis in examples of practical application. Moscow: Technosphaera; 2009.

29. Kolobov YuR, Valiev RZ, Grabovetskaya GP. Grain diffusion and properties of nanostructured materials. Novosibirsk: Nauka; 2001.
30. Silman GI, Makarenko KV. Display of austenitic-carbide stratification in liquid cast iron. Metallovedenie I Termicheskaya Obrabotka Metallov. 2012;9:24-26.
31. Makarenko KV, Savinov DN, Vdovin AV. RF Patent RU 2755912 C1. Carburizing paste for surfacing. 2021 Sep 22.

#### Информация об авторах:

**Макаренко Константин Васильевич** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Машиностроение и материаловедение», тел.: +7 (4832) 58-82-18, e-mail: makkon1@yandex.ru.

**Вдовин Александр Викторович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение», тел.: +7 (4832) 58-82-18, e-mail: vdovin.alexander.v@yandex.ru.

**Украинцев Александр Леонидович** – аспирант кафедры «Машиностроение и материаловедение», тел.: +7 (4832) 58-82-23, e-mail: alex.ukraintsev2015@yandex.ru

**Савинов Денис Николаевич** – технолог группы проектирования оснастки отдела главного технолога ЗАО «Брянский Арсенал», тел.: +7 (483) 266-17-94, e-mail: dan.sawinov2011@yandex.ru.

**Байдимиров Мурат Акбулатович** – главный технолог ООО «КЕРАМАКС», тел.: +7 (963) 088-11-42-, e-mail: m.baydimirov@keramaks.ru.

**Дмитриева Наталья Викторовна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Общетехнические дисциплины и физика» тел.: +7 (4832) 64-99-17, e-mail: nata-v.dmitrieva@yandex.ru.

**Makarenko Konstantin Vasilyevich** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering and Materials Science, phone: +7 (4832) 58-82-18, e-mail: makkon1@yandex.ru .

**Vdovin Aleksandr Viktorovich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Mathematical Sciences, phone: +7 (4832) 58-82-18, e-mail: vdovin.alexander.v@yandex.ru.

**Ukrinchev Aleksandr Leonidovich** –Postgraduate student of the Department of Mechanical Engineering and Mathematical Sciences, phone: +7 (4832) 58-82-23, e-mail: alex.ukraintsev2015@yandex.ru.

**Savinov Denis Nikolaevich** - Technologist of the Group for Equipment Designing of the Department of the Chief Technologist at Bryansk Arsenal, phone: +7 (483) 266-17-94, e-mail: dan.sawinov2011@yandex.ru.

**Baydimirov Murat Akbulatovich** – Chief Technologist of KARAMAKS LLC, phone: +7 (963) 088-11-42-, e-mail: m.baydimirov@keramaks.ru .

**Dmitrieva Natalia Viktorovna** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of General Technical Disciplines and Physics, phone: +7 (4832) 64-99-17, e-mail: nata-v.dmitrieva@yandex.ru.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**  
**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**  
**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**  
**Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 18.02.2025; одобрена после рецензирования 05.05.2025; принята к публикации 26.05.2025. Рецензент – Химухин С.Н., доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения РАН, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 18.02.2025; approved after review on 05.05.2025; accepted for publication on 26.05.2025. The reviewer is Khimukhin S.N., Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher at the Institute of Materials Science of the Khabarovsk Scientific Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.