

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY

fermet.misis.ru

2026 Том 69 № 3
Vol. No.

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Современное состояние производства и применения хрома в чёрной металлургии. Часть 1. Сырьё

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Влияние дефектов, возникающих в процессе WAAM, на усталостную прочность сталей 08ХМФА и 30ХГСА

Металлографические исследования сплава системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Распределение температуры в прилегающем к своду пространстве методической печи при работе плоскопламенной горелки



ISSN 0368-0797
eISSN 2410-2091

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Научно-технический журнал

Издается с января 1958 г. Выпускается 6 раз в год

2026 Том 69 № 3
Vol. No.

IZVESTIYA FERROUS METALLURGY

Scientific and Technical Journal

Published since January 1958. Issued 6 times a year

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

www.fermet.misis.ru

ISSN 0368-0797 (Print) ISSN 2410-2091 (Online)

Варианты названия:

Известия вузов. Черная металлургия

Izvestiya. Ferrous Metallurgy

Учредители:



Редакционная коллегия:

С. О. Байсанов, д.т.н., профессор, ХМИ им. Ж.Абишева, г. Караганда, Республика Казахстан
В. Д. Белов, д.т.н., профессор, НИТУ МИСИС, г. Москва
А. А. Бродов, к.экон.н., ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва
Е. П. Вольнкина, д.т.н., советник, ОЮЛ «Кузбасская Ассоциация переработчиков отходов», г. Новокузнецк
С. М. Горбатьюк, д.т.н., профессор, НИТУ МИСИС, г. Москва
К. В. Григорович, академик РАН, д.т.н., ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, г. Москва
В. Е. Гролов, д.ф.-м.н., профессор, СибГИУ, г. Новокузнецк
А. Н. Дмитриев, д.т.н., профессор, академик РАЕН, академик АИН РФ, г. Екатеринбург
А. В. Дуб, д.т.н., профессор, ЗАО «Наука и инновации», г. Москва
В. И. Жучков, д.т.н., профессор, ИМЕТ УрО РАН, г. Екатеринбург
Р. Ф. Зингер, д.т.н., профессор, Институт Фридриха-Александра, Германия
М. Зиниград, д.т.н., профессор, Институт Ариэля, Израиль
В. И. Золотухин, д.т.н., профессор, ТулГУ, г. Тула
А. Г. Колмаков, д.т.н., чл.-корр. РАН, ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, г. Москва
В. М. Колокольцев, д.т.н., профессор, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск
М. В. Костина, д.т.н., ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, г. Москва
К. Л. Косырев, д.т.н., академик РАЕН, ОАО «Электростальский завод тяжелого машиностроения», г. Москва
Ю. А. Курганова, д.т.н., профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва
В. А. Линн, ООО «Линн Хай Терм», Германия
Х. И. Лысак, академик РАН, д.т.н., профессор, ВолгГТУ, г. Волгоград
В. П. Мешалкин, академик РАН, д.т.н., профессор, РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва

В соответствии п. 5 Правил формирования перечня ВАК журнал «Известия вузов. Черная металлургия» входит в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, публикация в которых учитывается при защитах кандидатских и докторских диссертаций как индексируемый в МБД.

Главный редактор:

Леопольд Игоревич Леонтьев, академик РАН, советник, Президиум РАН; д.т.н., профессор, НИТУ «МИСИС»; главный научный сотрудник, Институт металлургии УрО РАН
Россия, 119049, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Заместитель главного редактора:

Евгений Валентинович Протопопов, академик РАЕН, д.т.н., профессор, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

Издатель:

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Адреса подразделений редакции:

в Москве

Россия, 119049, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1
Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
Тел.: +7 (495) 638-44-11 E-mail: ferrous@misis.ru

в Новокузнецке

Россия, 654007, Новокузнецк,
Кемеровская обл. – Кузбасс, ул. Кирова, зд. 42
Сибирский государственный индустриальный университет
Тел.: +7 (3843) 74-86-28 E-mail: redjizvz@sibsiu.ru

Р. Р. Мулюков, академик РАН, д.ф.м.-н., профессор, ФГБУН ИПСМ РАН, г. Уфа
С. А. Никулин, д.т.н., профессор, чл.-корр. РАЕН, НИТУ МИСИС, г. Москва
А. Х. Нурумгалиев, д.т.н., профессор, КГИУ, г. Караганда, Республика Казахстан
О. И. Островский, д.т.н., профессор, Университет Нового Южного Уэльса, Сидней, Австралия
Л. Пиетрелли, д.т.н., Итальянское национальное агентство по новым технологиям, энергетике и устойчивому экономическому развитию, Рим, Италия
И. Ю. Пышминцев, д.т.н., РосНИТИ, г. Челябинск
А. И. Рудской, академик РАН, д.т.н., профессор, СПбПУ Петра Великого, г. Санкт-Петербург
Б. А. Сивак, к.т.н., профессор, АО АХК «ВНИИМЕТМАШ», г. Москва
Л. М. Симонян, д.т.н., профессор, НИТУ МИСИС, г. Москва
Л. А. Смирнов, академик РАН, д.т.н., профессор, ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург
С. В. Солодов, к.т.н., НИТУ МИСИС, г. Москва
Н. А. Спирин, д.т.н., профессор, УрФУ, г. Екатеринбург
Г. Танг, Институт перспективных материалов университета Циньхуа, г. Шеньжень, Китай
М. В. Темлянецев, д.т.н., профессор, СибГИУ, г. Новокузнецк
М. Р. Филонов, д.т.н., профессор, НИТУ МИСИС, г. Москва
И. В. Чуманов, д.т.н., профессор, ЮУрГУ, г. Челябинск
О. Ю. Шешуков, д.т.н., профессор, УрФУ, г. Екатеринбург
М. О. Шпайдель, д.ест.н., профессор, Швейцарская академия материаловедения, Швейцария
А. Б. Юрьев, д.т.н., профессор, СибГИУ, г. Новокузнецк
В. С. Юсупов, д.т.н., профессор, ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, г. Москва

Индексирование: Scopus, Russian Science Citation Index (RSCI), Research Bible, Chemical Abstracts, OCLC и Google Scholar

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций ПИ № ФС77-35456.



Статьи доступны под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

IZVESTIYA FERROUS METALLURGY

www.fermet.misis.ru

ISSN 0368-0797 (Print) ISSN 2410-2091 (Online)

Alternative title:

Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya

Founders:



Editorial Board:

Sailaubai O. Baisanov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, Republic of Kazakhstan
Vladimir D. Belov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., NUST MISIS, Moscow
Anatolii A. Brodov, Cand. Sci. (Econ.), Bardin Central Research Institute for Ferrous Metallurgy, Moscow
Il'ya V. Chumanov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., South Ural State Research University, Chelyabinsk
Andrei N. Dmitriev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician, RANS, A.M. Prokhorov Academy of Engineering Sciences, Institute of Metallurgy, Ural Branch of RAS, Ural Federal University, Yekaterinburg
Aleksei V. Dub, Dr. Sci. (Eng.), Prof., JSC "Science and Innovations", Moscow
Mikhail R. Filonov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., NUST MISIS, Moscow
Sergei M. Gorbatyuk, Dr. Sci. (Eng.), Prof., NUST MISIS, Moscow
Konstantin V. Grigorovich, Academician of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS, Moscow
Victor E. Gromov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Siberian State Industrial University, Novokuznetsk
Aleksei G. Kolmakov, Dr. Sci. (Eng.), Corresponding Member of RAS, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS, Moscow
Valerii M. Kolokol'tsev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk
Mariya V. Kostina, Dr. Sci. (Eng.), Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS, Moscow
Konstantin L. Kosyrev, Dr. Sci. (Eng.), Academician of RANS, Electrosteel Heavy Engineering Works JSC, Moscow
Yuliya A. Kurganova, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Bauman Moscow State Technical University, Moscow
Linn Horst, Linn High Therm GmbH, Hirschbach, Germany
Vladimir I. Lysak, Academician of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, Volgograd State Technical University, Volgograd
Valerii P. Meshalkin, Dr. Sci. (Eng.), Academician of RAS, Prof., D.I. Mendeleev Russian Chemical-Technological University, Moscow
Radik R. Mulyukov, Academician of RAS, Dr. Sci. (Phys.-Chem.), Prof., Institute of Metals Superplasticity Problems of RAS, Ufa

In accordance with paragraph 5 of the Rules for the formation of the Higher Attestation Commission list journal "Izvestiya. Ferrous metallurgy" is included in the list of leading peer-reviewed scientific journals, publication in which is taken into account in the defense of candidate and doctoral dissertations, as indexed in international data bases.

Editor-in-Chief:

Leopol'd I. Leont'ev, Academician, Adviser of the Russian Academy of Sciences; Dr. Sci. (Eng.), Prof., NUST "MISIS"; Chief Researcher, Institute of Metallurgy UB RAS, Moscow
4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation
National University of Science and Technology "MISIS"

Deputy Editor-in-Chief:

Evgenii V. Protopopov, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Siberian State Industrial University, Novokuznetsk

Publisher:

National University of Science and Technology "MISIS"

Editorial Office Address:

in Moscow

4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation
National University of Science and Technology "MISIS"
Tel.: +7 (495) 638-44-11 E-mail: ferrous@isis.ru

in Novokuznetsk

42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass
654007, Russian Federation
Siberian State Industrial University
Tel.: +7 (3843) 74-86-28 E-mail: redjizvz@sibsiu.ru

Sergei A. Nikulin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Corresponding Member of RANS, NUST MISIS, Moscow
Asylbek Kh. Nurumgaliev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Karaganda State Industrial University, Karaganda, Republic of Kazakhstan
Oleg I. Ostrovski, Dr. Sci. (Eng.), Prof., University of New South Wales, Sydney, Australia
Loris Pietrelli, Dr., Scientist, Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development, Rome, Italy
Igor' Yu. Pyshmintsev, Dr. Sci. (Eng.), Russian Research Institute of the Pipe Industry, Chelyabinsk
Andrei I. Rudskoi, Academician of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg
Oleg Yu. Sheshukov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Ural Federal University, Yekaterinburg
Laura M. Simonyan, Dr. Sci. (Eng.), Prof., NUST MISIS, Moscow
Robert F. Singer, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Friedrich-Alexander University, Germany
Boris A. Sivak, Cand. Sci. (Eng.), Prof., VNIIMETMASH Holding Company, Moscow
Leonid A. Smirnov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician of RAS, OJSC "Ural Institute of Metals", Yekaterinburg
Sergei V. Solodov, Cand. Sci. (Eng.), NUST MISIS, Moscow
Marcus Speidel, Dr. Natur. Sci., Prof., Swiss Academy of Materials, Switzerland
Nikolai A. Spirin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Ural Federal University, Yekaterinburg
Guoi Tang, Institute of Advanced Materials of Tsinghua University, Shenzhen, China
Mikhail V. Temlyantsev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Siberian State Industrial University, Novokuznetsk
Ekaterina P. Volynkina, Dr. Sci. (Eng.), Advisor, ALE "Kuzbass Association of Waste Processors", Novokuznetsk
Aleksei B. Yur'ev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Siberian State Industrial University, Novokuznetsk
Vladimir S. Yusupov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS, Moscow
Vladimir I. Zhuchkov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute of Metallurgy, Ural Branch of RAS, Ural Federal University, Yekaterinburg
Michael Zinigrad, Dr. Sci. (Physical Chemistry), Prof., Rector, Ariel University, Israel
Vladimir I. Zolotukhin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Tula State University, Tula

Indexed: Scopus, Russian Science Citation Index (RSCI), Research Bible, Chemical Abstracts, OCLC and Google Scholar

Registered in Federal Service for Supervision in the Sphere of Mass Communications **PI number FS77-35456.**



Articles are available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Волков А.И., Кологриев К.А., Козырев Н.А., Краснянская И.А.** Современное состояние производства и применения хрома в чёрной металлургии. Часть 1. Сырьё 220
- Тресвятский Л.А., Протопопов Е.В., Худолеев А.Н., Хомичева В.Е.** Вклад Кузнецкого металлургического комбината в создание оборонного комплекса СССР в 1941 – 1945 гг.: анализ развития и модернизации 231

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Мордовина Ю.С., Чернигин М.А., Мансуров Р.Ш.** Влияние дефектов, возникающих в процессе WAAM, на усталостную прочность сталей 08ХМФА и 30ХГСА 242
- Овчаренко В.А., Бабаев А.С., Савченко Н.Л., Стрелкова И.Л.** Микроструктура и механические характеристики термически обработанного сплава Inconel 625, полученного по технологии проволочного электронно-лучевого аддитивного производства 250
- Крюков Р.Е., Коновалов С.В., Михно А.Р., Панченко И.А.** Металлографические исследования сплава системы Co–Cr–Fe–Mn–Ni 258
- Клевцов Г.В., Линдеров М.Л., Клевцова Н.А., Фесенюк М.В., Тюрков М.Н., Пигалева И.Н.** Прочность и механизм разрушения серого чугуна при различных видах нагружения. Часть 1. Статическая трещиностойкость и прочность образцов при растяжении и кручении 265

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
И АВТОМАТИЗАЦИЯ
В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

- Поспелов И.Д.** Совершенствование методики расчёта усилий горячей прокатки с учётом влияния температуры на упругие свойства полос из легированных конструкционных сталей 272
- Халезов А.О., Нухов Д.Ш., Григорьев Е.А.** Оценка энергосиловых параметров поперечно-винтовой прошивки заготовки с учетом особенностей формоизменения металла в очаге деформации 280
- Царева С.А., Новожилов В.В., Царев Ю.В.** Предпосылки адаптации имитационного моделирования на основе бинарного алгоритма Такаги–Сугено для повышения эффективности корпоративной системы менеджмента качества 286

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

- Volkov A.I., Kologriev K.A., Kozyrev N.A., Krasnyanskaya I.A.** Current state of chromium production and application in ferrous metallurgy. Part 1. Raw materials 220
- Tresvyatskii L.A., Protopopov E.V., Khudoleev A.N., Khomicheva V.E.** Contribution of the Kuznetsk Metallurgical Plant to the USSR defense complex in 1941 – 1945: Analysis of development and modernization 231

MATERIALS SCIENCE

- Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Mordovina Yu.S., Chernigin M.A., Mansurov R.Sh.** Effect of the defects occurring during WAAM process on fatigue strength of 08CrMoV and 30CrMnSi steels 242
- Ovcharenko V.A., Babaev A.S., Savchenko N.L., Strelkova I.L.** Microstructure and mechanical properties of heat-treated Inconel 625 alloy obtained by wire electron-beam additive manufacturing 250
- Kryukov R.E., Konovalov S.V., Mikhno A.R., Panchenko I.A.** Metallographic studies of the alloy of Co–Cr–Fe–Mn–Ni system 258
- Klevtsov G.V., Linderov M.L., Klevtsova N.A., Fesenyuk M.V., Tyur'kov M.N., Pigaleva I.N.** Strength and failure mechanism of gray cast iron under various loading conditions. Part 1. Static crack resistance, tensile and torsional strength of the samples 265

**INFORMATION TECHNOLOGIES
AND AUTOMATIC CONTROL
IN FERROUS METALLURGY**

- Pospelov I.D.** Improvement of the method for calculating hot rolling force taking into account the effect of temperature on elastic properties of alloyed construction steel strips 272
- Khalezov A.O., Nukhov D.Sh., Gregorev E.A.** Evaluation of energy-power parameters of billet helical piercing in accordance with metal forming peculiarities of in deformation zone 280
- Tsareva S.A., Novozhilov V.V., Tsarev Yu.V.** Preconditions of adapting simulation modeling based on the Takagi–Sugeno binary algorithm to improve the effectiveness of corporate quality management system 286

СОДЕРЖАНИЕ (продолжение)

CONTENTS (Continuation)

Зайдес С.А., Буй М.З. Оценка напряженно-деформированного состояния при комбинированном процессе правки и упрочнения нежестких цилиндрических деталей 294	Zaides S.A., Bui M.D. Evaluation of the stress-strain state in the combined process of straightening and strengthening of non-rigid cylindrical parts 294
Лалетина Е.В., Левицкий И.А., Шатохин К.С. Распределение температуры в прилегающем к своду пространстве методической печи при работе плоскопламенной горелки 305	Laletina E.V., Levitskii I.A., Shatokhin K.S. Temperature distribution in roof-adjacent space of reheating furnace with a flat-flame burner 305
Дмитриев А.Н., Витькин Д.А., Золотых М.О., Витькина Г.Ю. Математическая модель наполнения горна доменной печи 308	Dmitriev A.N., Vit'kin D.A., Zolotykh M.O., Vit'kina G.Yu. Mathematical model of blast furnace hearth filling 308
Илье Валерьевичу Чуманову – 55 лет! 316	To the 55th Anniversary of Il'ya Valer'evich Chumanov ... 316



УДК 669.1:338 + 669.267:669.15'26

DOI 10.17073/0368-0797-2026-3-220-230

Оригинальная статья
Original article

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ ХРОМА В ЧЁРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ. ЧАСТЬ 1. СЫРЬЁ

А. И. Волков[✉], К. А. Кологриев, Н. А. Козырев, И. А. Краснянская

Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина (Россия, 105005, Москва, ул. Радио, 23/9)

✉ rhenium@list.ru

Аннотация. Приведены сведения о сферах применения хрома в современной промышленности. Основным сырьём для его получения являются хромитовые руды. Представлены данные по составу, объёму добычи хромитовых руд и производству из них концентратов в 20 странах мира за 2023 г. В 2023 г. произведено 40 759 тыс. т товарного хромитового сырья, из него 48 % с $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO} = 1,5 - 1,9$ и 67,5 % с 40 – 44 % Cr_2O_3 . Отмечено ухудшение качества применяемого сырья. По содержанию Cr_2O_3 требованиям ферросплавной промышленности, применяемым 10 – 15 лет назад, соответствует лишь 28 % всех выпускаемых руд, а по отношению $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ – только 19 %, 18 % не соответствует требованиям даже к «чардж-хрому». Представлены данные по объёмам производства, содержанию Cr_2O_3 и $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ в товарных хромитовых рудах и концентратах, а также планы развития различных месторождений России. Потребности РФ в хромитовом сырье на 65 % удовлетворялись за счёт импорта. Отмечено, что большая часть потребляемого хромитового сырья используется в чёрной металлургии в виде хромовых ферросплавов. Рассмотрено применяемое техногенное сырьё для производства FeCr, сферы применения шлаков, возможности переработки шламов и пыли. В мире более 18 % хромитового сырья получают из шламов и хвостов обогащения. Приведены результаты промышленных испытаний хромитового сырья Аганозёрского и Сопчеозёрского месторождений. Статья содержит сведения о технико-экономических расчётах, проведённых различными компаниями, для руд этих месторождений. Для ликвидации дефицита импортного сырья, а также для развития отечественной отрасли предложено разрабатывать руды этих месторождений. Ещё одним источником хрома могут стать некондиционные руды в освоённых районах их добычи и переработки.

Ключевые слова: хромовое сырьё, хромитовая руда, объём производства концентратов, производство по странам мира, производство в России, проблемные вопросы, Аганозёрское месторождение, Сопчеозёрское месторождение, некондиционные руды

Для цитирования: Волков А.И., Кологриев К.А., Козырев Н.А., Краснянская И.А. Современное состояние производства и применения хрома в чёрной металлургии. Часть 1. Сырьё. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2026;69(3):220–230.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-220-230>

CURRENT STATE OF CHROMIUM PRODUCTION AND APPLICATION IN FERROUS METALLURGY. PART 1. RAW MATERIALS

A. I. Volkov[✉], K. A. Kologriev, N. A. Kozyrev, I. A. Krasnyanskaya

I.P. Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy (23/9 Radio Str., Moscow 105005, Russian Federation)

✉ rhenium@list.ru

Abstract. The article provides information on the applications of chromium in modern industry. The main raw materials for its production are chromite ores. Data on the composition, volume of extraction of chromite ores and production of concentrates from them in 20 countries of the world for 2023 are presented. In 2023, 40,759 thousand tons of commercial chromite raw materials were produced, of which 48 % contains $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO} = 1.5 - 1.9$ and 67.5 % contains 40 – 44 % Cr_2O_3 . Deterioration of quality of the raw materials used was noted. In terms of Cr_2O_3 content, only 28 % of all ores produced meet the requirements of the ferroalloy industry used 10 – 15 years ago, while only 19 % meet the requirements for $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}$, and 18 % do not even meet the requirements for charge chromium. The authors present the data on production volumes, Cr_2O_3 and $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ content in commercial chromite ores and concentrates, as well as development plans for various deposits in Russia. The needs of the Russian Federation for chromite raw materials were met by 65 % through imports. Most of the consumed chromite raw materials are used in ferrous metallurgy in the form of chromium ferroalloys. The paper describes the applied man-made raw materials for production of FeCr, scope of slags application, possibility

of processing sludge and dust. Globally, more than 18 % of chromite raw materials are obtained from sludge and tailings. The results of industrial tests of chromite raw materials from the Aganozerskoe and Sopcheozerskoe deposits are presented, as well as information on the technical and economic calculations carried out by different companies for the ores of these deposits. Therefore, to eliminate the shortage of imported raw materials and to develop the domestic industry, it is proposed to process ores from these deposits. Non-commercial (substandard) ores in developed mining and processing areas may become another source of chromium.

Keywords: chromium raw materials, chromite ore, volume of concentrates production, worldwide production, production in Russia, problematic issues, Aganozerskoe deposit, Sopcheozerskoe deposit, substandard ores

For citation: Volkov A.I., Kologriev K.A., Kozyrev N.A., Krasnyanskaya I.A. Current state of chromium production and application in ferrous metallurgy. Part 1. Raw materials. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2026;69(3):220–230. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-220-230>

ВВЕДЕНИЕ

Хром в виде феррохрома и хрома металлического в больших масштабах применяют в чёрной металлургии для легирования сталей и чугуна, а также в литейном производстве (формовочный песок). Соединения хрома используют для получения огнеупоров и в химической промышленности [1; 2]. В последние годы в мире на фоне роста производства нержавеющей стали наблюдается увеличение спроса на феррохром [1]. Основные производители феррохрома сосредоточены в нескольких странах: КНР, ЮАР, Казахстан и Индия. На долю этих стран суммарно приходится 88 % мирового производства феррохрома [3; 4]. Россия является мировым лидером по выпуску металлического хрома и низкоуглеродистого феррохрома, при этом существенная доля хромовых ферросплавов поступает на экспорт [5]. В настоящее время предприятия по производству хромовых ферросплавов России переживают непростые времена. Тихвинский ферросплавный завод (ТФЗ) приостанавливал свою деятельность в 2024 и 2025 гг. [6]. На сокращённую рабочую неделю переходят Челябинский электрометаллургический комбинат (ЧЭМК) и Серовский завод ферросплавов (СЗФ) [7]. Сообщается и о серьёзном кризисе на Ключевском заводе ферросплавов (КЗФ): производство сокращено, а сотрудники отправлены в вынужденный отпуск [8]. В 2025 г. Ново-троицкий завод хромовых соединений (НЗХС) приостанавливал свою деятельность [9]. С целью выявления причин кризисных явлений в отрасли и выработки рекомендаций по улучшению ситуации в настоящей работе предпринята попытка анализа промышленного производства и потребления хромовых ферросплавов в России и в мире, а также пути развития научно-технологического прогресса в области технологий получения хромовых сплавов. В первой части работы рассмотрена сырьевая составляющая хромовой отрасли.

ДОБЫЧА И ПЕРЕРАБОТКА ХРОМИТОВЫХ РУД В МИРЕ

Сырьём для хромовой промышленности служат хромитовые руды. Их главным компонентом является шпинель FeCr_2O_4 , в которой Fe^{2+} и Cr^{3+} могут быть частично замещены Mg^{2+} и Al^{3+} соответственно. Мировые запасы хромитовых руд составляют около 12 млрд т, в основном они сосредоточены в Зимбабве, Казахстане

и ЮАР. По добыче хромитовой руды на первом месте в мире стоит ЮАР, а по потреблению – КНР. Объём импорта хромитовой руды в КНР достиг 18,29 млн т в 2023 г., тогда как собственное производство составляет около 100 тыс. т [10]. В обзорах и отчётах приводятся существенно разные данные по объёмам добычи и переработки хромитовой руды [11 – 13]. Производство товарной хромитовой руды и концентратов во всём мире в 2024 г. по данным ассоциации ICDA¹ превысило 39 млн т, а по данным геологической службы США USGS – 47 млн т [11]. По данным Британской геологической службы BGS, в 2023 г. производство хромитовых руд и концентратов в мире составило 37,5 млн т [13], по данным ICDA – 36,2 млн т, по данным Минприроды РФ – 39,7 млн т [12], по данным USGS – 45,2 млн т [11]. В основном хромитовые руды обогащают гравитационными методами [14]. В некоторых странах помимо хрома из таких руд извлекают металлы Pt- группы (ЮАР [15], Зимбабве), серпентинит и оливин (Турция) [16]. В Папуа Новая Гвинея хромитовый концентрат является побочной продукцией добычи Ni и Co [17].

Основными показателями качества хромитового сырья, определяющими сферы его применения и технологии переработки, являются содержание Cr_2O_3 , SiO_2 , CaO, P, S, отношения $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ и $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$, крупность. Требования по составу концентратов, обозначаемые в отечественной и зарубежной литературе, отличаются [18 – 22]. Так, в справочниках [18; 19] указывают, что для ферросплавной промышленности применяют сырьё с $\text{Cr}_2\text{O}_3 \geq 45\%$ и $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO} \geq 3$, предел этого отношения равен 2,5, а $\text{SiO}_2 \leq 10\%$. Руды с содержанием SiO_2 более 10 % не могут применяться вследствие своей легкоплавкости, которая вызывает раскрытие колошника и расстройство хода плавки. От содержания FeO, Al_2O_3 и отношения $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ зависят активность шлака и его окислительная способность. Как правило, в рудах с более высокими содержаниями FeO и Al_2O_3 наблюдается восстановление кремния из шлакового расплава и большее его содержание в ферросплаве. Применение руд с $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ менее 3 способствует получению сплава с повышенным содержанием крем-

¹ Chrome markets and resources/ International Chromium Development Association. Available at URL: <https://www.icdacr.com/market-insights/>

Таблица 1. Требования к хромитовому сырью для промышленности

Table 1. Requirements for chromite raw materials for industry

Области применения	Лякишев, 1999 г. [18]		Maulik, 2005 г. [20]		Elsner, 2010 г. [21]		Mosier, 2012 г. [22]	
	Cr ₂ O ₃ , %	Cr ₂ O ₃ /FeO	Cr ₂ O ₃ , %	Cr ₂ O ₃ /FeO	Cr ₂ O ₃ , %	Cr ₂ O ₃ /FeO	Cr ₂ O ₃ , %	Cr ₂ O ₃ /FeO
«Чардж-хром»	–	–	48	1,6	≥46	≥1,5	46 – 55*	<1,8
Высокоуглеродистый (в/у) FeCr	≥49	3,0	≥48	2,8			56 – 64**	1,8 – 2,5
Низкоуглеродистый (н/у) FeCr	≥50	2,5 – 3,0	≥48	3,0			>64***	>2,5
FeSiCr	–	–	48	3,0			–	–
Огнеупоры	≥33	–	48 – 52	–	≥30	2,0 – 2,5	30 – 40	2,0 – 2,5
Химическая промышленность	≥49	–	44	–	40 – 46	1,5 – 2,0	40 – 46	1,5 – 2,0
Литейные пески	–	–	–	–	≥44	2,0 – 2,5	–	–

* Metallurgical grade C; ** Metallurgical grade B; *** Metallurgical grade A.

ния. В табл. 1 представлены требования к содержанию Cr₂O₃ и Cr₂O₃/FeO в хромитовом сырье в зависимости от его применения.

С целью анализа особенностей используемого в последнее время хромитового сырья проанализированы данные отчётов [11 – 13] по объёмам его добычи и переработки, а также по составу руд различных месторождений. В табл. 2 представлены имеющиеся сведения по составу, объёму добычи хромитовых руд и производству из них концентратов в разных странах мира за 2023 г. Содержание Cr₂O₃ и отношение Cr₂O₃/FeO приведено для товарных руд и концентратов. Они, как правило, отличаются от средних значений при оценке месторождений.

Как видно из табл. 2, отношение Cr₂O₃/FeO обычно мало меняется после обогащения руд в реальном производстве. Для повышения отношения Cr₂O₃/FeO в сырье рекомендуют совершенствовать гравитационно-флотационные и магнитные способы обогащения, а также проводить работы по гидрохимическому обогащению [18]. Магнетизирующий обжиг [23] или металлизация с углём [24] с последующей магнитной сепарацией позволяют повысить отношение Cr₂O₃/FeO в концентрате. Для удаления железа из хромита предложено использовать хлорирование [25].

Проанализировав данные табл. 2, авторы составили графики (рис. 1) распределения товарных руд и концентратов, выпускаемых в мире, по отношению Cr₂O₃/FeO и содержанию Cr₂O₃. Как видно из этих данных, по содержанию Cr₂O₃ требованиям ферросплавной промышленности (табл. 1) соответствует всего 28 % всех выпускаемых руд, по отношению Cr₂O₃/FeO только 19 % соответствуют требованиям к высокоуглеродистому феррохрому, а 18 % не соответствует требованиям даже к «чардж-хрому». Очевидно, что это связано с ухудшением качества применяемых хромитовых руд. Наиболее высокие требования к качеству хромитового сырья в отечественной литературе [18] обусловлены работой предприятий со времён СССР на базе наиболее

богатого по содержанию Cr₂O₃ и отношению Cr₂O₃/FeO хромитового сырья месторождений Кемпирсайского массива в Казахстане. Использование сырья с низкими отношением Cr₂O₃/FeO и содержанием Cr₂O₃ приводит к ухудшению технико-экономических показателей производства феррохрома (возрастают удельный расход электроэнергии и выход шлака, снижаются содержание хрома в сплаве и производительность технологического оборудования).

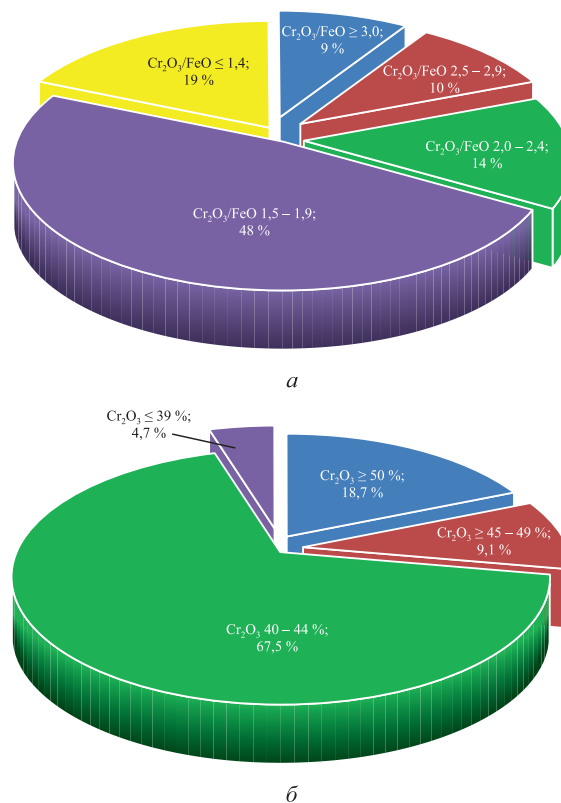


Рис. 1. Распределение товарных руд и концентратов, выпускаемых в мире, по отношению Cr₂O₃/FeO (а) и содержанию Cr₂O₃ (б)

Fig. 1. Distribution of commercial ores and concentrates produced in the world by Cr₂O₃/FeO ratio (а) and Cr₂O₃ content (б)

Таблица 2. Добыча и производство товарных хромитовых руд и концентратов в странах мира за 2023 г.

Table 2. Mining and production of commercial chromite ores and concentrates in the world in 2023

Страна	Месторождения	Добыча руды			Производство товарных руд и концентратов		
		масса, тыс. т	Cr ₂ O ₃ , % в руде	Cr ₂ O ₃ / FeO	масса, тыс. т	Cr ₂ O ₃ , % в концентрате	Cr ₂ O ₃ / FeO
ЮАР	Рифы LG6 и MG1/2 Бушвельдского комплекса	19 683	34 – 37	1,3 – 1,5	18 300	40 – 44	1,6 – 1,7
	Риф UG2 Бушвельдского комплекса	~14 300	1 – 6 (26 – 30 в хвостах)	0,72	7500	40 – 42	1,3 – 1,4
Казахстан	Южно-Кемпирсайское	6104	40 – 55	3,4	3593	49 – 62	3,5 – 3,9
Индия	Долина Сукинда	4100	36 – 45	1,8	3148	48 – 52	2,2
Турция	Гюлемана, Укопру	8160	40 – 43	2,7	2582	46 – 48	2,7 – 2,8
Зимбабве	Великая Дайка	1070	42 – 49	1,7	736	48 – 52	1,9
Финляндия	Кеми	1910	24 – 26	1,5 – 1,7	1149	42 – 44	2,3
Россия	Центральное, Главное Сарановское	466	21 – 38	1,8 – 2,5	386	37 – 38	2,1 – 2,5
Бразилия	Римо-Эйро	1420	21	2,0 – 2,8	523	48	2,4
Пакистан	Бела, Муслимбаг-Жоб, Чилас	–	34 – 42	2,3 – 2,6	465	46 – 48	2,6 – 2,8
Иран	Чешме-Бид	240	38 – 40	2,4 – 3,2	101,5	42 – 44	2,5 – 2,6
Папуа Новая Гвинея	Раму, Гессен Бай	~1060	9 – 13	–	150	37 – 45	1,6 – 2,0
Албания	Альбасан, Булькиза	–	18 – 42	1,7 – 3,2	910	35 – 45	2,5
Мадагаскар	Андриамена, Беманевика	–	–	–	91	42 – 48	2,1 – 2,3
Судан	Холмы Ингессаны	–	–	–	4	41 – 58	3,5 – 5,0
Афганистан	Кох Сафи, Хост	–	–	–	2	42 – 56	2,0 – 3,0
Китай	Луобуша	–	–	–	140	45 – 50	4,0
Оман	Аль-Гашаби, Шамс, Зам 1 и 2, RG 12, Махра	–	–	2,2 – 2,8	377	33 – 48	2,4
Филиппины	Масинлок	–	–	–	102	32 – 40	2,2
Вьетнам	Ко Динь	–	–	–	41	46	1,7
Австралия	Кубина	–	–	–	459	42	1,6

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕКОНДИЦИОННОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

В связи с исчерпанием запасов богатых и доступных руд, высокими ценами на хромитовое сырьё всё больше предприятий занимается переработкой техногенных образований с извлечением хромитового концентрата. На участке UG2 Бушвельдского комплекса в ЮАР хвосты обогащения (26 – 30 % Cr₂O₃) после извлечения металлов платиновой группы используют как хромовое сырьё [15; 26]. Ещё два десятилетия назад переработка этих хвостов считалась экономически нецелесообразной [23]. В 2023 г. в ЮАР из хвостов получено 7,5 млн т хромитового концентрата [12], что составляет более 18 % от общемирового производства товарных руд и концентратов. В Казахстане на Донском ГОКе с 2023 г. реализуют проект ERG Green, направленный на

переработку 14,5 млн т шламов (до 30 % Cr₂O₃) с получением концентрата, содержащего от 48,5 % Cr₂O₃ [27]. В России для получения хромитового концентрата предложено перерабатывать техногенные образования россыпей валунчатых хромовых руд (28 – 41 % Cr₂O₃) [28] и отвалы хвостов обогащения хромитовых руд Сарановского месторождения (20 – 28 % Cr₂O₃) [29]. Хроматные шламы, образованные в результате гидрометаллургической переработки хромитового сырья, могут служить источником хрома [30], в том числе как сырьё для получения феррохрома [31]. В России ежегодно из них извлекают до 400 т соединений хрома. В ЮАР, России [32], Казахстане [33], Индии [34], КНР [35], Турции [36] и других странах в переработку вовлечены отвальные шлаки производства феррохрома, из которых с помощью гравитационного обогащения извлекают феррохром. Минеральную часть шлака предложено

использовать в сельском хозяйстве для раскисления почв [37], в строительных материалах в качестве заполнителя [38; 39], для замены цемента [40], материала для дорожных покрытий [41], для геополимеров и щелочно-активированных материалов [37; 42], при производстве огнеупорных изделий [43; 44], для выщелачивания хрома [45]. Мелкую фракцию феррохрома и пыль газоочистки предложено использовать вторично в производстве [46; 47], в том числе после их брикетирования [48; 49], переплава в слиток [50], для производства азотированного феррохрома [51; 52], ферросиликохрома [53; 54], хромовой лигатуры [55], в качестве компонентов агломерационной шихты [56], шихты для получения огнеупоров [57]. В работах [58; 59] показано, как из отсевов и пыли системы дробления высокоуглеродистого FeCr (в/у- FeCr) путём обработки брикетов с окислителями в вакуумной печи получен низкоуглеродистый FeCr (н/у- FeCr).

ДОБЫЧА И ПОТРЕБЛЕНИЕ ХРОМИТОВОГО СЫРЬЯ в России

Российское хромовое сырьё характеризуется низким качеством и требует обогащения. Наибольшее количество хромитовой руды добывается на месторождении Центральное I в Ямало-Ненецком АО. Запасы его во многом исчерпаны, а качество руд снизилось: среднее содержание Cr_2O_3 в рудах, добытых в 2023 г., составило всего 21 %, в 2019 – 2020 гг. оно составляло 29 – 30 %, а среднее по месторождению 37 – 38 % [12]. После добычи руды сортируют с помощью рентгенорадиометрической сепарации. В планах ЧЭМК была организация обогащения руды на месторождении. Проводятся работы по вводу в эксплуатацию других месторождений массива Рай-Из (Рыбий хвост, Полойшорское-1, Месторождение 214, Енгайское III), однако планируемые объёмы добычи на них составляют суммарно около 50 тыс. т руды в год. Второй по объёму добычи хромитовой руды является Сарановская шахта «Рудная», занимающаяся разработкой Главного Сарановского месторождения. Концентрат Сарановской шахты «Рудная» поступает на обогащение, которое включает этапы дробления, грохочения, обогащения в тяжёлых суспензиях, отсадки, доизмельчения, гравитационного обогащения на винтовых сепараторах и концентрационных столах. Существующих запасов Главного Сарановского месторождения должно хватить до 2027 г. Готовится к освоению Южно-Сарановское месторождение с проектной мощностью до 350 тыс. т руды в год. Эксплуатируются мелкие месторождения Алапаевского массива (III Подённый рудник, Лесное). Планируется добыча на месторождениях этого же массива Баканов Ключ и Курмановское объёмом 40 – 60 тыс. т с каждого. В табл. 3 представлена оценка авторов по объёмам производства товарных хромитовых руд и концентратов в России за 2023 г. на основе данных работы [12].

Как видно из табл. 3, производимые в России концентраты и руды характеризуются низким содержанием Cr_2O_3 . Поэтому большая часть хромитового сырья для получения феррохрома поступала по импорту. Всего в период 2015 – 2021 гг. в Россию поставлено 5203 тыс. т хромитовых руд и концентратов, из них на долю Казахстана приходилось 90,3 % поставок, ЮАР – 6,9 %, Турции – 2,2 %, остальные – 0,5 %. В 2010 – 2019 гг. объём импортируемого в Россию сырья составлял в среднем 980 тыс. т в год, что составляло 65 % видимого потребления (1500 тыс. т). На рис. 2 представлено распределение руд и концентратов по отраслям. Показано, что 85,6 % сырья потребляется ферросплавными предприятиями (ЧЭМК, СЗФ, ТФЗ, КЗФ), 10,6 % – предприятиями химической промышленности НЗХС и «Хромпик» (ранее называлось «Русский хром 1915»), при этом большая часть потребляемого ими сырья идёт на производство Cr_2O_3 для получения металлического хрома и лигатур, в том числе на КЗФ. Остальное количество хромитового сырья потребляется в основном для получения огнеупоров на комбинате Магнетит, НТМК, Уралмаше и т. д. Начиная с 2020 г. объём импортных поставок снизился в 2,5 раза (в среднем до 390 тыс. т). Это обусловлено планами компании АО «ТНК «Казхром» (входит в состав ERG) перерабатывать весь объём добываемого хромитового сырья в Казахстане. Усугубило положение снижение объёма добычи руды в Казахстане практически вдвое с 2022 г. из-за завершения открытой отработки крупнейших месторождений Кемпирсайского массива. В результате видимое потребление хромитового сырья в России в 2020 – 2023 гг. снизилось до 1050 тыс. т в год. В 2025 г. турецкая компания Yildirim Group, владеющая ТОО «Восход-Oriel» в Казахстане, из-за санкционных ограничений прекратила поставки хромитового сырья в Россию. В результате на сегодняшний день поставки из Казахстана хромитового сырья полностью прекра-

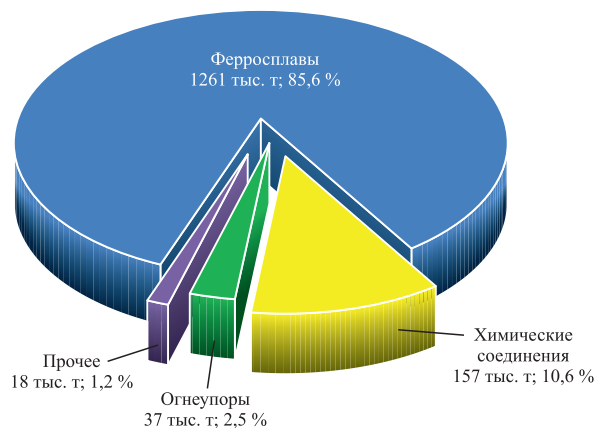


Рис. 2. Структура потребления хромитовых руд и концентратов в России

Fig. 2. Structure of consumption of chromite ores and concentrates in Russia

Таблица 3. Объём производства товарных хромитовых руд и концентратов в 2023 г. с планами освоения месторождений в России

Table 3. Volume of chromite ores and concentrates production in 2023 with plans for development of deposits in Russia

Регион	Месторождения	Объём производства, тыс. т	Cr ₂ O ₃ , % в концентрате	Cr ₂ O ₃ / FeO	Планы освоения месторождений
Ямало-Ненецкий АО, массив Рай-Из	Центральное I	318,0	35 – 40	2,5	Запасы исчерпаны
	Центральное II, Полойшорское, 214, Рыбий хвост, Енгайское III	0,3			Планируется добыча в 2025 – 2032 гг. суммарно 48,5 тыс. т в год, на месторождении Рыбий хвост в 2021 г. добыто 4 тыс. т
	Западное	0	39	Планируются разведочные работы до 2029 г.	
Пермский край, Сарановская группа	Главное Сарановское	45,1	37 – 39	2,1	В планах увеличение мощности рудника до 400 тыс. т в год. Запасы на 2 – 3 года
	Малый Пестерь	0	<38		В 2021 г. добыто 10 тыс. т руды, добыча прекращена в 2022 г. (0,3 тыс. т), планируется доработка запасов
	Россыпи Сарановской группы	0	37 – 38		В 2019 г. добыто 85 тыс. т, исчерпано
	Южно-Сарановское	0	37 – 38	2,6	Планируется добыча в 2025 – 2038 гг. по 350 тыс. т в год, ранее разрабатывалось открытым способом
Свердловская область, Алапаевский массив	III Подённый рудник	11,0	46 – 51	3,8	Балансовые запасы исчерпаны
	Лесное	3,0			Нет данных
	Вершина реки Алапахихи	0			В 2014 г. 12 тыс. т. До 6 тыс. т в 2020 г. добыча.
	Курмановское	0	47	2,2 – 3,4	Планируется добыча в 2025 – 2028 гг. по 57 тыс. т в год, центральная часть обрабатывалась до 2013 г.
	Месторождение № 219	0			До 2019 г. опытно-промышленные работы с планом по добыче 37 тыс. т. Затем работы прекращены
	Баканов Ключ	0	<52	2,4	Планируется добыча по 44,4 тыс. т в год
Оренбургская область	Аккаргинское	9,0	35 – 38	2,6 – 3,1	Планируется добыча по 30 тыс. т в год. Запасы месторождения будут отработаны к 2028 г.
Челябинская область	Верблюжьегорское	0	≥40	≥2,5	До 1950-х гг. добывалось по несколько тыс. т руды. Запасы исчерпаны.
	Уфалейская группа (Буслаева гора, Северо-Западное 2, Западно-Родионовское, Восточно-Родионовское)	0	30 – 40	1,4 – 2,0	Планируется доработка остаточных запасов З. Родионовского, В. Родионовского, Буслаева гора, С. Западное 2 (2,4 тыс. т). В 2019 г. на месторождениях Буслаева гора, Северо-Западное 2 добыто 15,4 тыс. т. Волчьегорское отработывалось в 1930-х гг.
	Лысогорское	0	43,4		Отработывалось до 2011 г.

щены [60]. Судя по проектам освоения новых мощностей (табл. 3), увеличения объёма производства хромитового сырья внутри России ожидать не приходится.

Примечательно, что до открытия месторождений Кемпирсайского массива в Казахстане (уникального по содержанию Cr₂O₃ с аномально высоким отношением

$\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ феррохром ЧЭМК производили из хромитовых руд Челябинской области [61] и Пермского края [62].

В России около 70 % запасов хрома заключено в хромитовых рудах Аганозёрского и Сопчеозёрского месторождений. Эти руды относят к бедным, поскольку содержание Cr_2O_3 в них всего 22 – 25 %. Соотношение $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ составляет 1,6 – 1,8 в рудах Аганозёрского и 2,2 в рудах Сопчеозёрского месторождений. По соотношению $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ руда Аганозёрского месторождения похожа на добываемые в промышленном масштабе руды Финляндии, Зимбабве и Индии, а руда Сопчеозёрского – на руды Бразилии и Албании.

ЦНИИчермет им. И.П. Бардина в 2000 – 2001 гг. на базе ЧЭМК провёл технологические испытания хромитовой руды Сопчеозёрского месторождения с получением из неё FeCr различных марок и FeSiCr. Из 1727 т руды с 28,2 % Cr_2O_3 получен в/у-FeCr с 56 % Cr, а из 350 т концентрата с 38 – 41 % Cr_2O_3 (получен на опытной установке Горного института КНЦ РАН) – в/у-FeCr с 61 – 62 % Cr. Проведены плавки FeSiCr и н/у-FeCr с 61 % Cr. В 2005 – 2006 гг. ЦНИИчермет им. И.П. Бардина провёл испытания по выплавке н/у-FeCr в литейном цехе Оленегорского механического завода на печи ДСП-6 (6,5 МВА). Для этого на Ловозёрском ГОКе из руды Сопчеозёрского месторождения получен богатый концентрат (51 % Cr_2O_3), из которого выплавлен н/у-FeCr, в последующем использованный для получения нержавеющей стали [63].

В 2011 г. по заказу ОАО «Карелмет» сотрудниками ЦНИИчермет им. И.П. Бардина проведены исследования методов окускования концентрата Аганозёрских хромитовых руд с последующими испытаниями окускованного материала для выплавки хромитовых сплавов. Разработана технология производства в/у-FeCr и н/у-FeCr. Полученный в/у-FeCr содержал 54,9 % Cr и соответствовал марке FeCr50C70Si2LP, а н/у-FeCr – 56,0 % Cr и соответствовал марке FeCr60C1 [64].

Для Сопчеозёрского месторождения в 2008 г. ФГУП «Гипроцветмет» провёл расчёт ТЭО инвестиций, а в 2014 г. технический департамент ГО Норильский никель выполнил ТЭО организации производства. Для Аганозёрского месторождения в 2011 г. по заказу ОАО «Карелмет» компанией International Economic & Energy Consulting Limited проведены финансово-экономические расчёты. Выполненные расчёты подтвердили экономическую целесообразность освоения этих месторождений с получением феррохрома.

Ещё одним источником хрома могут стать забалансовые (некондиционные) руды в освоенных районах их добычи и переработки. Периодически такие руды перерабатывали на обогатительной фабрике Сарановской шахты «Рудная» и на СЗФ [28; 65; 66]. По данным работы [65], только на Среднем Урале (Алапаевский и Ключевский массивы) прогнозные ресурсы вкраплённых хромитовых руд превышают 100 млн т. На Урале

известны природные остаточные запасы и техногенные отложения обломочных склоновых валунчатых хромитовых руд [28; 66; 67].

Выводы

В мире производство хромитовых концентратов и феррохрома растёт. Отмечено существенное ухудшение качества потребляемого в мире хромитового сырья, из-за чего большая его часть не удовлетворяет требованиям, применяемым 10 – 15 лет назад. Это приводит к ухудшению технико-экономических показателей производства феррохрома. В РФ на 65 % потребности в хромитовом сырье удовлетворяли за счёт импортных поставок, в основном из Казахстана. С 2025 г. поставки полностью прекращены, а с учётом отработки существующих месторождений и планов на ближайшую перспективу увеличения объёма производства хромитового сырья внутри РФ ожидать не приходится. Большое значение имеет переработка некондиционного и техногенного сырья с получением хромитового концентрата. Для развития отечественной хромовой отрасли и ликвидации дефицита импортного сырья предложено использовать руды Аганозёрского и Сопчеозёрского месторождений. Ещё одним источником хрома могут стать забалансовые (некондиционные) руды в освоенных районах их добычи и переработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Preez S.P., Tristan P.M., Ringdalen E., Tangstad M., Morita K., Bessarabov D.G., Zyl P.G., Beukes J.P. An overview of currently applied ferrochrome production processes and their waste management practices. *Minerals*. 2023;13(6):809. <http://doi.org/10.3390/min13060809>
2. Pariser H.H., Backeberg N., Masson O.C.M., Bedder J.C.M. Changing nickel and chromium stainless steel markets – A review. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018;118(6):563–568. <http://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n6a1>
3. Letaba P., Zulu S.S. The development of a technology roadmap for ferrochrome producers. *South African Journal of Industrial Engineering*. 2021;32(2):100–109. <http://doi.org/10.7166/32-2-2495>
4. Karbowniczek M., Gładysz J., Ślęzak W. Current situation on the production market of FeMn and FeCr. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2012;55(2):870–875.
5. Леонтьев Л.И., Заякин О.В., Волков А.И. Проблемы развития металлургической отрасли для обеспечения технологического суверенитета России с учетом состояния минерально-сырьевой базы. *Вестник РАН*. 2023;93(7):631–645. <http://doi.org/10.31857/S086958732307006X>

Leont'ev L.I., Zayakin O.V., Volkov A.I. Overcoming problems in the development of the metallurgical industry to ensure the technological sovereignty of Russia considering the state of the mineral and raw material base. *Herald of the*

- Russian Academy of Sciences*. 2023;93(6):331–344.
<http://doi.org/10.1134/S1019331623040044>
6. Фомичева Е. Невыгодные сплавы. Тихвинский ферросплавный завод снова ушел в простой. *Новый проспект* от 05.02.2025 г. URL: <https://newprospect.ru/news/nevyigodnyie-splavyi.-tixvinskij-ferrosplavnij-zavod-snova-ushel-v-prostoj> (Дата обращения: 13.04.2026).
 7. «Все антикризисные меры использованы»: Заводы переходят на 4-дневку или останавливаются. *Рамблер / Личные финансы*. URL: <https://finance.rambler.ru/business/54930681-vse-antikrizisnye-mery-ispolzovany-zavody-perehodyat-na-4-dnevku-ili-ostanavlivayutsya/> (Дата обращения: 13.04.2026).
 8. Безгодков А. «Ключевский завод ферросплавов» остался без рынков сбыта из-за позиции одного из акционеров. Крупный производитель металлургического хрома вынужден сократить выпуск продукции. *Комсомольская правда*. URL: <https://www.ufa.kp.ru/daily/27663/5051244/> (Дата обращения: 13.04.2026).
 9. Новотроицкий завод химического сырья закроют из-за санкций и потери поставщиков. *Repost*. URL: https://repost.news/news/82000-novotroitckij_zavod_himicheskogo_syrjja_zakrojut_iz-za_sanktsij_i_poteri_postavshchikov (Дата обращения 07.04.2026).
 10. Liu M., Mao J., Zhang Z., Li L., Long T., Chao W. Current supply status, demand trends and security measures of chromium resources in China. *Green and Smart Mining Engineering*. 2024;1(1):53–57.
<http://doi.org/10.1016/j.gsme.2024.04.002>
 11. U.S. Geological Survey, 2025, Mineral Commodity Summaries 2025 (ver. 1.2, March 2025): U.S. Geological Survey; 2025:212. <http://doi.org/10.3133/mcs2025>
 12. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2023 году». Москва: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Роснедра; 2024:716.
 13. Idoine N.E., Raycraft E.R., Hobbs S.F., Everett P., Evans E.J., Mills A.J., Shaw I.R., Watkins I., Shaw R.A. World Mineral Production 2019–23. Nottingham, UK: British Geological Survey; 2025:97.
 14. Murthy Y.R., Tripathy S.K. Process optimization of a chrome ore gravity concentration plant for sustainable development. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2020;120(4):261–268.
<http://doi.org/10.17159/2411-9717/990/2020>
 15. Ross V., Ramonotsi M., Marape G. A study on the recovery of fine chromite from UG2 tailings. *Minerals Engineering*. 2022;187:107801.
<http://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107801>
 16. Akmaz R.M., Bilen M., Özarlan A. A review of chromite residues secondary raw material potential in Türkiye. *Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering*. 2025;6(1):476–490.
<http://doi.org/10.53501/rteufemud.1628583>
 17. Afenya P.M. Chromite deposits of Papua New Guinea – a future potential source of chrome. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*. 1986;19:303–314.
<http://doi.org/10.7186/bgsm19198623>
 18. Лякишев Н.П., Гасик М.И. Металлургия хрома. Москва: Элиз; 1999:582.
 19. Гасик М.И., Лякишев Н.П., Емлин Б.И. Теория и технология производства ферросплавов: учебник для вузов. Москва: Металлургия; 1988:784.
 20. Maulik S.C., Bhattacharyya K.K. Beneficiation of low grade chromite ores from Sukinda. In: *International Seminar on Mineral Processing Technology – (MPT-2005), January 6-8, 2005, Dhanbad*. Available at URL: <http://eprints.nmlindia.org/6136>
 21. Elsner H. Assessment Manual – Heavy Minerals of Economic Importance (ilmenite and leucocoxene, rutile, zircon, monazite and xenotime, kyanite, silimanite and andalauisite, straurolite, garnet, chromite, magnetite, cassiterite, columbite-tantalite, wolframite and scheelite). Hannover: British Geological Survey; 2010:218.
 22. Mosier D.L., Singer D.A., Moring B.C., Galloway J.P. Podiform Chromite Deposits – Database and Grade and Tonnage Models (Scientific Investigations Report 2012–5157). Reston, Virginia: U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey; 2012:45. URL: <http://pubs.usgs.gov/sir/2012/5157/>
 23. Крөггерус Х., Ойкаринен П. Технология производства феррохрома фирмы Outokumpu: экономическая эффективность и высокая производительность. *Чёрные металлы*. 2003;(12):19–31.
Krogerus X., Oikarinen P. Outokumpu ferrochrome production technology: economic efficiency and high productivity. *Chernye metally*. 2003;(12):19–31. (In Russ.).
 24. Das A.K., Khaoash S., Das S.P., Moharatra B.K., Dash N., Singh S.K., Mishra P., Mohanty J. Processing of low-grade chromite ore for ferroalloy production: a case study from Ghutrigaon, Odisha, India. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2020;73(9):2309–2320.
<http://doi.org/10.1007/s12666-020-02032-5>
 25. Kanari N., Allain E., Fiippov L., Shallari S., Diot F., Patisson F. Reactivity of low-grade chromite concentrates towards chlorinating atmospheres. *Materials*. 2020;13(20):4470.
<http://doi.org/10.3390/ma13204470>
 26. Cramer L., Basson J., Nelson N.R. The impact of platinum production from UG2 ore on ferrochrome production in South Africa. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2004;104(9):517–527.
 27. Ul'tarukova A., Tastanov Y., Sadykov N., Tastanova A., Tastanova Z. Physical and chemical studies of smelting products of calcinated composite pellets produced from chromium production waste. *Journal of Composites Science*. 2023;7(9):386. <http://doi.org/10.3390/jcs7090386>
 28. Абакумов И.В. Опыт переоценки остаточных запасов россыпей валунчатых хромовых руд Сарановского рудного поля. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2020;(2(58)):74–82.
<http://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-2-74-82>
Abakumov I.V. Revaluation of alluvial deposits residual reserves of boulder chrome ores of the Saranovsky ore field. *News of the Ural State Mining University*. 2020;(2(58)):74–82. (In Russ.).
<http://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-2-74-82>
 29. Пузик А.Ю. Перспективы использования хвостов обогащения хромитовых руд Сарановского месторождения как источника хрома и платинидов. *Горное эхо*. 2020;(4):3–9.
<http://doi.org/10.7242/echo.2019.4.1>
Puzik A.Yu. Prospects of using tailings of chromite ores from the Saranovskoye deposit as a source of chromium and plati-

- nides. *Gornoe ekho*. 2020;(4):3–9. (In Russ.).
<http://doi.org/10.7242/echo.2019.4.1>
30. Островский С.В., Старостин А.Г., Басов В.Н., Миков А.Г., Циппер А.А. Исследование процесса выщелачивания хрома из шламов хроматного производства с целью их утилизации и обезвреживания. *Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология*. 2016;(3):75–92.
 Ostrovskii S.V., Starostin A.G., Basov V.N., Mikov A.G., Tsipper A.A. Investigation of the chromium chromate sludge leaching from slurry chromate production of production in order to their utilization and decontamination. *Vestnik PNIPIU. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya*. 2016;(3):75–92. (In Russ.).
 31. Новосельская М.А., Серёгин А.Н., Шкурко Е.Ф. Разработка технологии переработки высокотоксичных хроматных шламов и шламов химических производств. *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2015;(2):31–38.
 Novoselskaya M.A., Seregin A.N., Shkurko E.F. Development of technology for processing of highly-toxic chromate slime and slime of chemical production. *Problems of ferrous metallurgy and materials science*. 2015;(2):31–38. (In Russ.).
 32. Абдибеков Е.К. Развитие шлакопереработки на Серовском заводе ферросплавов. *Сталь*. 2008;(4):41–42.
 Abdibekov E.K. Progress of slag recycling practice at Serovsky ferroalloys plant. *Stal'*. 2008;(4):41–42. (In Russ.).
 33. Бондаренко И.В., Тастанов Е.А., Садыков Н.М.-К., Исмагулова М.Ш. Переработка минеральной части шлаков рафинированного феррохрома с получением гранулированного пористого теплоизоляционного материала. *Комплексное использование минерального сырья*. 2018;(4):158–165. <http://doi.org/10.31643/2018/6445.42>
 Bondarenko I.V., Tastanov E.A., Sadykov N.M.-K., Ismagulova M.Sh. Processing of mineral part of refined ferrochrome slags to obtain pelleted porous heat insulator. *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya*. 2018;(4):158–165. (In Russ.). <http://doi.org/10.31643/2018/6445.42>
 34. Acharya P.K., Patro S.K. Utilization of ferrochrome wastes such as ferrochrome ash and ferrochrome slag in concrete manufacturing. *Waste Management & Research*. 2016;34(8): 764–774. <http://doi.org/10.1177/0734242X16654751>
 35. Zhou X., Hao X., Ma Q., Luo Z., Zhang M., Peng J. Effects of compound chemical activators on the hydration of low-carbon ferrochrome slag-based composite cement. *Journal of Environmental Management*. 2017;191:58–65.
<http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.048>
 36. Karakoç M.B., Türkmen I., Maras M.M., Kantarci F. Mechanical properties and setting time of ferrochrome slag based geopolymer paste and mortar. *Construction and Building Materials*. 2014;72(3):283–292.
<http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.021>
 37. Панфилов М.И., Школьник Я.Ш., Орининский Н.В., Коломиец В.А., Сорокин Ю.В., Грабеллис А.А. Переработка шлаков и безотходная технология в металлургии. Москва: Металлургия; 1987;238.
 38. Dash M.K., Patro S.K., Rath A.K. Sustainable use of industrial-waste as partial replacement of fine aggregate for preparation of concrete – A review. *International Journal of Sustainable Built Environment*. 2016;5(2):484–516.
<https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2016.04.006>
 39. Prusty J.K., Patro S.K., Mohanty T. Structural behaviour of reinforced concrete beams made with ferrochrome slag as coarse aggregate. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2018;22(2):696–707.
<http://doi.org/10.1007/s12205-017-1294-2>
 40. Hao X., Zhou X., Luo Z., Tao Z. Effects of compound admixtures on the properties of ferrochrome slag based composite materials. *Gongneng Cailiao*. 2015;46(13):13029–13034.
<http://doi.org/10.3969/j.issn.1001-9731.2015.13.006>
 41. Das S.K., Tripathi A.K., Kandi S.K., Mustakim S.M., Bhoi B., Rajput P. Ferrochrome slag: A critical review of its properties, environmental issues and sustainable utilization. *Journal of Environmental Management*. 2023;326(A):116674.
<http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116674>
 42. Jena S., Panigrahi R. Performance assessment of geopolymer concrete with partial replacement of ferrochrome slag as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*. 2019;220:525–537.
<http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.045>
 43. Elilib C., Sengul O. Effects of activator properties and ferrochrome slag aggregates on the properties of alkali-activated blast furnace slag mortars. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2016;41(4):1561–1571.
<http://doi.org/10.1007/s13369-015-1910-8>
 44. Kumar P.H., Srivastava A., Kumar V., Singh V.K. Implementation of industrial waste ferrochrome slag in conventional and low cement castables: Effect of calcined alumina. *Journal of Asian Ceramic Societies*. 2014;2(4):371–379.
<http://doi.org/10.1016/j.jascer.2014.08.001>
 45. Nyangadzayi T., Ntuli F. Optimization of chromium precipitation from ferrochrome leach solutions. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2024;124(12):725–730.
<http://doi.org/10.17159/2411-9717/702/2024>
 46. Omran M., Fabritius T. Effect of steelmaking dust characteristics on suitable recycling process determining: Ferrochrome converter (CRC) and electric arc furnace (EAF) dusts. *Powder Technology*. 2017;308:47–60.
<http://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.11.049>
 47. Makkonen H.T., Kekki A., Heikkinen E.-P., Aromaa J., Forsén O. Characterization and sulfuric acid leaching of ferrochrome converter (CRC) dust. *Steel Research International*. 2016;87(10):1247–1255.
<http://doi.org/10.1002/srin.201500348>
 48. Токовой О.К., Хяккинен В.И., Зорин А.И., Обрезков В.В. Изготовление, исследование и применение брикетированных ферросплавов для раскисления стали. *Металлург*. 2015;(1):56–59.
 Tokovoi O.K., Khyakkinen V.I., Zorin A.I., Obrezkov V.V. Manufacture, study, and use of briquetted ferroalloys for steel deoxidation. *Metallurgist*. 2015;59(1–2):44–48.
<http://doi.org/10.1007/s11015-015-0058-9>
 49. Sariyev O., Abdirashit A., Almagambetov M., Nurgali N., Kelamanov B., Yessengaliyev D., Mukhambetkaliev A. Assessment of physicochemical properties of dust from crushing high-carbon ferrochrome: methods for agglomeration. *Materials*. 2025;18(4):903.
<http://doi.org/10.3390/ma18040903>
 50. Кочкин В.Д., Алиферов А.И., Золотарев В.В. Методы и установки утилизации мелкодисперсных отсевов фер-

- росплавов. *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2023;31(1):91–102. <http://doi.org/10.14498/tech.2023.1.7>
- Kochkin V.D., Aliferov A.I., Zolotarev V.V. Methods and installations for utilization of fine screenings of ferroalloys. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2023;31(1):91–102. (In Russ.). <http://doi.org/10.14498/tech.2023.1.7>
51. Манашев И.Р., Гаврилова Т.О., Шатохин И.М., Зиядинов М.Х., Леонтьев Л.И. Утилизация дисперсных отходов ферросплавного производства на базе металлургического СВС-процесса. *Известия вузов. Чёрная металлургия*. 2020;63(8):591–599. <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-8-591-599>
- Manashev I.R., Gavrilova T.O., Shatokhin I.M., Ziatdinov M.Kh., Leont'ev L.I. Utilization of dispersed waste of ferroalloy production on the basis of metallurgical SHS-process. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020;63(8):591–599. (In Russ.). <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-8-591-599>
52. Манашев И.Р., Гаврилова Т.О. Опыт переработки мелкодисперсных ферросплавов в режиме горения на примере СВ-синтеза азотированного феррохрома. *Чёрные металлы*. 2023;(4):16–22. <http://doi.org/10.17580/chm.2023.04.03>
- Manashev I.R., Gavrilova T.O. Experience in the processing of finely dispersed ferroalloys in the combustion mode on the example of SH synthesis of nitrated ferrochrome. *Chernyye metally*. 2023;(4):16–22. (In Russ.). <http://doi.org/10.17580/chm.2023.04.03>
53. Shevko V, Badikova A., Tuleyev M. Obtaining of ferrochrome silicon from carbon ferrochrome dusts. *IP Conference Proceedings*. 2022;2650(1):020009. <http://doi.org/10.1063/5.0105271>
54. Shevko V., Afimin Y., Karataeva G., Badikova A., Ibrayev T. Theory and technology of manufacturing a ferroalloy from carbon ferrochrome dusts. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2021;27(1):23–37. <http://doi.org/10.36547/ams.27.1.745>
55. Байсанов С.О., Шабанов Е.Ж., Байсанов А.С. Вовлечение в металлургический передел отходов угольной и ферросплавной промышленности с получением лигатуры с хромом. *Труды Карагандинского технического университета им. Абылкаса Сагинова*. 2017;(4):24–26.
- Baisanov S.O., Shabanov E.Zh., Baisanov A.S. Involvement of coal and ferroalloy industry waste in metallurgical conversion to obtain chromium ligature. *Trudy Karagandinskogo tekhnicheskogo universiteta im. Abylkasa Saginova*. 2017;(4):24–26. (In Russ.).
56. Калиакпаров А.Г., Суслов А.В., Билялов К.С., Куландин М.П. Утилизация отходов ферросплавного производства. *Экология и промышленность России*. 2015;19(2):4–7.
- Kaliakparov A.G., Suslov A.V., Bilyalov K.S., Kulandin M.P. Disposal of ferroalloy production waste. *Ehkologiya i promyshlennost' Rossii*. 2015;19(2):4–7. (In Russ.).
57. Избембетов Д.Д., Амангельдиев Н.М., Зупаров Н.С. Разработка технологии производства огнеупорных изделий из рукавной пыли и шлаков высокоуглеродистого феррохрома. *Теория и технология металлургического производства*. 2015;(2):56–60.
- Izbembetov D.D., Amangel'diev N.M., Zuparov N.S. Development of technology for production of refractory products from the hose fume and high-carbon ferrochrome slags. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2015;(2):56–60. (In Russ.).
58. Volkov A.I., Stulov P.E., Charkin A.F., Panfilov V.P., Nurgali N.Z., Krasnyanskaya I.A., Kospanov M.M., Masgutov I.I., Pozharov S.V. Preliminary study of the technology of vacuum-thermal production of low-carbon ferrochrome. *Metallurgist*. 2024;68(2):291–302. <http://doi.org/10.1007/s11015-024-01729-y>
59. Volkov A.I., Stulov P.E., Panfilov V.P., Nurgali N.Z., Krasnyanskaya I.A., Zinoveev D.V. Vacuum-thermal production technology of low-carbon ferrochrome. *Metallurgist*. 2025; 69(5):772–785. <http://doi.org/10.1007/s11015-025-01997-2>
60. Турция перехватывает казахстанский хром с российского рынка. *Altyn-orda*. URL: <https://altyn-orda.kz/turtsiya-perehvatyvaet-kazahstanskij-hrom-s-rossijskogo-rynka/> (Дата обращения: 15.01.2026).
61. Бажин Е.А. Хромитоносность зоны сочленения Южного и Среднего Урала. В кн.: *Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий: Материалы III Всероссийской молодежной геологической конференции, г. Уфа, сентябрь 2015 г.* 2015:162–165.
62. Гальперин Л.Л., Заякин О.В., Жучков В.И., Островский Я.И., Кириченко Н.Ф. Выплавка высокоуглеродистого феррохрома из бедных хромитовых руд. *Электromеталлургия*. 2004;(7):23–28.
- Gal'perin L.L., Zayakin O.V., Zhuchkov V.I., Ostrovskii Ya.I., Kirichenko N.F. Smelting of high-carbon ferrochrome from poor chromite ores. *Elektrometallurgiya*. 2004;(7):23–28. (In Russ.).
63. Кологриев К.А., Серёгин А.Н., Волков А.И., Кологриева У.А. Промышленное опробование технологии выплавки феррохрома рафинированных марок из некондиционных хромовых руд. *Металлург*. 2025;(4):17–20. http://doi.org/10.52351/00260827_2025_4_17
- Kologriev K.A., Seregin A.N., Volkov A.I., Kologrieva U.A. Industrial trials for production of high-quality ferrochrome from substandard chrome ores. *Metallurgist*. 2025;69(4): 467–472. <http://doi.org/10.1007/s11015-025-01962-z>
64. Кологриев К.А., Серегин А.Н. Разработка технологии выплавки феррохрома из хромитовых руд Аганозерского месторождения. *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2016;(4):41–47.
- Kologriev K.A., Seregin A.N. Development of technology for smelting of ferrochrome from chromite ores of the Aganozersky deposit. *Problems of ferrous metallurgy and materials science*. 2016;(4):41–47. (In Russ.).
65. Малахов И.А., Бурмако П.Л., Алексеев А.В. Вкрапленные хромитовые руды – надёжный источник сырья для уральской промышленности в будущем. *Известия Уральского горного университета*. 2004;(19):76–86.
- Malakhov I.A., Burmako P.L., Alekseev A.V. Interspersed chromite ores as a reliable source of raw materials for the Ural industry in future. *Izvestiya Ural'skogo gornogo universiteta*. 2004;(19):76–86. (In Russ.).
66. Saveliev D.E. Chromitites of the Kraka ophiolite (South Urals, Russia): geological, mineralogical and structural features. *Mineralium Deposita*. 2021;56:1111–1132. <http://doi.org/10.1007/s00126-021-01044-5>

67. Rakhimov I.R., Saveliev D.E., Samigullin A.A., Rassomakhin M.A. Chromian spinels from Kazanian-stage placers in the Southern pre-Urals, Bashkiria, Russia: morphological

and chemical features and evidence for provenance. *Minerals*. 2022;12(7):849.

<http://doi.org/10.3390/min12070849>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Антон Иванович Волков, к.х.н., директор Научного центра комплексной переработки сырья им. Н.П. Лякишева, Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина

ORCID: 0000-0003-1777-3889

E-mail: rhenium@list.ru

Константин Александрович Кологривев, соискатель степени к.т.н., Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина

ORCID: 0009-0006-5807-8355

E-mail: k_kologriev@mail.ru

Николай Анатольевич Козырев, д.т.н., профессор, директор Научного центра металлургических технологий, Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина

ORCID: 0000-0002-7391-6816

E-mail: n.kozyrev@chermet.net

Ирина Алексеевна Краснянская, к.т.н., заведующая лабораторией, Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина

ORCID: 0000-0002-4761-7847

E-mail: iakrsn@gmail.com

Anton I. Volkov, Cand. Sci. (Chem.), Director of N.P. Lyakishev Scientific Center of Complex Processing of Raw Materials, I.P. Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy

ORCID: 0000-0003-1777-3889

E-mail: rhenium@list.ru

Konstantin A. Kologriev, Candidates for a degree of Cand. Sci. (Eng.), I.P. Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy

ORCID: 0009-0006-5807-8355

E-mail: k_kologriev@mail.ru

Nikolai A. Kozyrev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Scientific Center of Metallurgical Technologies, I.P. Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy

ORCID: 0000-0002-7391-6816

E-mail: n.kozyrev@chermet.net

Irina A. Krasnyanskaya, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory, I.P. Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy

ORCID: 0000-0002-4761-7847

E-mail: iakrsn@gmail.com

Вклад авторов

Contribution of the Authors

А. И. Волков – постановка задачи, поиск и анализ литературных данных, написание статьи.

К. А. Кологривев – описание результатов работ по Аганозёрскому и Сопчеозёрскому месторождениям.

Н. А. Козырев – предоставление данных по отечественным предприятиям, редактирование статьи.

И. А. Краснянская – поиск и анализ литературных данных по переработке шлама от выплавки феррохрома.

A. I. Volkov – problem statement, search and analysis of literary data, writing the text.

K. A. Kologriev – description of the results of work on the Aganozerskoe and Sopcheozerskoe deposits.

N. A. Kozyrev – provision of data on domestic enterprises, editing the text.

I. A. Krasnyanskaya – search and analysis of literary data on slag processing from ferrochrome smelting.

Поступила в редакцию 31.10.2025

После доработки 23.01.2026

Принята к публикации 03.04.2026

Received 31.10.2025

Revised 23.01.2026

Accepted 03.04.2026



УДК 669:01

DOI 10.17073/0368-0797-2026-3-231-241



Оригинальная статья

Original article

Вклад Кузнецкого металлургического комбината в создание оборонного комплекса СССР в 1941 – 1945 гг.: АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ И МОДЕРНИЗАЦИИ

Л. А. Тресвятский¹, Е. В. Протопопов¹✉, А. Н. Худолеев², В. Е. Хомичева¹

¹ Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² Кузбасский гуманитарно-педагогический институт Кемеровского государственного университета (Россия, 654007, Кемеровская область – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Циолковского, 23)

✉ protopopov_ev@sibsiu.ru

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы, связанные с процессом постоянной ускоренной модернизации «Кузнецкого металлургического комбината» в период Великой Отечественной войны. Авторы определили этапы и способы трансформации производства от выпуска металла для гражданской промышленности к массовому производству броневых металлов. Эвакуация оборудования промышленных предприятий с юго-востока страны на юг Западной Сибири представлена в качестве целенаправленного процесса по сохранению и развитию оборонного производства в труднейших условиях первого военного года. Ввод новых эвакуированных мощностей показан в качестве сложного процесса адаптации по повышению качества и объема производства. На основании анализа научной литературы и периодической печати авторы рассмотрели меры по постоянному улучшению качества стали, изделий военного назначения, сокращения сроков выпуска продукции. Уточняются особенности освоения новых технологий производства, вклада в развитие оборонной мощи страны отдельных подразделений КМК: рельсобалочного, доменного, коксохимического, инструментального, среднесортного и других цехов. Определены и рассмотрены проблемы роста производительности перед переломом в Великой Отечественной войне в 1942 г., когда ресурсная база предприятия нуждалась в существенной коррекции. Уделено внимание решению кадрового вопроса в условиях дефицита высококвалифицированных кадров благодаря увеличению удельного веса женщин и молодежи на предприятии. Авторы отметили вклад ученых-производственников, инженеров в решение сложных технических задач. Развитие Кузнецкого металлургического комбината имени Сталина рассматривается через призму вклада всей страны, народов Советского Союза в общее дело победы над фашистской Германией и милитаристской Японией, особой роли патриотического воспитания трудящихся.

Ключевые слова: черная металлургия, оборонная промышленность, броневая сталь, Кузнецкий металлургический комбинат, Великая Отечественная война

Для цитирования: Тресвятский Л.А., Протопопов Е.В., Худолеев А.Н., Хомичева В.Е. Вклад Кузнецкого металлургического комбината в создание оборонного комплекса СССР в 1941 – 1945 гг.: анализ развития и модернизации. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2026;69(3):231–241. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-231-241>

CONTRIBUTION OF THE KUZNETSK METALLURGICAL PLANT TO THE USSR DEFENSE COMPLEX IN 1941 – 1945: ANALYSIS OF DEVELOPMENT AND MODERNIZATION

L. A. Tresvyatskii¹, E. V. Protopopov¹✉, A. N. Khudoleev², V. E. Khomicheva¹

¹ Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 65404307, Russian Federation)

² Kuzbass Humanitarian and Pedagogical Institute of the Kemerovo State University (23 Tsiolkovskogo Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

✉ protopopov_ev@sibsiu.ru

Abstract. The article discusses the issues related to the process of continuous accelerated modernization of the Kuznetsk Metallurgical Plant (KMK) during the Great Patriotic War. The stages and methods of production transformation from obtaining metal for the civilian industry to the mass production of armored metal are described. The evacuation of industrial enterprises' equipment from the south-east of the country to the south of Western Siberia was a purposeful process for the preservation and development of defense production in the most difficult conditions of the

first military year. The commissioning of new evacuated facilities is shown as a complex process of adaptation to improve the quality and volume of production. Based on the analysis of scientific literature and periodicals, the paper describes the measures to continuously improve the quality of steel and military products, and reduce production time. The authors clarified the specifics of new production technologies and the contribution of individual KMK shops to the development of the country's defense complex: rail-beam, blast furnace, by-product coke, tool, medium-section and others. The paper describes the problems of productivity growth before the turning point in the Great Patriotic War in 1942, when the resource base of the enterprise needed significant correction. Attention is paid to solving the personnel issue in conditions of a shortage of highly qualified personnel due to an increase in the proportion of women and youth at the enterprise. The authors noted the contribution of production scientists and engineers in solving complex technical problems. The development of the Stalin Kuznetsk Metallurgical Plant is viewed through the prism of the contribution of the whole country and the people of the USSR to the common cause of victory over Nazi Germany and militaristic Japan, and the special role of patriotic education of workers.

Keywords: ferrous metallurgy, defense industry, special steel, Kuznetsk Metallurgical Plant, Great Patriotic War

For citation: Tresvyatskii L.A., Protopopov E.V., Khudoleev A.N., Khomicheva V.E. Contribution of the Kuznetsk Metallurgical Plant to the USSR defense complex in 1941 – 1945: Analysis of development and modernization. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2026;69(3):231–241.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-231-241>

ВВЕДЕНИЕ

14 октября 2025 г. в городе Новокузнецк (Кузбасс) был торжественно открыт памятник прославленному российскому полковнику XIX в. М.И. Кутузову. Открытие стало частью всероссийского историко-патриотического форума «Михаил Кутузов – история великих побед», на котором присутствовал помощник президента Владимир Ростиславович Мединский. Одной из причин открытия памятника стало историческое награждение военным орденом Кутузова первой степени (рис. 1) Кузнецкого металлургического комбината в марте 1945 г. за заслуги в Великой Отечественной войне и разгроме Японии [1]. Это одна из трех высших военных наград КМК [2]. В сентябре 1945 г. указом Президиума Верховного Совета СССР за успешное выполнение заданий государственного комитета обороны (ГКО) по обеспечению военной промышленности высококачественным металлом Кузнецкий комбинат был награжден Орденом Трудового Красного знамени. В период войны в апреле 1943 г. за образцовое выпол-

нение заданий ГКО по обеспечению военной промышленности комбинат награжден орденом Ленина [3]. Заслуженные награды ярко отражают трудовой подвиг металлургов-сибиряков, всего советского народа в период Великой Отечественной войны [4].

ИЗУЧЕНИЕ ВОПРОСА

Первый этап противостояния СССР нашествию европейского нацизма оказался трагическим и чрезвычайно трудным. В 1941 г. Рабоче-крестьянская Красная армия (РККА) вынуждена была отступать и оставить в оккупации значительные территории страны. Особую важность приобрели проблемы реализации плана эвакуации важнейших промышленных предприятий на Восток, вопросы реконструкции и перевода металлургической промышленности на военные рельсы. В августе 1941 г. Народный комиссариат черной металлургии определил, что ряд ключевых заводов (таких как ферросплавный, «Днепрспецсталь» и другие, расположенные на Украине, на юго-западе страны) должны быть эвакуированы и направлены в Сталинск. Такое решение было принято в связи с необходимостью сохранить производственные мощности. Для успешного запуска оборудования этих заводов в новых условиях было решено использовать площадку и ресурсы КМК в городе Сталинск (Новокузнецк) Новосибирской области. Сентябрь и октябрь 1941 г. стали периодом ускоренной эвакуации промышленных предприятий, расположенных в Донбассе. Так, только с завода «Днепрспецсталь» имени Карла Либкнехта было отправлено до 2000 вагонов с оборудованием. Удалось эвакуировать основные производственные цехи Дебальцевского машиностроительного, Славянского и Серговского литейно-механических заводов, а также часть оборудования Мариупольского и Новомакеевского коксохимических заводов. Всего в период с августа по октябрь 1941 г. на железнодорожную станцию г. Сталинск было отправлено более 4000 вагонов с эвакуированным оборудованием. Реализация такого объема эвакуации заводов с юга России сопровождалась необходимостью организации работ по подготовке и размещению их на новых местах.

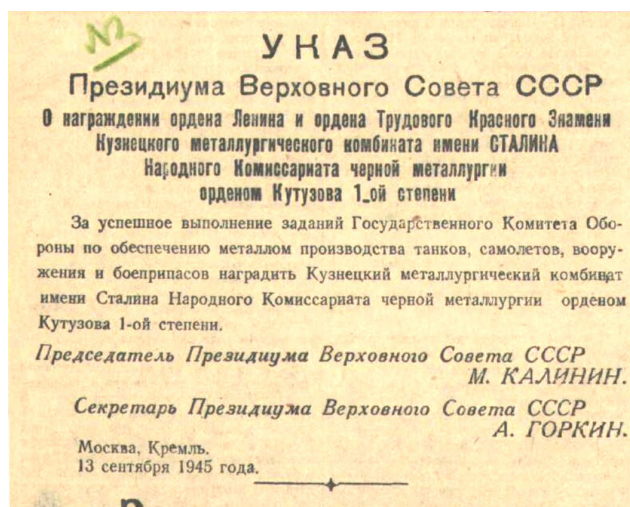


Рис. 1. Указ Президиума Верховного совета СССР о награждении КМК орденом Кутузова 1 степени, 1945 г.

Fig. 1. Decree of the Presidium of the USSR Supreme Soviet on awarding the KMK with the Kutuzov Order of the 1st degree, 1945

В середине августа 1941 г. в связи с эвакуацией металлургических предприятий Украины Народный комиссариат черной металлургии обязал руководство заводов, на которые должно было поступить эвакуированное оборудование, разработать мероприятия по его размещению и монтажу. Дирекции КМК был установлен десятидневный срок для выполнения этой задачи, однако в условиях ограниченности промышленной площадки решение этих вопросов стало настоящей многоплановой проблемой в условиях практического отсутствия проектной документации. В поисках информации работники технического отдела КМК широко использовали ранее опубликованные издания [5], где содержались приблизительные данные о размерах цехов «Днепроспецстали» и других предприятий, что позволило инженерам комбината начать проработку и обсуждение различных вариантов размещения эвакуированного оборудования. В сентябре 1941 г. директор КМК Р.В. Белан направил в Наркомат примерный план размещения оборудования эвакуируемых заводов. Правительственные органы предоставляли чрезвычайно сжатые сроки по монтажу и восстановлению эвакуированных предприятий, которые должны были быть размещены и начать выпускать продукцию. Работа по эвакуации и восстановлению производственных мощностей была чрезвычайно сложной. Она требовала не только технических знаний, но и высокой эффективной организации, необходимости учитывать множество производственных факторов: от грамотной транспортировки оборудования до его установки и наладки на пусковых площадках. В условиях войны и нехватки трудовых и материальных ресурсов это становилось настоящим испытанием для всех участников процесса.

В конце 1941 г. – начале 1942 г. на базе оборудования, эвакуированного с заводов Славянска, Дебальцево и других предприятий Украины, были построены

и введены в эксплуатацию на промышленной площадке КМК пять механических цехов. Одновременно с этим начались работы по вводу сталеплавильного и прокатного цехов завода «Днепроспецсталь», а также велось строительство 5-й коксовой батареи. Поступающее на завод оборудование разгружалось на складах достаточно быстро, что было крайне важно в условиях предзимнего времени. Работникам комбината необходимо было оперативно оценить состояние поступивших грузов, уточнить, где и какое оборудование находится, и, по возможности, скомпоновать его. В декабре 1941 г. начались работы по подготовке котлованов под фундамент сталеплавильных агрегатов. Для выполнения данных работ были сформированы бригады из эвакуированных специалистов, которые трудились в тесном сотрудничестве со строителями. В этих бригадах работали такие инженеры, как М.Г. Чудаевич, М.И. Рывкин, М.А. Лютковский и другие. Объем земляных работ для монтажа поступающего оборудования составил порядка 1,3 млн м³, бетонных работ – 120 тыс. м³, было смонтировано более 50 тыс. т металлоконструкций.

В ноябре 1941 г. ГКО принял специальное постановление, которое касалось восстановления производства на предприятиях черной металлургии, эвакуированных на Урал и в Сибирь¹, а вскоре был утвержден график ввода новых мощностей, что стало важным шагом в развитии оборонной промышленности. На КМК планировалось ввести в эксплуатацию электросталеплавильный цех на основе эвакуированного оборудования «Днепроспецстали» уже в первом квартале 1942 г. Основное количество рабочих составили новички, пришедшие на строительство в первые месяцы войны. Это были выпускники школ ФЗО и мобилизованные из числа тех, кто не подлежал призыву на военную службу. Перед трудящимися стояла задача: быстро обучить и обеспечить работу цехов на высоком технологическом уровне, что до начала войны казалось практически невозможным. Для решения этой задачи привлекались лучшие строители легендарного Кузнецкстроя [6], которые обладали большим опытом и соответствующими знаниями.

Значительная доля эвакуированного оборудования требовала серьезного ремонта и доработки, необходимо было заново изготавливать недостающие узлы и детали. В решении этой сложной задачи принимали участие коллективы различных цехов завода, включая ремонтно-механические, электроремонтный, котельный и другие вспомогательные подразделения. Особенно самоотверженно трудился коллектив электромонтажного цеха, который стал ключевым в процессе восстановления. В этом цехе была сформирована специальная бригада,



Рис. 2. Стахановец военного времени Д.П. Беликов, 1942 г.

Fig. 2. Overachiever of the wartime D.P. Belikov, 1942

¹ Постановление ГКО СССР № 878 от 10 ноября 1941 «О восстановлении производства предприятий черной металлургии, эвакуированных на Урал и в Сибирь, и о наращивании мощностей за счет ввода в действие новых агрегатов в ноябре и декабре 1941 года и в январе 1942 года». URL: <https://www.prlib.ru/item/1339785> (дата обращения 16.09.2025).

которая позднее вошла в состав электромонтажного участка. Электрооборудование доставляли в вальце-токарное отделение стана 500, где его монтировали и непосредственно на месте изготавливали недостающие элементы. Были полностью оборудованы вновь созданные механические и электросталеплавильные цеха. Для этого потребовалось создать поточные линии, состоящие из десятков и сотен различных станков, подвести к ним электропитание, а также оснастить и установить мостовые электрокраны. Работа велась в условиях жесткого дефицита времени и ресурсов. Люди трудились не покладая рук, порой не покидая объекты на протяжении нескольких суток подряд. Важнейшую роль в этом процессе играл электромонтажный участок, который возглавляли прославленные мастера: Т.М. Густайтис, Н.Г. Кирилин, М.Л. Хвоин, И.С. Гугель, В.Я. Терехин. Их опыт и профессионализм способствовали успешному выполнению поставленных задач. Коллективы ремонтно-механических цехов трудились с огромным напряжением и самоотдачей. В помощь им были сформированы специальные бригады из инженерно-технических специалистов, которые работали в дальнейшем при эксплуатации электросталеплавильного цеха. Несмотря на все усилия, уложиться в сроки, установленные ГКО для пуска цеха в первом квартале 1942 г., оказалось невозможно. В результате срок пуска первой электропечи на КМК был перенесен на апрель 1942 г.

На основе эвакуированных заводов из Славянска и Дебальцево [7] был создан новый цех, который занимался производством оборудования для коксохимических предприятий Урала и Сибири. Руководил пусконаладочными работами Л.М. Нихинсон, ранее работавший на Славянском заводе. Уже к началу 1942 г. механический цех № 4 приступил к выпуску продукции. В этом цехе было изготовлено оборудование не только для пятой коксовой батареи, которая строилась на комбинате, но и для коксохимических заводов в Губахе и Кемерово.

В начале 1942 г. на комбинате возник острый дефицит ферросилиция, что потребовало переоборудования первой электропечи для его производства в процессе монтажа. Уже 5 мая 1942 г. электропечь была запущена в эксплуатацию, а в июле того же года начала работать и вторая электропечь. Во втором полугодии 1941 г. на комбинате было произведено уже около 300 тыс. т специального металла. Перевод на новый сортament сопровождался разработкой принципиально новой технологии, которая позволила значительно улучшить качество и характеристики производимого металла. В результате завод смог нарастить производственные мощности и выйти на новые уровни производства [8].

Перед началом войны в рельсобалочном цехе выпускались железнодорожные рельсы, балки и крупнопрофильные швеллеры. В июне 1941 г. объем заказов на такую продукцию значительно сократился. В связи с этим возникла необходимость объединения произ-

водственных программ рельсобалочного и среднесортного цехов для выполнения растущих объемов заказов для военной промышленности. С июля по сентябрь 1941 г. под руководством главного инженера комбината Л.Э. Вайсберга и начальника цеха А.Г. Мони́на при активном участии всего рабочего коллектива было осуществлено переоборудование прокатных станов. В результате этих усилий уже к концу 1941 г. цех начал выпуск новых профилей проката. 24 ноября 1941 г. Президиум Верховного совета СССР наградил группу работников КМК орденами и медалями за образцовое выполнение правительственного задания по обеспечению производства металла для танков: главный инженер комбината Л.Э. Вайсберг и мастер мартеновского цеха № 2 А.Н. Томилин были награждены орденами Трудового Красного Знамени; начальник мартеновского цеха № 2 Г.В. Гурский и начальник блюминга В.Д. Смирнов награждены орденами Красной Звезды; начальник листового прокатного цеха С.И. Павловский и мастер мартеновского цеха № 1 П.Д. Никитин были награждены орденом Знак Почета; медали «За трудовую доблесть» были вручены сталевару И.С. Ушакову, вальцовщику листопрокатного цеха И.П. Максимова и другим работникам.

В условиях войны, когда происходила коренная перестройка структуры производства на комбинате, наблюдались значительные изменения в кадровом составе. В период 1941 – 1942 гг. с КМК ушли на фронт более 5000 работников. На начало 1942 г. доля женщин в цехах увеличилась до 32 %, что является заметным ростом по сравнению с 25 % в июне 1941 г. Женщины активно заменяли мужчин, ушедших на фронт, при этом условия труда и быта рабочих значительно ухудшились, работники сталкивались с недостатком питания, увеличением рабочего времени. Однако каждый понимал важность своего вклада в общее дело.



Рис. 3. Начальник доменного цеха КМК А.Ф. Борисов, 1940 г.

Fig. 3. Head of the KMK blast furnace shop A.F. Borisov, 1940



Рис. 4. Горновые доменной печи № 4, 1944 г.

Fig. 4. Tappers of blast furnace No. 4, 1944

К концу 1941 г. выплавка чугуна в отрасли сократилась более чем в четыре раза по сравнению с довоенным периодом, а производство стали и проката уменьшилось в три раза, поэтому доменщики КМК были вынуждены осваивать производство чугуна из местных железных и марганцевых руд [9], что оказывало серьезное влияние на выполнение военных заказов.

Военно-хозяйственным планом на 1942 г. уже было предусмотрено увеличение выплавки чугуна до 5 млн т, стали до 9 млн т, а производства проката до 6 млн т. В феврале 1942 г. ГКО принял постановление «О мерах неотложной помощи черной металлургии»², что подчеркивало важность поставленных перед отраслью задач. В 1942 г. Кузнецкие металлурги должны были обеспечить уже около 30 % общесоюзного производства черных металлов, что ставило перед ними колоссальные задачи в условиях нехватки ресурсов. Первая военная зима стала особенно тяжелой для комбината, поскольку значительно ухудшилось снабжение сырьем, топливом, материалами и оборудованием.

В 1941 г. металлургическое производство страны столкнулось с острейшей нехваткой ферросплавов, в том числе ферромарганца, который был необходим для производства броневой стали и других сплавов. Крупные месторождения марганцевой руды Никопольского и Чиатурского месторождений, которые обеспечивали сырьем около 90 % всей металлургической промышленности советского государства, с началом военных действий оказались на оккупированных территориях, а новые месторождения, открытые в Казахстане и на Урале, только начинали разрабатываться. Поэтому КМК столкнулся с серьезными проблемами. Используемая в доменном цехе мазульская руда оказалась непригодной для производства ферромарганца по причине того, что содержание марганца в ней было крайне низким,

а уровень вредных примесей, наоборот, слишком высоким.

В условиях острого дефицита ферросплавов руководство комбината приняло решение о жесткой экономии имеющихся ресурсов. В конце 1941 г. был издан специальный приказ, запрещающий использование ферросплавов при выплавке чугуна. Были установлены минимальные нормы ферросплавов для каждой марки стали, что создавало дополнительные трудности для металлургов. Директор комбината, осознавая всю серьезность ситуации, ежедневно контролировал расход имеющихся запасов ферросплавов, которые, однако, стремительно истощались и к 1942 г. ситуация грозила стать катастрофической.

В 1942 г. на комбинат поступило телеграфное распоряжение от наркома И.Ф. Тевосяна, в котором предлагалось немедленно приступить к производству ферромарганца на одной из доменных печей, используя для этого оставшиеся запасы чиатурской марганцевой руды. Это решение стало настоящим вызовом для работников КМК, так как до этого ферромарганец производился только в электропечах и на специализированных ферросплавных заводах. Опыт производства ферромарганца в доменных печах отсутствовал.

Работникам комбината необходимо было разработать новую технологию и организовать выпуск доменного ферромарганца в кратчайшие сроки, причем от успешного выполнения этой задачи зависела возможность выполнения оборонных заказов по производству стали и проката. В этой сложной работе приняли участие не только работники доменного цеха, но и технический отдел комбината, и центральная заводская лаборатория. Во главе команды стоял начальник доменного цеха А.Ф. Борисов [10]. Важную роль в создании и реализации технологии обеспечил инженер А.В. Немцов, который ранее работал на одном из южных заводов и обладал необходимыми знаниями и опытом. Кроме того, неоценимый вклад в разработку технологии получения ферромарганца внесли мастера доменной печи № 2 С.Е. Бойко, Н.С. Мартынов и И.Ф. Трубка. Их знания и производственный опыт, накопленные в довоенные годы, стали основой для успешного освоения новой технологии. К середине февраля 1942 г. коллектив комбината смог наладить производство ферромарганца, технология была успешно освоена, а КМК смог обеспечить производство необходимого количества доменного ферромарганца для нужд оборонной промышленности.

К концу 1942 г. запасы чиатурской руды были полностью исчерпаны, что привело к необходимости поиска новой местной сырьевой базы. В качестве альтернативного источника сырья внимание специалистов привлекло небольшое месторождение марганцевой руды, расположенное в районе деревни Дурново. В разгар зимы 1942 – 1943 гг. начались активная добыча и поставка данной руды на комбинат. Рудник находился довольно

² Постановление ГКО СССР № 2837 с о мерах неотложной помощи черной металлургии, с приложением докладных записок Маленкова Г.М., Тевосяна И.Ф. Сталину И.В., Кузнецова В.В. Чернухе В.Н. URL: <https://www.prlib.ru/item/1982962> (дата обращения 29.08.2025).

далеко от железнодорожной линии и единственным возможным способом транспортировки стали грузовые автомобильные перевозки. Несмотря на сложные погодные условия и практически отсутствие дорог, грузовики преодолевали труднопроходимые участки. Руда с Дурновского месторождения стала настоящим спасением для комбината, который находился на грани останки сталеплавильного производства. Однако качество этой руды вызывало определенные сложности, поскольку в ней содержалось значительное количество баритовых соединений, которые усложняли шлакообразование в доменной печи. В результате сложившейся ситуации технологию переработки такой руды пришлось разрабатывать практически заново, что создавало дополнительные трудности в условиях и без того напряженной работы. Ситуация усугублялась тем, что в этот же период доменщики начали осваивать производство обедненного ферросилиция, в котором производство также испытывало острую необходимость. В то же время из-за нехватки передельного чугуна невозможно было полностью перевести одну из доменных печей на выпуск ферросплавов и поэтому выплавку приходилось проводить короткими кампаниями, которые длились по пять-семь суток, чередуя их с производством чугуна.

Резкие изменения в тепловых режимах значительно ухудшали состояние печи. В шахте образовывались настлы и профиль печи искажался, что, в свою очередь, приводило к снижению всех технико-экономических показателей. Если в апреле 1942 г. при выплавке литейного чугуна за десять суток средняя производительность печи составляла 525 т, то в августе и сентябре этот показатель упал до 370 т. Существенно сократилось и общее производство чугуна, что, безусловно, вызывало беспокойство у руководства. Однако все издержки были ничтожны по сравнению с огромной выгодой, которую принесло освоение производства доменных ферросплавов: была успешно ликвидирована угроза прекращения выплавки оборонного металла. Применение доменного ферросилиция было временным, но вынужденным решением в сложившейся ситуации. В сентябре 1941 г. на выплавку ферросплава была переведена десятитонная электропечь литейного цеха, что позволило обеспечить завод необходимыми материалами на время, пока не будет найдено более стабильное решение по обеспечению сырьем.

Серьезными трудностями, которые были вызваны отсутствием необходимого транспортного обеспечения, сопровождалась и доставка кварцитов с Антоновского месторождения, находящегося на расстоянии 450 км от КМК. В 1942 г. была проведена разведка нового месторождения чугунашских кварцитов, которое располагалось гораздо ближе и рядом с железнодорожной линией, соединяющей Сталинск и Таштагол. Решение о введении в эксплуатацию рудника стало настоящим прорывом, так как позволило значительно

сократить расстояние для доставки сырья. Открытие нового источника сырья обеспечивало потребности КМК, а также Кузнецкого ферросплавного завода, который вскоре дал первую партию ферросилиция. К этому времени строительство Джездинского марганцевого рудника в Казахстане и Полуночного рудника на Урале было завершено, и стало возможным обеспечивать необходимую поставку марганцевой руды.

В то же время на листовом стане КМК внутренние резервы увеличения объемов прокатки броневых листов были практически исчерпаны. Это стало серьезной проблемой в связи с необходимостью увеличения производства танков [11]. В июне 1941 г. была выдвинута идея использовать для прокатки брони стан 900 рельсобалочного цеха, однако существовало опасение, что на данном стане не удастся получить броню необходимого качества. Производственный процесс изготовления броневых листов требовал соблюдения определенных технологических норм, одной из которых был раскат «по технологии угла». Этот метод заключался в том, что в процессе деформации слитка в различных направлениях изменялось продольное расположение кристаллов металла, что, в свою очередь, позволяло достичь повышения его стойкости и вязкости. Недостаточная длина бочки валков стана 900 не позволила реализовать данную технологию.

В данных условиях группа опытных прокатчиков, в которую входили специалисты С.Е. Либерман, А.Г. Монид, Г.В. Шаров и другие, под руководством главного инженера Л.Э. Вайсберга провела ряд экспериментальных работ, в результате которых удалось доказать возможность обеспечения необходимого качества броневых листов при продольной прокатке. Параллельно с этим была разработана комбинированная калибровка валков черновой клетки рельсобалочного стана. Это новшество позволило прокатывать броневые листы и другие профили без необходимости перевалки валков, что значительно упростило производственный процесс. В этом достижении значительная заслуга принадлежала вальцовщикам П.Д. Беликову, Я.М. Карманову, оператору А.М. Михайловой и специалистам цеха, которые внесли существенный вклад в освоение новых технологий прокатки. В дальнейшем на стане 900 было внедрено производство калиброванной броневой полосы, что позволило существенно сократить отходы металла и повысить эффективность производства. Эти новшества стали важным шагом в обеспечении фронта качественным броневым прокатом, что было чрезвычайно важно в условиях войны. В 1943 г. группа инженеров за освоение прокатки броневых листов на рельсобалочном стане была удостоена Государственной премии. Это признание стало не только наградой за труд, но и подтверждением важности и значимости работы, проделанной в условиях, когда каждая тонна качественного броневых листов имела важное значение для фронта.

В начале 1942 г. на действующих металлургических предприятиях возникли серьезные проблемы в обеспечении производства металла огнеупорными материалами. В данных условиях шамотно-динасовый цех КМК постоянно не выполнял график поставки огнеупорной глины [12]. В середине 1942 г. начались работы по расширению мощностей огнеупорного цеха, что должно было обеспечить решение возникших проблем. Одной из главных технологических трудностей, с которыми столкнулись металлурги, стал процесс обжига глины для получения шамота. Используемые шахтные печи имели устаревшую конструкцию и отличались низкой производительностью, что приводило к получению шамота низкого качества. В довоенные годы существовали планы по строительству более современных вращающихся печей, предназначенных для обжига доломита. Первое испытание новой печи состоялось в июле 1942 г., и с запуском производства обожженного доломита была решена задача по обеспечению сталеплавильщиков качественными огнеупорными материалами, которые теперь можно было получать из местного сырья. Такое нововведение позволило увеличить производство шамотных изделий почти в два раза. Важно отметить, что КМК одним из первых в отрасли освоил обжиг глины для получения шамота во вращающихся печах, что подчеркивает новаторский подход кузнецких металлургов. Для того, чтобы увеличить мощности по производству огнеупорного шамотного кирпича, была оперативно проведена реконструкция старого кирпичного завода и на его базе был создан новый огнеупорный цех, который стал важной локацией в производственной технологической линии.

В условиях войны требования к качеству стали возросли и трудности в производстве оказались более ощутимыми из-за прекращения поставок качественной глины, необходимой для изготовления графитно-шамотных пробок. Такая глина добывалась в Донбассе, и к сентябрю 1941 г. запасы глины часов-ярского месторождения на Кузнецком металлургическом комбинате подходили к концу. Поступавший для производства пробок графит являлся высокозольным, что ставило под угрозу выполнение производственных планов. Металлурги начали искать новые компоненты для шихты и им удалось заменить дефицитную часов-ярскую глину на высокоглиноземистую породу, известную как андалузит. В июле 1942 г. были получены пробки из нового сырья, которые продемонстрировали удовлетворительные эксплуатационные качества. Производственный участок пробок возглавлял инженер Е.Ф. Беляев, а мастером работала инженер Н.Б. Бенедиктова. В течение следующих двух лет кузнецкие металлурги продолжали использовать андалузитовые пробки [13].

В 1942 г. в коксохимическом цехе сложилась крайне напряженная ситуация, которая требовала немедленного вмешательства. Коксовые батареи, являющиеся важнейшими элементами производственного процесса,

нуждались в значительном ремонте, однако на комбинате не было достаточного количества фасонного динасового кирпича, необходимого для выполнения этих работ. Расположенный в Первоуральске огнеупорный завод находился на стадии строительства и не мог обеспечить пока поставок необходимой продукции. В сложнейших условиях и при отсутствии современного оборудования коллектив огнеупорного цеха под руководством таких специалистов, как Н.Г. Шульгин, Н.Н. Переверзев и А.А. Мирошниченко, смог в кратчайшие сроки освоить производство огнеупоров. В результате производство огнеупоров по сравнению с 1941 г. возросло на 30 %. Успехи огнеупорщиков оказали значительное влияние на обеспечение бесперебойной работы как коксового, так и сталеплавильных цехов.

С введением в эксплуатацию механических цехов на комбинате возникла новая и чрезвычайно важная отрасль производства – металлообработка. Такое нововведение привело к резкому увеличению спроса на режущий и измерительный инструмент, а поставки таких изделий извне практически полностью прекратились, станки стали простаивать. С целью решения этой проблемы в цехах были предприняты попытки самостоятельно изготавливать инструменты, однако полукустарные изделия не отличались высоким качеством и быстро выходили из строя.

В конце 1941 г. для стабилизации обстановки несколько предприятий региона передали комбинату более 80 металлорежущих станков, а Наркомчермет из специального фонда дополнительно выделил еще 30 единиц станочного оборудования. Эти меры стали важным шагом к восстановлению производственного комплекса. На строительство нового инструментального цеха и монтаж необходимого оборудования были изысканы дополнительные ресурсы, и в феврале 1942 г. инструментальный цех начал выпускать продукцию, что позволило ему занять роль основного поставщика инструментов для специального производства и ремонтно-механических цехов комбината. В комплексе нового цеха были созданы лекальное, термическое и кузнечное отделения, а также была организована контрольно-измерительная лаборатория, что позволило осуществлять контроль качества всех видов выпускаемого инструмента.

В организацию производства продукции для фронта было вложено много усилий и знаний со стороны инженеров и руководителей механических цехов. Среди них можно выделить таких специалистов, как Н.А. Никитин, Н.А. Цирульков, А.И. Козлов, Л.К. Ковтун, М.Д. Солонин, М.А. Панасенко, М.Ф. Пономарев, В.К. Ланин, Л.Я. Магусевич, А.Г. Иванов, Д.И. Кузнецов и других. Эти профессионалы сыграли ключевую роль в координации работы, направленной на выполнение задач по оборонным заказам. Кроме того, неоценимую помощь оказывали научные сотрудники Сибирского металлур-

гического института Н.М. Куницын, Э.Х. Шамовский, В.Я. Зарвин, Ю.В. Грдина и др., которые обладали значительными теоретическими знаниями. Их вклад был чрезвычайно важен для решения технических задач и внедрения новых технологий в производственные процессы и способствовал улучшению качества выпускаемой продукции.

В связи с необходимостью проведения масштабных работ на комбинате руководство столкнулось с серьезными трудностями, связанными с нехваткой материалов и оборудования. Это создало настоящую проблему для обеспечения необходимыми ресурсами курируемых КМК горнорудных предприятий. Одной из наиболее острых проблем стало отсутствие крепежного леса, взрывчатых веществ и карбида кальция, которые были крайне необходимы для нормального функционирования производственных процессов. В условиях ограниченного доступа к таким материалам дирекция комбината не могла гарантировать достаточное материально-техническое снабжение, что ставило под угрозу стабильность работы рудников и, следовательно, добычу руды. Для избежания сокращения объемов добычи коллективы рудников приняли решение организовать собственное производство дефицитных материалов.

Продолжало развиваться ускоренное сталеварение. В среднем каждая плавка броневой стали занимала на четыре часа больше времени по сравнению с обычными плавками. Это указывает на то, что в разрывании скоростного сталеварения был заложен серьезный потенциал для увеличения объемов производства металла. Наилучших результатов в этой области добились те мастера и сталевары, которые не только овладели тонкостями технологии, но смогли максимально оптимизировать время на всех этапах производственного процесса (рис. 5). Их мастерство и умение вести плавку в сложных условиях позволяли



Рис. 5. Сталевар Ф. Рябов, 1944 г.

Fig. 5. Steelworker F. Ryabov, 1944

достигать впечатляющих результатов. Среди таких специалистов можно выделить А.Я. Чалкова, М.В. Буркацкого, Н.И. Негоду, Н.И. Лутова [14], а также мастеров М.М. Привалова, А.Н. Томилина, П.Д. Никитина. Благодаря их самоотверженному труду в апреле 1942 г. страна получила дополнительно 3500 т стали. В первой половине мая 1942 г. бригада блюминга под руководством инженера Г.И. Еромолаева и старшего машиниста-оператора М.А. Меркулова смогла довести среднее производство проката в горячий час до 315 т, а в некоторые дни этот показатель достигал рекордных 340 т. Это было настоящим достижением в истории блюминга. В среднесортном цехе старшие вальцовщики Т.С. Сухов, П.П. Ляшенко и И.Л. Ходоровский также демонстрировали выдающиеся результаты, выполняя нормы на 115 – 120 %. Мастер М.М. Привалов в мае 1942 г. смог произвести более 1640 т стали сверх установленного плана, а сталевар Г.Н. Аверкин добавил к этому еще 375 т. Эти достижения стали возможны благодаря слаженной работе коллектива и стремлению каждого работника к повышению эффективности производства (рис. 6, 7).

Удовлетворяя растущие потребности оборонной промышленности, коллектив комбината неуклонно увеличивал выпуск легированных марок стали и проката, включая важнейшую продукцию – танковую броню. Сталевары-скоростники прилагали все усилия для сокращения времени плавки, несмотря на сложности и трудоемкость процесса производства легированных сталей. Каждый стремился внести свой вклад в общее дело, осознавая, что успех работы напрямую влияет на обороноспособность страны.

В сентябре 1942 г. коллектив среднесортного цеха получил особенно важное задание, которое требовало высокой ответственности и оперативности. Одним из военных заводов, производивших пусковые установки БМ-13 («Катюши»), был направлен заказ на срочное освоение технологии прокатки балок нового профиля. Это задание было критически важным в условиях войны и его успешное выполнение могло оказать зна-



Рис. 6. Лучший сталевар Ф. Ляхов и мастер М. Привалов, 1943 г.

Fig. 6. The best steelworker F. Lyakhov and master M. Privalov, 1943



Рис. 7. Лучший сталевар Е.В. Ляхов, 1943 г.

Fig. 7. The best steelworker E.V. Lyakhov, 1943

чительное влияние на обстановку на фронте. Уже 5 ноября 1942 г. завод-заказчик сообщил о поступлении первой партии проката, что свидетельствовало о том, что работа была выполнена в срок и качественно.

Все достижения происходили при значительных изменениях состава работников комбината, обновление составило более 50 – 60 %. Это было связано с вводом в эксплуатацию новых цехов и расширением производства. Из уволенных 1250 человек (что составляет более 23,5 % от общего числа трудящихся) были мобилизованы в ряды РККА или ушли добровольцами на фронт (рис. 8). Это свидетельствовало о высокой патриотической активности населения и готовности защищать свою страну [15]. Значительную долю нового пополнения персонала (более 34 %) составили выпускники профессиональных школ и ремесленных училищ. К концу 1942 г. количество женщин на комбинате достигло 38 %, а молодежи в возрасте до 18 лет – 17 %. Массовое поступление новых работников выдвинуло перед руководством новые задачи по подготовке кадров. Требовалась быстрая подготовка новых сотрудников к выполнению производственных обязанностей и обеспечению высокой производительности труда в условиях военного времени. На комбинате было организовано обучение, в котором приняло участие более 9000 человек.

Одним из ключевых факторов, влияющих на высокую производительность доменных печей, является обеспечение их ровного хода. Инженеры технического отдела В.И. Коминов и В.М. Зудин предложили решение, заключающееся в выделении из общей массы кокса фракции размером 25 – 40 мм с отдельной ее загрузкой. Такой метод значительно улучшил газопроницаемость шихты, что способствовало более ровной работе печей и увеличению их производительности.

Начиная с 1943 г. на всех доменных печах систематически сокращались периоды работы на тихом ходу, что также способствовало повышению эффективности производства. В результате этих мероприятий плановые показатели были перевыполнены на всех печах.

Однако футеровки и кожухи доменных печей находились в крайне изношенном состоянии, что было вызвано длительной эксплуатацией, а сложная военная обстановка не позволяла провести необходимые капитальные ремонты. К середине 1944 г. положение стало крайне напряженным, особенно это касалось состояния четвертой доменной печи. В ночь на 5 июня 1944 г. на этой печи произошла серьезная авария прорыва кожуха, что привело к образованию значительной трещины и в результате в окружающее пространство цеха выбросило около 700 м³ раскаленной шихты. Благодаря оперативным действиям работников возникший в результате аварии пожар удалось достаточно быстро локализовать, что позволило сохранить электрооборудование и механизмы, которые могли быть повреждены огнем. Восстановительные работы на доменной печи были выполнены в чрезвычайно короткие сроки и уже в июне печь вновь была введена в эксплуатацию. Поздней осенью 1944 г. для проведения капитального ремонта была остановлена печь № 4. Этот ремонт был завершен всего за 35 суток, хотя изначально на его выполнение планировалось 45. В течение 1944 г. были выполнены капитальные средние ремонты первой и второй доменных печей, что также свидетельствует о высоких нагрузках и сложных условиях эксплуатации печей. В результате этих мероприятий годовой план по производству был выполнен на 104 %.



Рис. 8. Рабочий КМК И.Г. Савочкин на фронте, 1941 г.

Fig. 8. KMK worker I.G. Savochkin at the front, 1941

С увеличением объемов выплавки стали все прокатные цехи столкнулись с необходимостью наращивания темпа производства и ускорения рабочего ритма станков. К 1943 г. стало очевидно, что существующие мощности блюминга не справляются с объемами металла, поступающего из мартеновских цехов. По этой причине в январе и феврале 1943 г. на складах накопилось до 3500 т слитков. Одной из главных причин такого явления были особенности технологии прокатки броневой стали, которая требовала специфических условий: для получения высококачественного броневых листов необходимо было замедленное нагревание слитков и поддержание предельно низкой температуры во время прокатки. Это обстоятельство значительно снижало пропускную способность отделения нагревательных колодцев и в целом производительность обжимного стана. Низкая температура, предусмотренная технологией на этапе окончания прокатки, создавала дополнительные сложности, поскольку сляб нельзя было резать на ножницах стана. Эта операция выполнялась вручную с использованием автогенных резаков, что также значительно замедляло процесс и увеличивало трудозатраты. Благодаря многочисленным экспериментам была разработана новая технология, которая предусматривала форсированный режим нагрева и более высокую температуру прокатки броневых металлов. Новая технология не только обеспечивала необходимое качество проката, но и значительно увеличивала производительность блюминга. В 1943 г. благодаря запуску станков, эвакуированных с завода «Днепроспецсталь», прокатные цехи получили дополнительные мощности. Работы по монтажу новых станков мощностью 750, 450 и 360 т начались в сентябре 1942 г. и уже к лету 1943 г. все станы были введены в эксплуатацию.

В апреле 1943 г. начался пусковой период, и, несмотря на то, что нагревательные печи еще находились на сушке, уже без потерь времени началось опробование механизмов стана 750. Многие инженерно-технические работники прибыли из г. Запорожье, но почти всех рабочих пришлось набирать и обучать непосредственно на месте. Вскоре после запуска стана 750 в строй вступил и стан 500. В сентябре 1943 г. в эксплуатацию был введен последний из эвакуированных прокатный стан 360. В этот же период на рельсобалочном стане удалось освоить прокатку калиброванной полосы, что значительно упростило работу танкостроителей. В 1943 г. прокатчики смогли увеличить выпуск металла на 75 000 т по сравнению с предыдущим 1942 г., а в 1944 г. прирост составил уже 170 000 т к уровню 1943 г. Прирост продолжился и в 1945 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На начальном этапе противостояния Советского Союза европейскому нацизму ключевую роль сыграл план эвакуации промышленности из регионов, которые

вскоре должны были оказаться под оккупацией. В условиях надвигающейся войны возникла необходимость не только сохранить производственные мощности, но и адаптировать тяжелую промышленность, включая черную металлургию, к военным нуждам. В сложившихся условиях было принято решение о задействовании ресурсов Кузнецкого металлургического комбината, который должен был стать основой для запуска новых производств. Процесс эвакуации и восстановления производственных мощностей оказался крайне сложным, он требовал от участников не только глубоких технических знаний, но и высокой степени организованности. Это касалось не только успешной транспортировки оборудования, но и его последующей установки и наладки на новых площадках. Определенная часть эвакуированного оборудования нуждалась в серьезном ремонте и доработке. Необходимо было заново изготовить недостающие узлы и детали, что добавляло сложности в уже и без того трудный процесс. Параллельно с этим переход на новые сортаменты металлов требовал разработки принципиально новых технологий, что было успешно реализовано. Изменения в структуре производства затронули основные технологические процессы и способствовали более эффективному использованию ресурсов и повышению производительности.

В ходе запуска эвакуированного оборудования коллектив комбината достиг значительных успехов в производстве ферромарганца, что позволило значительно увеличить объемы производства. Важным достижением стало внедрение комбинированной калибровки валков черновой клетки рельсобалочного стана. Это новшество обеспечило возможность более качественной прокатки бронелистов. Успехи специалистов в области огнеупоров оказали значительное влияние на стабильную работу как коксового, так и сталеплавильных цехов. Введение в эксплуатацию новых механических цехов, продукция которых была необходима для удовлетворения потребностей фронта, способствовало возникновению новой и важной отрасли производства на комбинате – металлообработки. Это позволило не только разнообразить ассортимент выпускаемой продукции, но и повысить общую эффективность работы предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Заслуженная награда. *Большевицкая сталь*. 1945;(183):1. Well-deserved reward. *Bol'shevistskaya stal'*. 1945;(183):1. (In Russ.).
2. Новокузнецк – город трудовой доблести / Составитель П.П. Лизогуб. Новокузнецк: Лотус-Пресс; 2021:168.
3. Берлин А.Б. Новокузнецк в солдатской шинели: В год 50-летия Великой Победы – молодому поколению новокузнецчан посвящается. Новокузнецк: Кузнецкая крепость: Союз писателей; 1995:297.
4. Тресвятский Л.А., Протопопов Е.В., Уманский А.А., Худолеев А.Н. Кузнецкая броня: первые рубежи победы.

Известия вузов. Черная металлургия. 2025;68(2):112–121.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-2-114-123>

- Tresvyatskii L.A., Protopopov E.V., Umanskii A.A., Khudoleev A.N. Kuznetsk armor: The first frontiers of victory. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2025;68(2):112–121. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-2-114-123>
5. Прокатные станы СССР / Е.С. Берзон, В.И. Волобуев, Е.А. Гольденберг, Е.М. Литвиненко, Я.А. Обломский, С.П. Павлюткин, П.Н. Туманов, С.М. Филиппов, Л.В. Шапиро; под ред. И.П. Бардина, А.М. Голованенко, Е.А. Зильберберга. Москва – Ленинград: Металлургиздат; 1940:646.
 6. Шпрингер А.Э. Забытые герои Кузнецкостроя. Новокузнецк: Информационно-аналитический центр; 2024:240.
 7. Докучаев Г.А. Сибирский тыл в Великой Отечественной войне. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение; 1968:322.
 8. Выполнен мартовский план. *Большевицкая сталь.* 1942;(39):1.
The completed march plan. *Bol'shevistskaya stal'.* 1942;(39):1. (In Russ.).
 9. Ускорить выпуск высококачественных сталей. Из беседы с главным инженером Кузнецкого металлургического комбината тов. Вайсбергом. *Большевицкая сталь.* 1942;(5):2.
Accelerating the production of high-quality steels. From a conversation with Weisberg, chief engineer of the Kuznetsk Metallurgical Plant. *Bol'shevistskaya stal'.* 1942;(5):2. (In Russ.).
 10. Великая Отечественная война 1941–1945: энциклопедия / Гл. ред. М.М. Козлов. Москва: Сов. Энциклопедия; 1985:832.
 11. Бардокин Р.Е. Кузнецкий арсенал: Памятники военной техники в Новокузнецке. Новокузнецк: Зеркало; 2023:192.
 12. Сорокин И. Будем продолжать соревнование. *Большевицкая сталь.* 1942;(30):1.
Sorokin I. We will continue the competition. *Bol'shevistskaya stal'.* 1942;(30):1. (In Russ.).
 13. История Кузнецкого металлургического комбината имени В.И. Ленина / Е.М. Полянская, Г.Н. Сусакин, Ю.А. Шпарог и др.; под общ. ред. Б.Н. Жеребина. Москва: Металлургия; 1973:462.
 14. Чалков А.Я. В годы грозовые. В сб.: *Стальное сердце Сибири* / Сост. М.Ф. Беркович, Н.М. Шидловский; ред. А.М. Титова; предисл. А. Кузнецова. Кемерово: Кемеровское книжное издательство; 1982:128–134.
 15. Носов Н. Солдаты тыла. В сб.: *Стальное сердце Сибири* / Сост. М.Ф. Беркович, Н.М. Шидловский; под ред. А.М. Титова. Кемерово: Кемеровское книжное издательство; 1982:138–146.

Сведения об авторах

Information about the Authors

Лев Алексеевич Тресвятский, доктор культурологии, доцент, профессор кафедры социально-гуманитарных дисциплин, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: lev-35@mail.ru

Lev A. Tresvyatskii, Dr. Sci. (Cultural), Assist. Prof., Prof. of the Chair of Social and Humanitarian Disciplines, Siberian State Industrial University
E-mail: lev-35@mail.ru

Евгений Валентинович Протопопов, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-7554-2168
E-mail: protopopov@sibsiu.ru

Evgenii V. Protopopov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-7554-2168
E-mail: protopopov@sibsiu.ru

Алексей Николаевич Худолеев, д.ист.н., доцент, профессор кафедры истории и общественных наук, Кузбасский гуманитарно-педагогический институт Кемеровского государственного университета
E-mail: khudoleev73@mail.ru

Aleksei N. Khudoleev, Dr. Sci. (Historical), Assist. Prof., Prof. of the Chair of History and Social Sciences, Kuzbass Humanitarian and Pedagogical Institute of Kemerovo State University
E-mail: khudoleev73@mail.ru

Валентина Евгеньевна Хомичева, к.п.н., доцент, заведующий кафедрой физической культуры и спорта, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: homicheva_ve@onti.sibsiu.ru

Valentina E. Khomicheva, Cand. Sci. (Psychological), Assist. Prof., Head of the Chair of Physical Culture and Sports, Siberian State Industrial University
E-mail: homicheva_ve@onti.sibsiu.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

Л. А. Тресвятский – научное руководство, анализ библиографического материала.
Е. В. Протопопов – постановка задачи исследования, анализ материала, связанного с металлургическим производством.
А. Н. Худолеев – постановка задачи исследования, сбор библиографического материала, редактирование основного содержания.
В. Е. Хомичева – редактирование текста, анализ материалов.

L. A. Tresvyatskii – scientific guidance, analysis of bibliographic material.
E. V. Protopopov – formulation of the research task, analysis of the material related to metallurgical production.
A. N. Khudoleev – formulation of the research task, collection of bibliographic material, editing of the main content.
V. E. Khomicheva – editing the text, analysis of materials.

Поступила в редакцию 27.02.2026
После доработки 25.03.2026
Принята к публикации 01.04.2026

Received 27.02.2026
Revised 25.03.2026
Accepted 01.04.2026



УДК 621.791.927.5

DOI 10.17073/0368-0797-2026-3-242-249

Оригинальная статья
Original article

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ПРОЦЕССЕ WAAM, НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ СТАЛЕЙ 08ХМФА И 30ХГСА

Ю. Г. Кабалдин, М. С. Аносов, Ю. С. Мордовина,
М. А. Чернигин[✉], Р. Ш. Мансуров

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева (Россия, 603022, Нижний Новгород, ул. Минина, 24)

✉ honeybadger52@yandex.ru

Аннотация. На данный момент вопросы, касающиеся усталостного разрушения изделий, полученных с использованием аддитивных методов, в литературе встречаются достаточно редко. Особенно, если усталостное разрушение происходит в присутствии дефектов различного рода. Актуальность обусловлена риском преждевременного разрушения деталей под циклическими нагрузками, особенно в ответственных конструкциях (авиация, энергетика), где метод электродуговой наплавки (WAAM) может обеспечить экономию времени изготовления на 40 – 60 %. В данном исследовании оценивается влияние технологических дефектов на усталостную прочность сталей 08ХМФА и 30ХГСА, полученных методом WAAM. В процессе наплавки были изготовлены образцы из сталей 08ХМФА и 30ХГСА. Режимы наплавки варьировались для генерации различных дефектов: макродефекты (поры, непровары, поверхностные концентраторы), микроструктурные дефекты (видманштеттенова структура, разнородность и т. д.). Также были изготовлены бездефектные образцы. Для выявления микроструктуры металлов, а также распределения и характера возможных дефектов был проведен металлографический анализ. Травление образцов осуществлялось в 4 %-ном водном растворе HNO₃. Усталостные испытания проводились на специализированном стенде с нагружением образцов по схеме консольного изгиба. Наибольшую усталостную прочность показывают бездефектные образцы обеих сталей. Наличие любого рода дефектов (микроструктурных и макродефектов) приводит к снижению усталостной прочности. Макроструктурные дефекты (крупные поры и непровары) оказывают более сильное влияние на усталостную прочность материала, чем микроструктурные дефекты материала. Также установлено, что наличие поверхностного концентратора оказывает большее влияние на формирование магистральной усталостной трещины, чем крупные несплавления в центральной области образцов.

Ключевые слова: усталостная прочность, WAAM, 30ХГСА, 08ХМФА, дефекты металла

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00534.

Для цитирования: Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Мордовина Ю.С., Чернигин М.А., Мансуров Р.Ш. Влияние дефектов, возникающих в процессе WAAM, на усталостную прочность сталей 08ХМФА и 30ХГСА. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2026;69(3):242–249. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-242-249>

EFFECT OF THE DEFECTS OCCURRING DURING WAAM PROCESS ON FATIGUE STRENGTH OF 08CrMoV AND 30CrMnSi STEELS

Yu. G. Kabaldin, M. S. Anosov, Yu. S. Mordovina,
M. A. Chernigin[✉], R. Sh. Mansurov

R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University (24 Minina Str., Nizhny Novgorod 603022, Russian Federation)

✉ honeybadger52@yandex.ru

Abstract. At the moment, there are very few studies on fatigue failure of the products obtained by additive manufacturing, especially when fatigue failure occurs due to various types of defects. The importance of this topic is due to the potential for premature components damage under cyclic loading, especially in critical applications such as aviation and energy, where WAAM (wire arc additive manufacturing) can save significant manufacturing time by up to 40 – 60 %. The study evaluates the impact of technological defects on the fatigue strength of 08CrMoV and 30CrMnSi steels produced by WAAM. The authors used different surfacing modes to generate various types of defects, including macrodefects such as pores, lack of fusion, and surface concentrators, as well as microstructural defects like Widmannstetten structures and grain diversity. Defect-free samples were also produced. The authors performed metallographic analysis to investigate the metals microstructure, distribution and nature of any possible defects. Samples were etched using a 4 % aqueous HNO₃ solution. Fatigue tests were conducted on a specialized machine with

sample loading following the cantilever bending method. Defect-free samples of both steels exhibited the highest fatigue strength. The presence of any type of defect, whether microstructural or macrostructural, resulted in a decrease in fatigue strength. Macrostructural defects, such as large pores and lack of fusion, had a stronger impact on the material fatigue strength compared to microstructural defects. Additionally, it was found that the presence of a surface concentrator had a greater influence on initiation of a primary fatigue crack than the presence of large non-melted regions in the sample central part.

Keywords: fatigue strength, WAAM, 30CrMnSi, 08CrMoV, metal defects

Acknowledgements: The work was supported the Russian Science Foundation, grant No. 25-19-00534.

For citation: Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Mordovina Yu.S., Chernigin M.A., Mansurov R.Sh. Effect of the defects occurring during WAAM process on fatigue strength of 08CrMoV and 30CrMnSi steels. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2026;69(3):242–249.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-242-249>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время аддитивные технологии (АТ) становятся одной из передовых технологий для высокопроизводительного производства или изготовления деталей со сложной формой [1]. Наиболее широкое распространение АТ могут находить в мелкосерийном или несерийном высокотехнологичном производстве: авиастроении, тяжелом машиностроении, оборонном производстве [2 – 5].

Усталостью материала принято называть деградацию его свойств, обусловленную накоплением микроструктурных дефектов под действием циклических нагрузок. Данный вид разрушения особенно опасен, потому что часто протекает под действием нагрузок гораздо ниже предела текучести материала в течение длительного времени. Известно, что большинство деталей механизмов и конструкций длительно работают под действием циклических нагрузок [6 – 8]. Более 80 % всех случаев эксплуатационного разрушения происходит в результате циклического нагружения [6; 9]. Начиная с XIX в., усталостная стойкость получает значительное теоретическое развитие и становится одним из фундаментальных свойств материалов в инженерной практике [1; 10 – 13]. Явление усталости – очень сложный многофакторный процесс. К факторам, влияющим на процесс усталости, относятся: частота нагружения [14 – 16], асимметрия цикла нагружения [17 – 18], состояние поверхности [19] и температура работы изделия [20 – 22].

Несмотря на активное изучение металла, полученного с применением АТ, вопросы, касающиеся уста-

лостного разрушения изделий, изучены недостаточно и встречаются в литературе довольно редко [23; 24]. Особенно, если усталостное разрушение происходит в присутствии дефектов различного рода [25 – 28].

В работе изучалось влияние дефектов различного рода в материале, полученном с использованием метода электродуговой наплавки (*Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM*). Технология WAAM заключается в наплавлении обычной сварочной проволоки на подложку, в результате чего образуется заготовка будущей детали. В работах [28 – 31] описаны основные аспекты технологии WAAM.

Целью данного исследования является изучение влияния дефектов различной природы на усталостную прочность металла, полученного методом WAAM.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании для наплавки образцов были использованы проволоки Нп-30ХГСА и Св-08ХМФА. Химический состав определялся методом оптико-эмиссионной спектроскопии с использованием спектрометра Foundry Master UVR, состав исходной проволоки и наплавленных заготовок представлен в табл. 1.

Заготовки образцов производились в виде стенок путем послойного нанесения металла на экспериментальной исследовательской WAAM установке, в состав которой входили: трехкоординатный станок с ЧПУ портального типа IVCNC STL, сварочный источник тока Alloy 275 ME Pulse, вытяжной шкаф, сварочный стол и сварочная горелка.

Таблица 1. Химический состав исходной проволоки для наплавки

Table 1. Chemical composition of the initial wire for surfacing

Марка	Состояние	Содержание легирующих элементов, %								
		C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	V
Нп-30ХГСА	Проволока	0,269	1,000	0,93	0,099	0,015	0,020	0,961	0,005	0,007
30ХГСА	Заготовка	0,196	0,835	0,782	0,093	0,012	0,016	0,888	0,005	0,006
Св-08ХМФА	Проволока	0,087	0,138	0,29	0,174	0,016	0,012	0,975	0,484	0,156
08ХМФА	Заготовка	0,068	0,123	0,25	0,166	0,015	0,011	0,902	0,471	0,134

Таблица 2. Параметры режимов наплавки

Table 2. Parameters of surfacing modes

Номер образца	Марка стали	Параметры режима наплавки			Характеристика наплавленных образцов
		I , А	U , В	Q , Дж/мм	
1.1	08ХМФА	150	24	576	Бездефектные образцы
1.2	08ХМФА	110	13	229	Несплавления и поверхностный концентратор
2.1	30ХГСА	160	24	614	Бездефектные образцы
2.2	30ХГСА	200	18	576	Крупные скопления пор, обнаруженные после наплавки заготовок
2.3	30ХГСА	130	17	354	Аномальное строение микроструктуры

Режим наплавки задавался следующими параметрами: I – сила тока, А; U – напряжение, В; z – дуговой зазор, мм; v – скорость подачи проволоки, мм/с.

При этом дуговой зазор и скорость подачи проволоки были постоянными для всех экспериментов и составляли 11 мм и 300 мм/мин соответственно (определены путем проведения предварительных испытаний). В качестве защитного газа использовалась сварочная смесь, состоящая из 80 % Ar и 20 % CO₂ со скоростью подачи 15 л/мин для всех режимов.

Для изучения влияния микро- и макроструктурных дефектов на усталостную прочность сталей 30ХГСА и 08ХМФА были напечатаны стенки толщиной в один наплавочный валик по режимам, представленным в табл. 2.

Погонная энергия процесса Q с учетом коэффициента энергетических потерь 0,8 определялась по формуле

$$Q = \frac{0,8IU}{v}$$

Из напечатанных заготовок с помощью электроэрозионной резки вырезались плоские образцы для проведения усталостных испытаний с толщиной 3 мм и размером рабочей зоны 60×15 мм (тип IV по ГОСТ 25.502 – 78) (рис. 1). После вырезки рабочая

часть образцов обрабатывалась шлифованием до шероховатости $R_a = 0,2$. Для оценки эволюции структуры и фиксирования особенностей роста трещин в ходе усталостного нагружения рабочая поверхность части образцов подвергалась полированию и последующему травлению.

Усталостные испытания проводились на специализированном стенде по схеме консольного изгиба (коэффициент асимметрии цикла $R = -1$). Частота упругопластического циклического деформирования устанавливалась с использованием частотного преобразователя равной 8,3 Гц (500 циклов/мин). Испытания проводились с учетом требований ГОСТ 25.502 – 79. Амплитуду напряжений в цикле настраивали путем расчетов и с использованием индикатора часового типа. В процессе испытаний регистрировали: число циклов N и амплитуду напряжений в цикле σ_{max} . Общая схема испытательного стенда представлена на рис. 2.

Наработка материала образца определялась как отношение текущего количества циклов нагружения N к количеству циклов, при котором наблюдается полное разрушение материала образца N^* (N/N^*).

Для выявления микроструктуры металлов и характера возможных дефектов проводился металлографиче-

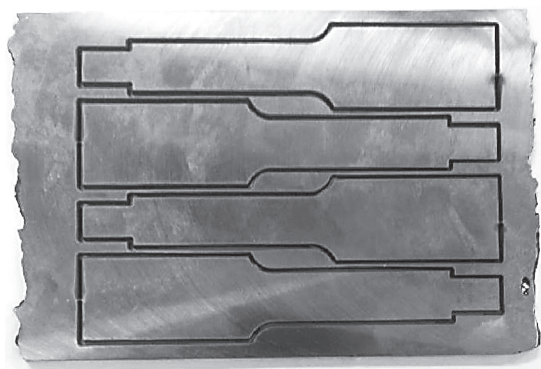


Рис. 1. Общий вид образцов после вырезки

Fig. 1. General view of the samples after cutting

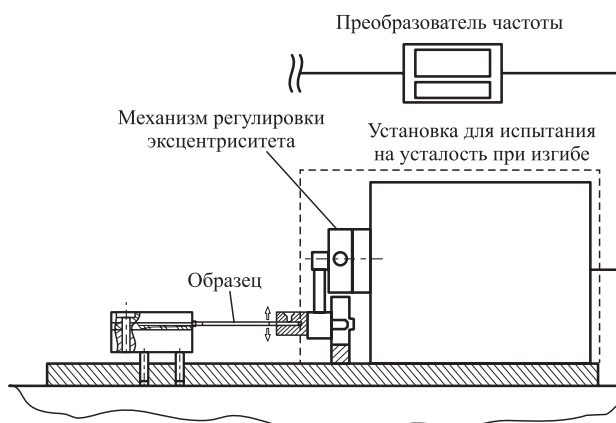


Рис. 2. Схема установки для испытания на усталость

Fig. 2. Scheme of fatigue testing installation

ческий анализ. Выявление микроструктуры осуществлялось путем протирания подготовленной поверхности ватным диском, смоченным в 4 %-ном водном растворе азотной кислоты.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В ходе металлографического анализа образцов из стали 30ХГСА были получены результаты, представленные в табл. 3.

При исследовании наплавленных стенок в заготовке для изготовления образцов 2.2 отчетливо выделяются большие скопления макродефектов, которые могут быть охарактеризованы как поры и непровары. При наплавке заготовок для изготовления образцов 2.1 и 2.3 макродефекты практически не выявляются.

В ходе изготовления образцов 1.2 режим наплавки изменялся таким образом, чтобы получить несплавления между двумя наплавочными валиками. Дефекты выстроены в виде строчек, расположенных по границам сплавления слоев преимущественно в центре образцов. Также после вырезки образцов на наиболее нагруженную поверхность образца наносился концентратор глубиной порядка 130 мкм.

Данные, полученные в ходе усталостных испытаний образцов из сталей 30ХГСА и 08ХМФА, представлены на рис. 3.

Наибольшую усталостную прочность показывают бездефектные образцы. Исходя из данных, представленных на рис. 3, можно сделать вывод, что наличие любого рода дефектов (микроструктурных и макро-структурных) приводит к снижению усталостной прочности. Макроструктурные дефекты (крупные поры и непровары) оказывают более сильное влияние на усталостную прочность материала.

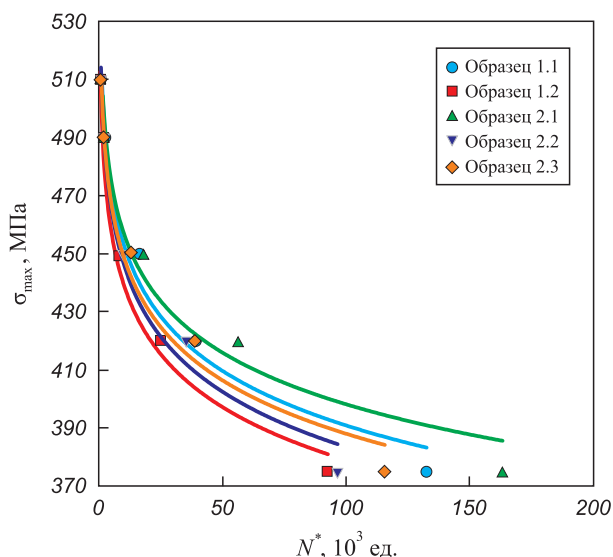


Рис. 3. Кривые усталости для сталей 30ХГСА и 08ХМФА

Fig. 3. Fatigue curves for 30CrMnSi and 08CrMoV steels

Результаты испытаний показывают, что наличие дефектов в сплаве 08ХМФА приводит к снижению долговечности исследуемого материала в среднем на 30 – 40 %.

При изучении образцов 1.2 установлено, что несмотря на наличие строчечных дефектов (непроваров) в опасном сечении, они не являются причинами образования магистральной трещины, которая привела к разрушению образца. Очагом зарождения трещины являлся дефект поверхности глубиной 0,136 мкм. Именно здесь наблюдается наиболее активный рост трещины, особенно в момент предразрушения.

Вывод о более сильном влиянии качества поверхности (поверхностного концентратора) можно также сделать исходя из микроснимков, полученных при изучении разрушенного образца (рис. 4). Видно, что очагом разрушения выступил предварительно нанесенный концентратор. Магистральная трещина практически не пересекает непровары и образовавшиеся вокруг них трещины.

Схожие выводы о влиянии технологических дефектов на усталостную прочность деталей получены и другими исследователями [32 – 34]. Так, в работе, направленной на изучение влияния литейных дефектов на усталостную прочность надрессорных балок и боковых рам, было установлено, что литейные дефекты приводят к снижению усталостной прочности на 33 – 47 % [32].

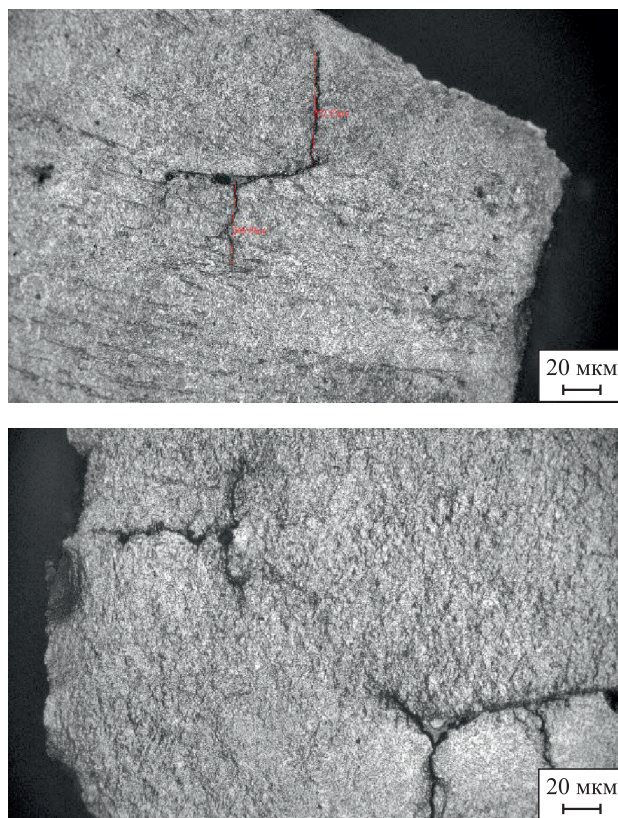


Рис. 4. Разрушенный образец из стали 08ХМФА

Fig. 4. Destroyed 08CrMoV steel sample

Таблица 3. Результаты металлографического анализа

Table 3. Results of metallographic analysis

Номер образца	Микроструктура образца	Описание микроструктуры
1.1		<p>Феррит-перлитная структура. Феррит выделяется преимущественно в виде замкнутых сеток, также замечены следы Видманштеттеновой структуры</p>
1.2		<p>Феррит-перлитная структура. Феррит выделяется преимущественно в виде замкнутых сеток, также замечены следы Видманштеттеновой структуры</p>
2.1		<p>Феррит и сорбит. По высоте образца фиксируется незначительная структурная неоднородность, выражающаяся в различной дисперсности сорбита</p>
2.2		<p>Феррит и сорбит. По высоте образца выделяется структурная неоднородность, отчетливо выделяются места с крупными ферритными колониями</p>
2.3		<p>Аномальная феррит-перлитная структура. Феррит выделяется в виде замкнутых сеток. В металле замечена Видманштеттенова структура. Перлит имеет как пластинчатую, так и частично сфероидизировавшуюся морфологию</p>

Также в данном исследовании указывается на наиболее критичное с точки зрения усталостной прочности поверхностное и подповерхностное расположение дефектов [32]. Схожие выводы о влиянии поверхностных дефектов были получены при изучении сварных соединений [34].

Выводы

В ходе проведения усталостных испытаний образцов из сталей 08ХМФА и 30ХГСА наибольшие значения показывали бездефектные образцы для обеих марок.

Исходя из данных, полученных при исследовании образцов из стали 30ХГСА, можно сделать вывод, что наличие любого рода дефектов (микроструктурных и макроструктурных) приводит к снижению усталостной прочности. Макроструктурные дефекты (крупные поры и непровары) оказывают более сильное влияние на усталостную прочность материала.

Так, для образцов, имеющих аномальное строение микроструктуры (образцы 2.3), наблюдается снижение усталостной прочности на 28 % относительно бездефектного материала (образец 2.1). В образцах 2.2, имеющих макроскопические дефекты технологического характера (крупные поры и непровары), также происходит значительное снижение усталостной прочности, достигающее 39 %.

Схожие результаты получены и для стали 08ХМФА: усталостная прочность образца с непроварами и поверхностным концентратором (образец 1.2) снижается на 31 %.

Также следует отметить, что наличие поверхностного концентратора оказывает большее влияние на формирование магистральной усталостной трещины, чем несплавления в центральной области образцов. Данный эффект подтверждается изучением поверхности образца в процессе усталостного испытания и после его разрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Tang W., Tang Z., Lu W., Wang S., Ming Y. Modeling and prediction of fatigue properties of additively manufactured metals. *Acta Mechanica Solida Sinica*. 2023;36:181–213. <https://doi.org/10.1007/s10338-023-00380-5>
2. Li N., Huang S., Zhang G., Qin R., Liu W., Xiong H., Shi G., Blackburn J. Progress in additive manufacturing on new materials: A review. *Journal of Materials Science & Technology*. 2019;35(2):242–69. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.002>
3. Beaman J., Bourell D.L., Seepersad C., Kovar D. Additive manufacturing review: Early past to current practice. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2020;142(11):110812. <https://doi.org/10.1115/1.4048193>
4. Hergul Y., Goynuk T., Yucel M., Kan G., Yaman U. Performance and microstructure analysis of cylindrical rods fabricated by dot-by-dot WAAM for aerospace applications. *Progress in Additive Manufacturing*. 2025;10:9355–9370. <https://doi.org/10.1007/s40964-025-01166-6>
5. Viliš J., Pokorný Z., Zouhar J., Vítek R., Fornůšek T. Comparative analysis of metal components manufactured by WAAM technology for the strike face layer of ballistic protection. *Materials Science Forum*. 2025;1151:3–12. <https://doi.org/10.4028/p-2gbZ6u>
6. Gonchar A.V., Mishakin V.V., Klyushnikov V.A. The effect of phase transformations induced by cyclic loading on the elastic properties and plastic hysteresis of austenitic stainless steel. *International Journal of Fatigue*. 2018;106:153–158. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.10.003>
7. Трефилова Т.А., Бирюкова Г.А. Меры по обеспечению надежности на этапах проектирования, производства и эксплуатации изделий. *Электроника и электрооборудование транспорта*. 2020;(4):41–44.
Trefilova T.A., Biryukova G.A. Reliability measures at the stages of design, production and operation of products. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*. 2020;(4):41–44. (In Russ.).
8. Терентьев В.Ф., Кораблева С.А. Усталость металлов. М: Наука; 2015:484.
9. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. М.: МИСИС; 1998:400.
10. Schütz W. A history of fatigue. *Engineering Fracture Mechanics*. 1996;54(2):263–300. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(95\)00178-6](https://doi.org/10.1016/0013-7944(95)00178-6)
11. Liu J., Pan X., Li Y., Chen X. A two-point method for multi-axial fatigue life prediction. *Acta Mechanica Solida Sinica*. 2022;35:316–327. <https://doi.org/10.1007/s10338-021-00287-z>
12. Zhao T., Kang G. Fatigue life prediction for NiTi shape memory alloy microtubes under uniaxial stress-controlled one-way shape memory cyclic loading. *Acta Mechanica Solida Sinica*. 2022;35:15–25. <https://doi.org/10.1007/s10338-021-00255-7>
13. Yi M., Tang W., Zhu Y., Liang Ch., Tang Z., Yin Y., He W., Sun Sh., Su Sh. A holistic review on fatigue properties of additively manufactured metals. 2023:202. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20695.24486>
14. Нгуен Нгок Т., Капралов В.М., Коленько Г.С. Влияние частот нагружения на сопротивление усталости материалов. *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2019;25(2):68–77. <https://doi.org/10.18721/JEST.25205>
Nguyen Ngoc T., Kapralov V.M., Kolenko G.S. Effect of loading frequencies on fatigue resistance of materials. *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*. 2019;25(2):68–77. (In Russ.). <https://doi.org/10.18721/JEST.25205>
15. Hu Y., Sun C., Xie J., Hong Y. Effects of loading frequency and loading type on high-cycle and very-high-cycle fatigue of a high-strength steel. *Materials*. 2018;11(8):1456. <https://doi.org/10.3390/ma11081456>
16. Мыльников В.В., Шетулов Д.И., Кондрашкин О.Б., Чернышов Е.А., Пронин А.И. Изменение показателей сопротивления усталости конструкционных сталей при различных спектрах нагружения. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019;62(10):796–802. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-10-796-802>

- Myl'nikov V.V., Shetulov D.I., Kondrashkin O.B., Chernyshov E.A., Pronin A.I. Changes in fatigue resistance of structural steels at different loading spectra. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019;62(10):796–802. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-10-796-802>
17. Фигура К.Н. Влияние асимметрии цикла нагружения на усталостную прочность трубопроводов в условиях коррозионного повреждения. *Вестник ИИИ ДВФУ*. 2020;(2(43)):13–22.
Figura K. Influence of asymmetry of the loading cycle on the fatigue strength of pipelines under corrosion damage. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2020;(2(43)):13–22. (In Russ.).
 18. Meraj M., Dutta K., Bhardwaj R., Yedla N., Karthik V., Pal Sh. Influence of asymmetric cyclic loading on structural evolution and deformation behavior of Cu-5 at. % Zr alloy: An atomistic simulation-based study. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2017;26:5197–5205. <https://doi.org/10.1007/s11665-017-3003-1>
 19. Пачурин Г.В., Кузьмин Н.А., Филиппов А.А., Нuzhdина Т.В. Механические характеристики сталей с газофазным никелевым покрытием. *Технология металлов*. 2019;(2):34–37. <https://doi.org/10.31044/1684-2499-2019-2-0-34-37>
Pachurin G.V., Kuz'min N.A., Filippov A.A., Nuzhdina T.V., Goncharova D.A. Mechanical properties of steel after gas-phase application of a nickel coating. *Russian Engineering Research*. 2019;39(7):577–579. <https://doi.org/10.3103/S1068798X19070153>
 20. Nagesha A. Influence of temperature on the low cycle fatigue behaviour of a modified 9Cr–1Mo ferritic steel. *International Journal of Fatigue*. 2002;24(12):1285–1293. [https://doi.org/10.1016/s0142-1123\(02\)00035-x](https://doi.org/10.1016/s0142-1123(02)00035-x)
 21. Khlybov A.A., Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Ryabov D.A., Naumov V.I., Sentyureva V.I. The effect of low temperatures on the operability of products 20GL steel. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1431(1):012063. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1431/1/012063>
 22. Khlybov A.A., Uglov A.L., Ryabov D.A. On the specific features of using the phenomenon of acoustoelasticity when testing the stress state of anisotropic material of technical objects at subzero temperatures. *Russian Journal of Non-destructive Testing*. 2021;57:21–30. <https://doi.org/10.1134/S1061830921010083>
 23. Schneider J., Farris L., Nolze G., Reinsch S., Cios G., Tokarski T., Thompson S. Microstructure evolution in Inconel 718 produced by powder bed fusion additive manufacturing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2022;6(1):20. <https://doi.org/10.3390/jmmp6010020>
 24. Wegener T., Wu T., Sun F., Wang C., Lu J., Niendorf T. Influence of surface mechanical attrition treatment (SMAT) on microstructure, tensile and low-cycle fatigue behavior of additively manufactured stainless steel 316L. *Metals*. 2022;12(9):1425. <https://doi.org/10.3390/met12091425>
 25. Liu F., He C., Chen Y., Zhang H., Wang Q., Liu Y. Effects of defects on tensile and fatigue behaviors of selective laser melted titanium alloy in very high cycle regime. *International Journal of Fatigue*. 2020;140:105795. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105795>
 26. Biswal R., Zhang X., Syed A.K., Awd M., Ding J., Walther F., Williams S. Criticality of porosity defects on the fatigue performance of wire + arc additive manufactured titanium alloy. *International Journal of Fatigue*. 2019;122:208–217. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.01.017>
 27. Wang S., Zhan L., Xi H., Xiao H. A unified approach toward simulating constant and varying amplitude fatigue failure effects of metals with fast and efficient algorithms. *Acta Mechanica Sinica*. 2021;34:53–64. <https://doi.org/10.1007/s10338-020-00187-8>
 28. Nguyen V.T., Minh P.S., Uyen T.M.T., Do T.T., Ngoc H.V.T., Le M.T., Nguyen V.T.T. WAAM Technique: Process parameters affecting the mechanical properties and microstructures of low-carbon steel. *Metals*. 2023;13(5):873. <https://doi.org/10.3390/met13050873>
 29. Kabaldin Yu., Shatagin D., Ryabov D., Solovyov A., Kurkin A. Microstructure, phase composition, and mechanical properties of a layered bimetallic composite ER70S-6-ER309LSI obtained by the WAAM method. *Metals*. 2023;13(5):851. <https://doi.org/10.3390/met13050851>
 30. Blinn B., Hassel T., Viebranz V.F., Beck T., Maier H.J. Influence of the grain orientation and δ -ferrite on the cyclic deformation behavior of an austenitic CrNi steel manufactured by wire and arc additive manufacturing. *Materials Science and Engineering: A*. 2023;870:144612. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144612>
 31. Treutler K., Wesling V. The current state of research of wire arc additive manufacturing (WAAM): A review. *Applied Sciences*. 2021;11(18):8619. <https://doi.org/10.3390/app11188619>
 32. Пастухов И.Ф., Пастухов М.И. О влиянии литейных дефектов на сопротивление усталости литых деталей. *Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого*. 2012;(3(50)):11–18.
Pastukhov I.F., Pastukhov M.I. On the effect of casting defects on fatigue strength of cast parts. *Bulletin of the Sukhoi State Technical University of Gomel*. 2012;(3(50)):11–18. (In Russ.).
 33. Майсурадзе М.В., Антаков Е.В. Анализ причин усталостного разрушения деталей машин. *Сталь*. 2021;(10):47–53.
Maisuradze M.V., Antakov E.V. Analysis of fatigue failure causes of machine components. *Steel in Translation*. 2021;51(10):745–751. <http://doi.org/10.3103/S0967091221100089>
 34. Kashyadeh K.R., Ganjani M.A., Moghbeli S., Abu-Nidzhim R., Khlopkov S., Laad M. Effects of surface-level defects on tensile and fatigue strength of spot weld bonding–three-sheet steel. *International Journal of Engineering*. 2025;39(8):1855–1864. <https://doi.org/10.5829/ije.2026.39.08b.07>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Юрий Георгиевич Кабалдин, д.т.н., профессор кафедры «Технология и оборудование машиностроения», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

ORCID: 0000-0003-4300-6659

E-mail: uru.40@mail.ru

Максим Сергеевич Аносов, к.т.н., доцент кафедры «Технология и оборудование машиностроения», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

ORCID: 0000-0001-8150-9332

E-mail: anosov-maksim@list.ru

Юлия Сергеевна Мордовина, инженер института переподготовки специалистов, ассистент кафедры «Технология и оборудование машиностроения», аспирант, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

ORCID: 0009-0003-2640-9779

E-mail: ips4@nntu.ru

Михаил Алексеевич Чернигин, инженер кафедры «Технология и оборудование машиностроения», аспирант, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

ORCID: 0009-0005-6494-2851

E-mail: honeybadger52@yandex.ru

Ренат Шарифович Мансуров, к.т.н., доцент кафедры «Технология и оборудование машиностроения», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

ORCID: 0000-0002-1403-1751

E-mail: renat-m1@mail.ru

Yurii G. Kabaldin, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair "Technology and Engineering Equipment", R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University

ORCID: 0000-0003-4300-6659

E-mail: uru.40@mail.ru

Maksim S. Anosov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Technology and Engineering Equipment", R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University

ORCID: 0000-0001-8150-9332

E-mail: anosov-maksim@list.ru

Yuliya S. Mordovina, Engineer of the Institute of Retraining of Specialists, Assistant of the Chair "Technology and Engineering Equipment", Postgraduate, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University

ORCID: 0009-0003-2640-9779

E-mail: ips4@nntu.ru

Mikhail A. Chernigin, Engineer of the Chair "Technology and Engineering Equipment", Postgraduate, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University

ORCID: 0009-0005-6494-2851

E-mail: honeybadger52@yandex.ru

Renat Sh. Mansurov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Technology and Engineering Equipment", R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University

ORCID: 0000-0002-1403-1751

E-mail: renat-m1@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

Ю. Г. Кабалдин – составление плана экспериментального исследования, научное руководство, редактирование статьи.

М. С. Аносов – научное руководство, редактирование статьи, проведение усталостных испытаний.

Ю. С. Мордовина – металлографический анализ, оформление и редактирование статьи.

М. А. Чернигин – металлографический анализ, оформление и редактирование статьи.

Р. Ш. Мансуров – анализ результатов усталостных испытаний, проведение наплавки образцов, вырезка образцов.

Yu. G. Kabaldin – preparing the experimental research plan, scientific guidance, editing the article.

M. S. Anosov – scientific guidance, editing the article, fatigue testing.

Yu. S. Mordovina – metallographic analysis, design and editing of the article.

M. A. Chernigin – metallographic analysis, design and editing of the article.

R. Sh. Mansurov – analysis of fatigue test results, sample surfacing, sample cutting.

Поступила в редакцию 04.09.2025

После доработки 08.10.2025

Принята к публикации 03.04.2026

Received 04.09.2025

Revised 08.10.2025

Accepted 03.04.2026



УДК 621.91.01

DOI 10.17073/0368-0797-2026-3-250-257



Оригинальная статья
Original article

МИКРОСТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМИЧЕСКИ ОБРАБОТАННОГО СПЛАВА INCONEL 625, ПОЛУЧЕННОГО ПО ТЕХНОЛОГИИ ПРОВОЛОЧНОГО ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В. А. Овчаренко¹, А. С. Бабаев²✉, Н. Л. Савченко³, И. Л. Стрелкова¹

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 30)

² Национальный исследовательский Томский государственный университет (Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 36 стр. 27)

³ Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/4)

✉ a.s.babaev@mail.tsu.ru

Аннотация. В работе описаны особенности формирования структуры жаропрочного сплава Inconel 625 (аналог ХН75МБТЮ), полученного методом проволочного электронно-лучевого аддитивного производства (ПЭЛАП), а затем подвергнутого закалке при 1200 °С и двухступенчатой закалке 1200 – 1000 °С. Термообработка проводилась в вакуумной печи в среде низкого вакуума (–1 Бар), для ускоренного охлаждения использовали продувку инертным газом (Ar). С использованием высокоточного аналитического оборудования авторы провели исследования микроструктуры, фазового состава и механических свойств образцов в сечениях вдоль и поперёк направления печати. При исследовании образца в сечении вдоль направления печати выделены три характерных зоны: основная, повторного нагрева и зона смены кристаллизационного фронта. Они имеют разную структуру и, как следствие, различие в структурно-чувствительных механических характеристиках. Установлено, что в процессе печати в зоне основного слоя из-за низкой теплопроводности материала происходит аккумуляция тепла, приводящая к выделению орторомбической фазы δ -Ni₃(Nb,Mo) в междендритном пространстве. Выбранная температура закалки позволила исправить дендритную морфологию с образованием крупного зерна размером 0,3 – 0,5 мм и полным растворением δ -фазы в γ -Ni матрице. Двухступенчатая закалка сопровождается изотермическим выделением δ -фазы по границам и внутри зерен, приводя к дисперсионному упрочнению сплава. Авторы провели испытания на одноосное растяжение при комнатной температуре, получены численные значения предела прочности (σ_b), предела текучести (σ_t) и относительного удлинения (δ_5). Установлено, что наилучшее сочетание механических характеристик получено при двухступенчатой закалке сплава.

Ключевые слова: аддитивные технологии, ПЭЛАП, Inconel 625, термическая обработка, двухступенчатая закалка, микроструктура, δ -фаза, механические характеристики

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект №23-79-10166 (<https://rscf.ru/en/project/23-79-10166>).

Для цитирования: Овчаренко В.А., Бабаев А.С., Савченко Н.Л., Стрелкова И.Л. Микроструктура и механические характеристики термически обработанного сплава Inconel 625, полученного по технологии проволочного электронно-лучевого аддитивного производства. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2026;69(3):250–257. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-250-257>

MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF HEAT-TREATED INCONEL 625 ALLOY OBTAINED BY WIRE ELECTRON-BEAM ADDITIVE MANUFACTURING

V. A. Ovcharenko¹, A. S. Babaev² , N. L. Savchenko³, I. L. Strelkova¹

¹ National Research Tomsk Polytechnic University (30 Lenina Ave., Tomsk 634050, Russian Federation)

² National Research Tomsk State University (36 Lenina Ave., bld. 27, Tomsk 634050, Russian Federation)

³ Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/4 Lenina Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)

 a.s.babaev@mail.tsu.ru

Abstract. The paper describes the features of structure formation of heat-resistant alloy Inconel 625 obtained by wire electron-beam additive manufacturing (WEBAM) technology and then subjected to quenching at 1200 °C and two-stage quenching at 1200 – 1000 °C. Heat treatment was carried out in a vacuum furnace, in a low vacuum environment of –1 Bar, inert gas (Ar) blowing was used for accelerated cooling. Using high-precision analytical equipment, the authors studied the microstructure, phase composition and mechanical properties of the samples in the sections along and across the deposition direction. When examining the sample in the cross-section along the deposition direction, three characteristic zones were identified: base metal zone, reheating zone, and zone of change of the crystallization front. They have different structure and, as a consequence, the difference in structure-sensitive mechanical characteristics. It was found that in the deposition process in the base layer zone, due to the material low thermal conductivity, there is an accumulation of heat, leading to the release of orthorhombic phase δ -Ni₃(Nb,Mo) in the interdendritic space. The chosen quenching temperature allowed to correct the dendritic morphology, with the formation of coarse grains of 0.3 – 0.5 mm and complete dissolution of δ -phase in γ -Ni matrix. The two-stage quenching is accompanied by isothermal release of δ -phase at grain boundaries and within grains, leading to dispersion hardening of the alloy. Uniaxial tensile tests at room temperature were carried out and numerical values of tensile strength (σ_v), yield strength (σ_f) and relative elongation (δ_5) were determined. The best combination of mechanical characteristics was obtained by two-stage quenching of the alloy.

Keywords: additive technologies, WEBAM, Inconel 625, heat treatment, two-stage quenching, microstructure, δ -phase, anisotropy, mechanical properties

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 23-79-10166 (<https://rscf.ru/en/project/23-79-10166>).

For citation: Ovcharenko V.A., Babaev A.S., Savchenko N.L., Strelkova I.L. Microstructure and mechanical properties of heat-treated Inconel 625 alloy obtained by wire electron-beam additive manufacturing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2026;69(3):250-257.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-250-257>

ВВЕДЕНИЕ

Суперсплавы на основе никеля применяются для изготовления ответственных деталей в аэрокосмических, ракетных и газотурбинных двигателях, атомных тепловых электростанциях и химическом оборудовании [1]. Основными причинами этого являются уникальные эксплуатационные характеристики суперсплавов, включая высокую прочность, ударную вязкость, превосходную износостойкость, высокую коррозионную стойкость и жаро/хладостойкость в агрессивных условиях эксплуатации. Однако суперсплавы на основе никеля склонны к питтинговому, межкристаллитному и коррозионному растрескиванию под напряжением в условиях эксплуатации. В связи с этим в состав сплава Inconel 625 входят хром, молибден, ниобий и железо, которые повышают коррозионную стойкость и стойкость к высокотемпературному окислению [2].

В современной инженерной практике возникают различные требования не только в отношении улучшения характеристик материалов, но и достижения более быстрого производства и изготовления сложных деталей за один этап. Различные современные методы аддитивного производства имеют явные преимущества в скорости изготовления сложных компонен-

тов по сравнению с традиционными методами, такими как литье и ковка. Inconel 625, сплав на основе никеля в состоянии твердого раствора, усиленный в основном Mo и Nb, известен своей умеренной прочностью и исключительной коррозионной стойкостью при высокой температуре. Его механические свойства и коррозионная стойкость в значительной степени определяются перераспределением легирующих элементов во время кристаллизации в зоне сплавления слоев, что влияет на полученную микроструктуру изделия. Неоднородность структуры и химического состава образцов сплава Inconel 625, изготовленных аддитивными способами, может отрицательно влиять на свойства материала [3 – 6]. Композиционная неоднородность способна вызывать образование твердых и хрупких фаз, таких как фазы Лавеса и карбиды, в зонах, обогащенных Nb, Mo, C и Si, тем самым значительно ухудшая механические свойства и коррозионную стойкость. Возможно образование δ -фазы, влияние которой на механические свойства является неоднозначным. Кроме того, образцы сплава Inconel 625, изготовленные с использованием различных методов аддитивного производства, демонстрируют значительные различия в микроструктурных характеристиках, таких как размер зерна и состав выделенных фаз. Эти микроструктурные особенности

делают обычные процессы термообработки для аддитивных деталей не совсем применимыми [1; 2].

Термическая обработка определяет формирование структуры, размер зерна, состояние границ зерен, выделение и растворение упрочняющих фаз, что придает материалу требуемые свойства. Большая часть существующих исследований посвящена термической обработке изделий из Inconel 625, полученных по аддитивной технологии SLM, использующих в качестве сырья порошок [7 – 10]. Основными операциями термической обработки в исследованиях выступают отжиг для снятия напряжений [11 – 13], обработка на твердый раствор (закалка) [12 – 14], старение [10] и горячее изостатическое прессование [13]. Для достижения высоких прочностных свойств при комнатной и повышенных температурах жаропрочные никелевые сплавы также подвергают двойной закалке [15; 16]. Данных по изменению структурно-фазового состояния и механических характеристик после проведения двухступенчатой закалки на образцах Inconel 625, полученных методами аддитивного производства, в литературе не найдено.

В последние годы технология проволочного электронно-лучевого аддитивного производства (ПЭЛАП) стала важной и многообещающей альтернативой среди методов аддитивного производства благодаря своей высокой скорости выращивания и потенциалу для удовлетворения растущих потребностей современной инженерии [17]. Этот метод, в частности, облегчает производство крупных деталей со сложной геометрией. Однако он имеет определенные недостатки, такие как шероховатость поверхности, высокие первоначальные инвестиционные затраты и различия в свойствах по сравнению с деталями, изготовленными традиционным способом. К настоящему времени отсутствует информация об оптимизации свойств сплава Inconel 625, изготовленного с помощью ПЭЛАП.

В настоящей работе изучено влияние стандартной термической обработки на твердый раствор (закалка) и двухступенчатой закалки на структурно-фазовое состояние и механические свойства сплава Inconel 625, изготовленного по технологии ПЭЛАП, с целью устранения структурно-фазовой анизотропии и улучшения механических свойств.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения исследования на специализированной установке электронно-лучевого аддитивного производства был получен образец с геометрическими параметрами 155×65×20 мм. В качестве материала наплавки использовали проволоку диаметром 1,2 мм марки OKAutrodNiCrMo-3 фирмы ESAB (Швеция). Печать образца проходила при токе луча 60 мА с ускоряющим напряжением 30 кВ и скоростью 300 мм/мин, использовалась круговая развертка диаметром 6 мм.

С полученной заготовки на электроэрозионном станке срезали поверхностный слой толщиной 3 – 4 мм. Для исследования структуры после синтеза образцы отбирали из центральной части полученной заготовки, по три плоских образца были вырезаны в сечениях вдоль и поперек направления печати для определения механических свойств. Для проведения термической обработки оставшийся материал разделяли на восемь образцов размером 36×14×16 мм.

После проведения термической обработки были вырезаны плоские образцы на растяжение: по три образца в сечениях вдоль и поперек направления печати.

Механические испытания выполняли на универсальной испытательной машине TiniusOlsen 50ST по ГОСТ 1497 – 2023. Рентгенофазовый анализ (РФА) образцов проводили на дифрактометре XRD-6000 фирмы Shimadzu (Япония) на CuK_α -излучении. Химический состав определяли с помощью портативного рентген-флуоресцентного анализатора S1 TITANSPX фирмы Bruker (США). Анализ микроструктур проводили с помощью растрового электронного микроскопа, оснащенного энергодисперсионным спектрометром MIRA 3 LMU фирмы Tescan (Чехия), металлографического микроскопа AxioObserver производства CarlZeiss (Германия) в светлом поле и с применением ДИК (дифференциально-интерференционного контрастирования). Пористость оценивали на полированной поверхности образцов при увеличении 100[×]. Измерение твердости образцов выполняли методом Виккерса на стационарном микротвердомере Dugascan-10 в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507–1–2007 с нагрузкой 300 г.

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Термическую обработку образцов проводили в высокотемпературной вакуумной печи фирмы Nabertherm VHT 8/22-GR (Германия). Данная печь относится к классу электрически обогреваемых камерных печей с графитовым нагревом и возможностью проведения термообработки в среде негорючего защитного или реакционного газа, а также в вакууме. Установленный насос позволяет создавать среду низкого вакуума до –1 Бар. Режимы термообработки подбирали, исходя из анализа режимов, применённых в рабо-

Таблица 1. Режимы термообработки

Table 1. Heat treatment modes

Вид ТО	Температура, °С	Время выдержки, ч	Охлаждение*
Закалка 1	1200	2,0	Воздух
Закалка 2	1000	1,5	Воздух
* Устройство печи не позволяет провести охлаждение на воздухе. Для ускоренного охлаждения применялась продувка инертным газом (Ar) со скоростью 200 л/ч.			

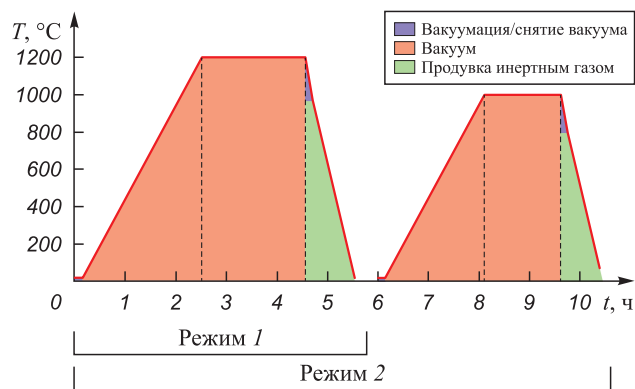


Рис. 1. Режимы термической обработки

Fig. 1. Heat treatment modes

тах [10 – 12; 18], позволяющих исправить дендритную морфологию исходной структуры. Для расчета времени термической обработки применяли данные из СТО 00220368–008–2006 по обработке для отечественного аналога ХН75МБТЮ (табл. 1).

Для проведения термической обработки использовали восемь образцов: четыре образца были подвергнуты одноступенчатой закалке (режим 1), оставшиеся – двухступенчатой закалке (режим 2). Графики термической обработки представлены на рис. 1.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Химический состав образцов после послыонного выращивания определяли рентгенофлуоресцентным методом (%: 63,5 Ni, 21,5 Cr; 9,0 Mo; 0,4 Ti; 0,4 Al; 0,5 Fe; 3,7 Nb + Ta) и он соответствовал ГОСТ 5632 – 2014. Преимущество использования проволоки в качестве исходного материала заключается не только в экономической эффективности, но и в том, что попадание вредных примесей и оксидных включений исключается, в отличие от применения порошка.

В образцах присутствует распределенная газовая пористость, образующаяся в результате кипения сплава в процессе синтеза. Распределение пор в объеме неравномерно, их количество увеличивается от центра к краю образца.

Структура материала после печати в общем имеет дендритное строение. Сформированные в процессе кристаллизации слои можно условно разделить на три, соответствующие зоне основного слоя, зоне повторного нагрева (переходной) и зоне смены кристаллизационных фронтов [19; 20]. Причиной возникновения столбчатых дендритов в зоне повторного нагрева является частичное переплавление зерен предыдущего осажденного слоя, которые послужили предзародышами для направленного роста кристаллов. Как только теплоотвод за счет нижележащего слоя ухудшается и преобладает за счет боковых поверхностей, происходит смена кристаллизационного фронта с формированием ячеистой структуры. Таким образом, за фронтом кристаллизации формируются два типа структур: ячеистая – в новом слое (рис. 2, а), и столбчатая с направленным ростом – в предыдущем.

По данным РФА фазовый состав образца представлен основной фазой γ -Ni и фазой δ -Ni₃(Nb, Mo). Сплав обладает низкой теплопроводностью, в областях основного слоя происходит аккумуляция тепла, что приводит к формированию локальных скоплений орторомбической фазы δ -Ni₃(Nb, Mo) (рис. 2, з, ж). Структурно-фазовая неоднородность приводит к анизотропии механических характеристик и высокой дисперсии значений прочности, т. е. сильному отклонению данных от средних значений (табл. 2).

После термической обработки по режиму 1 происходит гомогенизация микроструктуры, видны зерна (рис. 2, б, д). По данным РФА фазовый состав образца представлен основной фазой γ -Ni и карбидом титана (TiC). Скорость охлаждения, инициированная продувкой инертным газом, достаточно высокая, выделение

Таблица 2. Структурно-фазовые и механические характеристики образцов

Table 2. Structural-phase and mechanical characteristics of the samples

Параметр		После синтеза	Закалка 1200 °С	Закалка 1200 – 1000 °С	
Структура		дендритная	зёрненная	зёрненная	
Фазовый состав		γ -Ni, δ -Ni ₃ (Nb, Mo)	γ -Ni, TiC	γ -Ni, δ -Ni ₃ (Nb, Mo)	
Сечение	продольное	σ_b , МПа	647 ± 80	680 ± 25	727 ± 9
		σ_T , МПа	317 ± 28	291 ± 4	314 ± 5
		δ_5 , %	61 ± 3	67,6 ± 2	69,3 ± 1
		HV _{0,3}	200 – 246	204 ± 3	239 ± 2
	поперечное	σ_b , МПа	640 ± 20	712 ± 41	735 ± 5
		σ_T , МПа	355 ± 7	295 ± 23	312 ± 1
		δ_5 , %	56 ± 3	68,7 ± 5	69,3 ± 3
		HV _{0,3}	218 – 273	207 ± 2	238 ± 2

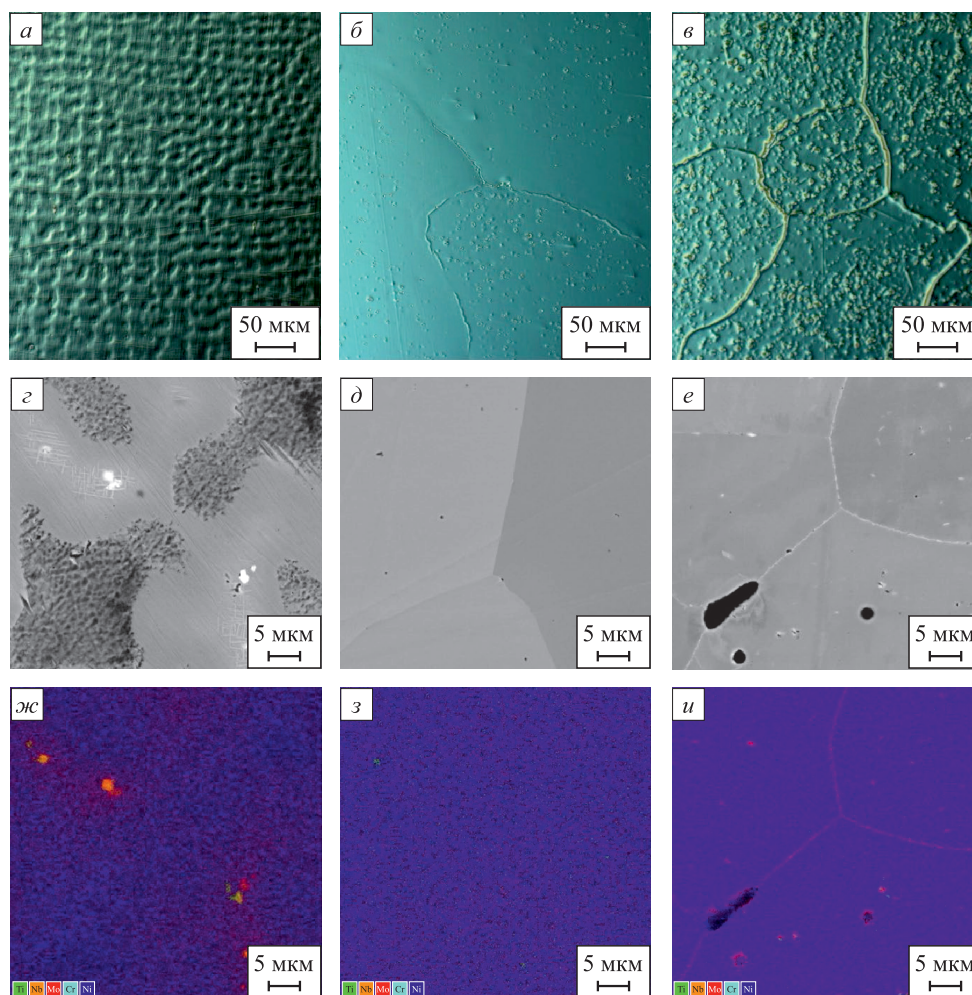


Рис. 2. Эволюция микроструктуры Inconel 625. Оптические снимки структуры.

С применением ДИК: *а* – после синтеза, зона основного сплавления;
б – после термообработки по режиму 1; *в* – после термообработки по режиму 2.
 С применением SEM: *з* – после синтеза, зона основного сплавления;
д – после термообработки по режиму 1; *е* – после термообработки по режиму 2.
 С применением EDX: *ж* – после синтеза, зона основного сплавления;
з – после термообработки по режиму 1; *и* – после термообработки по режиму 2

Fig. 2. Evolution of Inconel 625 microstructure. Optical images of the structure.

By differential interference contrasting (DIC): *a* – after synthesis, the main fusion zone;
б – after heat treatment according to mode 1; *в* – after heat treatment according to mode 2.
 SEM: *з* – after synthesis, the main fusion zone;
д – after heat treatment according to mode 1; *е* – after heat treatment according to mode 2.
 EDX: *ж* – after synthesis, the main fusion zone;
з – after heat treatment according to mode 1; *и* – after heat treatment according to mode 2

интерметаллидных фаз не происходит, однако незначительное количество TiC успевает выделиться из раствора (рис. 2, *и*).

Термическая обработка по режиму 2 приводит к выделению интерметаллидной дельта-фазы, распределенной по границам и внутри зерна (рис. 2, *в*, *е*). По данным РФА фазовый состав соответствует γ -Ni и δ -Ni₃(Nb, Mo) (рис. 2, *к*).

Более однородное выделение вторичных фаз после обеих термообработок приводит к пониженной дисперсии значений прочности, т. е. незначительному отклонению данных от средних значений по сравнению

с исходным состоянием до проведения термообработок (табл. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сформировавшаяся в процессе печати дендритная ликвация приводит к разности механических характеристик образца, так различие предела прочности образцов, вырезанных в одном сечении, достигает 12 %. Предел прочности повышается с изменением структуры, обусловленной термической обработкой. Выделившись из раствора, фаза δ -Ni₃(Nb, Mo) приво-

дит к дисперсионному упрочнению, увеличивая предел прочности и твердость материала. Предел текучести изменяется не монотонно. В сплаве Inconel 625 до термической обработки матричные элементы Cr и Ni находятся в ядрах дендритов, в то время как легирующие элементы Nb, Mo и Ti находятся в междендритных областях. В процессе закалки Cr, Ni, Nb, Mo и Ti равномерно распределяются между ядрами дендритов и междендритными областями, тем самым придерживаясь фундаментального принципа диффузии перемещения из областей с высокой концентрацией в области с более низкой концентрацией. В то же время столбчатые дендриты трансформируются в изометрические кристаллы. Обычно движущей силой рекристаллизации является остаточное напряжение, возникающее в результате пластической деформации материала [2]. Однако в изделиях, полученных по технологии ПЭЛАП, движущей силой рекристаллизации являются остаточные напряжения, вызванные повторными циклами нагрева и охлаждения осажденных слоев.

Зерно, сформированное при закалке, достигает размера 0,3 – 0,5 мм, снижая предел текучести на 19 %. При термообработке по режиму 2 происходит изотермическое выделение δ -фазы, что обусловлено диффузионными процессами, в результате которых Nb и Mo мигрируют с образованием интерметаллидной фазы, повышая предел текучести. В разных источниках влияние орторомбической δ -фазы оценивается в разном ключе. Помимо фактов об отрицательной роли в формировании механических свойств, есть данные, доказывающие, что при определенной морфологии и распределении в структуре материала она может играть положительную роль, участвуя в дисперсионном упрочнении сплава. По результатам проведенных экспериментов можно сделать вывод о положительном влиянии фазы δ -Ni₃(Nb,Mo), сформировавшейся в результате двойной закалки. Выделившись равномерно как по границам, так и внутри зерен, она приводит к дисперсионному упрочнению, увеличению предела прочности и предела текучести, а также к пониженной дисперсии значений предела прочности и предела текучести.

Выводы

Полученные по технологии ПЭЛАП образцы имеют дендритную структуру со значительной анизотропией механических свойств. Слоистость в сечении, продольном направлению печати, приводит к высокой дисперсии значений предела прочности, когда от образца к образцу значения изменяются в пределах 25 %. В то же время во взаимно перпендикулярном сечении диапазон изменения предела прочности снижается в 4 раза, что объясняется волнистым строением слоев. Результаты измерения микротвердости в поперечном сечении выше, чем в продольном. Изменения микротвердости в каждом сечении достигает 20 %.

Проведение закалки в вакууме с продувкой инертным газом позволяет изменить структуру до гомогенного твердого раствора с единичными карбидами TiC. Среднее значение микротвердости в обоих сечениях – 206 HV_{0,3}.

При проведении двухступенчатой закалки происходит равномерное выделение орторомбической фазы δ -Ni₃(Nb,Mo) по всему объему образца, приводящей к дисперсионному упрочнению. Изменение структуры приводит к повышению механических характеристик образцов при комнатной температуре и стабильным результатам с изменениями в пределах 1 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Kocaman E., Gürol U., Günen A., Çam G. Effect of post-deposition heat treatments on high-temperature wear and corrosion behavior of Inconel 625. *Materials Today Communications*. 2025;42:111101. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.111101>
2. Xu Y., Yang J., Shi Y., Zhang W., Cai X., Wang W., Li C., Wu G. Effect of heat treatment process on property and corrosion resistance of additively formed Inconel 625 alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2025;924:147738. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.147738>
3. Li C., White R., Fang X.Y., Weaver M., Guo Y.B. Microstructure evolution characteristics of Inconel 625 alloy from selective laser melting to heat treatment. *Materials Science and Engineering*. 2017;705:20–31. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.08.058>
4. Qin L., Chen C., Zhang M., Kai Y., Cheng G., Jing H., Wang X. The microstructure and mechanical properties of deposited-IN625 by laser additive manufacturing. *More Rapid Prototyping Journal*. 2017;23(6):1119–1129. <https://doi.org/10.1108/RPJ-05-2016-0081>
5. Fei C., Qin W., Chi Z., Huang Z., Jia M., Shen Q. Microstructures and mechanical behaviors of additive manufactured Inconel 625 alloys via selective laser melting and laser engineered net shaping. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022;917:165–572. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165572>
6. Болтрушевич А.Е., Мартюшев Н.В., Козлов В.Н., Кузнецова Ю.С. Структура заготовок из сплава инконель 625, полученных электродуговой наплавкой и наплавкой с помощью электронного луча. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2024;26(4):206–217. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2024-26.4-206-217>
7. Boltrushевич А.Е., Martyushev N.V., Kozlov V.N., Kuznetsova Yu.S. Structure of Inconel 625 alloy blanks obtained by electric arc surfacing and electron beam surfacing. *Obrabotka metallov (Metal Working and Material Science)*. 2024;26(4):206–217. (In Russ.). <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2024-26.4-206-217>
7. Marchese G., Piscopo G., Lerda S., Salmi A., Atzeni E., Biamino S. Heat-treated Inconel 625 by laser powder bed fusion: Microstructure, tensile properties, and residual stress evolution. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2024;33:6825–6834. <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09235-7>

8. Zhu J., Feng K., Kokawa H., Li Z. Effect of heat treatment on the anisotropic mechanical properties and corrosion resistance of laser powder bed fusion fabricated Inconel 625. *Journal of Alloys and Compounds*. 2024;1001:175087. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.175087>
9. Gonzalez J.A., Mireles J., Stafford S.W., Perez M.A., Terrazas C.A., Wicker R.B. Characterization of Inconel 625 fabricated using powder-bed-based additive manufacturing technologies. *Journal of Materials Processing Technology*. 2019;264:200–210. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.08.031>
10. Li C., White R., Fang X.Y., Weaver M., Guo Y.B. Microstructure evolution characteristics of Inconel 625 alloy from selective laser melting to heat treatment. *Materials Science and Engineering*. 2017;705:20–31. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.08.058>
11. Синчен В., Чанюнь Ч., Ланьлань Ц., Минь Ч. Эволюция микроструктуры и механическое поведение суперсплава инконель 625, полученного прямым лазерным осаждением металла. *Физика металлов и металловедение*. 2021;122(9):963–967. <https://doi.org/10.31857/S0015323021090126>
Sin chen V., Chan yun Ch., Lan lan Ts., Min Ch. Microstructure evolution and mechanical behavior of Inconel 625 superalloy produced by direct laser metal deposition. *Fizika metallov i metallovedenie*. 2021;122(9):963–967. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0015323021090126>
12. Marchese G., Parizia S., Rashidi M., Saboori A., Manfredi D., Ugues D., Lombardi M., Hryha E., Biamino S. The role of texturing and microstructure evolution on the tensile behavior of heat-treated Inconel 625 produced via laser powder bed fusion. *Materials Science and Engineering: A*. 2020;769:138500. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138500>
13. Kreitzberg A., Brailovski V., Turenne S. Effect of heat treatment and hot isostatic pressing on the microstructure and mechanical properties of Inconel 625 alloy processed by laser powder bed fusion. *Materials Science and Engineering: A*. 2017;689:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.02.038>
14. Hu Y.L., Lin X., Zhang S.Y., Jiang Y.M., Lu X.F., Yang H.O., Huang W.D. Effect of solution heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy fabricated by laser solid forming. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;767:330–344. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.07.087>
15. Назаров Е.Г., Масленников С.Б. Термическая обработка аустенитных жаропрочных сталей и сплавов. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1970;(3): 54–59.
Nazarov E.G., Maslennikov S.B. Heat treatment of austenitic heat-resistant steels and alloys. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 1970;(3):54–59. (In Russ.).
16. Борздыка А.М., Цейтлин В.З. Структура и свойства жаропрочных сплавов в связи с термической обработкой. Москва: Машиностроение; 1967:246.
17. Гурьянов Д.А., Фортуна С.В., Никонов С.Ю., Москвичев Е.Н., Колубаев Е.А. Влияние погонной энергии на структурные особенности изделий из сплава ЖС6У, сформированных проволоочной электронно-лучевой аддитивной технологией. *Известия вузов. Физика*. 2021;(8):31–37. <https://doi.org/10.17223/00213411/64/8/31>
Gurianov D.A., Fortuna S.V., Nikonov S.Yu., Moskvichev E.N., Kolubaev E.A. The influence of changes in the value of the heat input on the structural features of ZHS6U alloy products formed by the wire-feed electron-beam additive. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2021;(8):31–37. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/00213411/64/8/31>
18. Dinda G.P., Dasgupta A.K., Mazumder J. Laser aided direct metal deposition of Inconel 625 superalloy: Microstructural evolution and thermal stability. *Materials Science and Engineering: A*. 2009;509(1–2):98–104. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.01.009>
19. Овчаренко В.А., Бабаев А.С., Козлов В.Н. Особенности формирования микроструктуры и её влияние на механические свойства в образце инконель 625, полученным по аддитивной технологии EBAM. В кн.: *Современные проблемы машиностроения: Труды XVII Международной научно-технической конференции, г. Томск, 25–29 ноября 2024 г.* Томск: Издательство Томского политехнического университета; 2024: 338–340.
20. Бабаев А.С., Козлов В.Н., Овчаренко В.А., Семенов А.Р., Бельчиков И.А. Исследование обрабатываемости при фрезеровании сплава инконель 625, полученного по технологии EBAM. *Научно-технические технологии в машиностроении*. 2025;(5(167)):33–41. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2025-5-30-41>
Babaev A.S., Kozlov V.N., Ovcharenko V.A., Semenov A.R., Bel'chikov I.A. Processing characteristics study for the alloy obtained through additive technology EBAM (Inconel 625) under milling. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2025;(5(167)):33–41. (In Russ.). <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2025-5-30-41>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Валерия Алексеевна Овчаренко, аспирант отделения материаловедения инженерной школы новых производственных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет

ORCID: 0009-0000-4797-5604

E-mail: vy.gornova@yandex.ru

Артём Сергеевич Бабаев, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории нанотехнологий металлургии, Национальный исследовательский Томский государственный университет

ORCID: 0000-0003-2334-1679

E-mail: temkams@mail.ru

Valeriia A. Ovcharenko, Postgraduate of the Department of Material Science of Engineering School of New Manufacturing Technologies, National Research Tomsk Polytechnic University

ORCID: 0009-0000-4797-5604

E-mail: vy.gornova@yandex.ru

Artem S. Babaev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Nanotechnology in Metallurgy, National Research Tomsk State University

ORCID: 0000-0003-2334-1679

E-mail: temkams@mail.ru

Николай Леонидович Савченко, д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории физики упрочнения поверхности, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН

ORCID: 0000-0001-8254-5853

E-mail: savnick@ispms.ru

Ирина Леонидовна Стрелкова, к.т.н., доцент отделения материаловедения инженерной школы новых производственных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет

ORCID: 0000-0002-2222-2865

E-mail: strelkova@tpu.ru

Nickolai L. Savchenko, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Laboratory of Physics of Surface Hardening, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0001-8254-5853

E-mail: savnick@ispms.ru

Irina L. Strelkova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Department of Material Science of Engineering School of New Manufacturing Technologies, National Research Tomsk Polytechnic University

ORCID: 0000-0002-2222-2865

E-mail: strelkova@tpu.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

В. А. Овчаренко – анализ литературы, оптическая микроскопия, проведение испытаний на одноосное растяжение, термическая обработка, описание результатов исследований.

А. С. Бабаев – постановка задачи, анализ результатов исследования, формулирование выводов.

Н. Л. Савченко – проведение рентгенофазового анализа образцов на дифрактометре XRD-6000, анализ литературы, описание и анализ результатов исследования, формулирование выводов.

И. Л. Стрелкова – оптическая микроскопия, описание и анализ результатов исследования, формулирование выводов.

V. A. Ovcharenko – literary analysis, research by optical microscopy, uniaxial tensile testing, conducting heat treatment, description of research results.

A. S. Babaev – problem statement, analysis of research results, formulation of conclusions.

N. L. Savchenko – conducting X-ray phase analysis (XRD) on the XRD-6000 diffractometer, literary review, description and analysis of research results, formulation of conclusions.

I. L. Strelkova – research by optical microscopy, description and analysis of research results, formulation of conclusions.

Поступила в редакцию 02.09.2025

После доработки 25.09.2025

Принята к публикации 02.04.2026

Received 02.09.2025

Revised 25.09.2025

Accepted 02.04.2026



УДК 621. 793.79

DOI 10.17073/0368-0797-2026-3-258-264



Оригинальная статья
Original article

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЛАВА СИСТЕМЫ Co – Cr – Fe – Mn – Ni

Р. Е. Крюков, С. В. Коновалов, А. Р. Михно , И. А. Панченко

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

 mikno-mm131@mail.ru

Аннотация. В условиях НПЦ «Сварочные процессы и технологии» Сибирского государственного индустриального университета проведена наплавка разработанных порошковых проволок системы Co–Cr–Fe–Mn–Ni методом автоматической дуговой сварки под слоем флюса. Атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС-1 и рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре XRF-1800 определен химический состав образцов наплавленных покрытий. Результаты исследований указывают на возможность получения покрытий, состоящих из 60 – 70 % железа и 30 – 40 % легирующих элементов. С использованием металлографического микроскопа METAM PB-34 и программного комплекса NEXSYS ImageExpert проведены микроструктурные исследования образцов. В наплавленных образцах встречаются оксиды точечные балла 2а, силикаты недеформирующиеся балла 4а и 4б. По сравнению с подложкой (сталью 09Г2С) полученные наплавленные слои образцов заметно чище, однако образец К4 имеет меньшую загрязненность. Микроструктура первых наплавленных слоев представлена игольчатым мартенситом, что подтверждается результатами измерения микротвердости. Последующие слои наплавленных образцов представлены аустенитной кристаллической структурой. Причем структура имеет вытянутое (дендритное) строение, что присуще структурам, полученным методом дуговой наплавки. С помощью микротвердомера HVS-1000 по Микро-Виккерсу ГОСТ 9450 – 76 проведены исследования распределения микротвердости. Результаты указывают на получение сплава с твердостью, немного выше чем у используемой подложки, при этом стоит отметить, что в наплавленном слое присутствуют зоны с повышенной в два раза твердостью. Чаще всего повышение твердости наблюдается на первых наплавленных слоях.

Ключевые слова: порошковая проволока, электродуговая наплавка, неметаллические включения, микроструктура, микротвердость, химический состав

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00350, <https://rscf.ru/project/23-29-00350/>.

Для цитирования: Крюков Р.Е., Коновалов С.В., Михно А.Р., Панченко И.А. Металлографические исследования сплава системы Co–Cr–Fe–Mn–Ni. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2026;69(3):258–264. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-258-264>

METALLOGRAPHIC STUDIES OF THE ALLOY OF Co – Cr – Fe – Mn – Ni SYSTEM

R. E. Kryukov, S. V. Konovalov, A. R. Mikhno , I. A. Panchenko

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

 mikno-mm131@mail.ru

Abstract. In conditions of the Scientific and Production Center “Welding Processes and Technologies” of the Siberian State Industrial University, the developed flux-cored wires of the Co–Cr–Fe–Mn–Ni system were surfaced by automatic arc welding under a layer of flux. Chemical composition of the deposited coating samples was determined using the atomic emission method on the DFS-1 spectrometer and the X-ray fluorescence method on the XRF-1800 spectrometer. The research results indicate the possibility of obtaining coatings consisting of 60 – 70 % iron and 30 – 40 % alloying elements. Microstructural studies of the samples were carried out using the metallographic microscope METAM RV-34 and the NEXSYS ImageExpert software package. The deposited samples contain point oxides of grade 2a, non-deformable silicates of grade 4a, b. Compared with the substrate (09G2S steel), the resulting deposited layers of the samples are noticeably cleaner, however, K4 sample has less contamination. Microstructure of the first deposited layers is represented by needle-like martensite, which is confirmed by the results of microhardness measuring. Subsequent layers of the deposited samples are represented by an austenitic crystal structure. Moreover, the structure has an elongated (dendritic) structure, which is inherent in structures obtained by arc welding. The authors studied the microhardness distribution using the HVS-1000 microhardness tester according to Micro-Vickers GOST 9450 – 76. The results indicate the production of an alloy with a hardness slightly higher than that of the substrate used, while it is worth noting that the deposited layer contains zones with twice hardness. Most often, an increase in hardness is observed on the first deposited layers.

Keywords: flux-cored wire, electric arc surfacing, non-metallic inclusions, microstructure, microhardness, chemical composition

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-29-00350, <https://rscf.ru/project/23-29-00350/>.

For citation: Kryukov R.E., Kononov S.V., Mikhno A.R., Panchenko I.A. Metallographic studies of the alloy of Co–Cr–Fe–Mn–Ni system. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2026;69(3):258–264. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-258-264>

ВВЕДЕНИЕ

Уже на протяжении больше полувека с момента разработки первой порошковой проволоки используется технология сварки и наплавки металлических изделий высоколегированными сварочными материалами [1–3]. Наиболее распространенные наплавочные материалы – порошковые проволоки на железоуглеродистой основе, дополнительно содержащие различные тугоплавкие элементы (хром, вольфрам, молибден, титан, бор и др.) [4–6]. Использование таких материалов при проведении наплавочных работ позволяет значительно повысить эксплуатационные свойства и надежность изделий (прочность, твердость, пластичность, износостойкость и т. д.) [7; 8], а также снизить стоимость изготовления этих изделий за счет применения вторичных компонентов в шихте порошковых проволок [9; 10].

В условиях высокоэнергетического воздействия электрической дуги, температуры столба которой могут достигать 6200 К, в металле неразъемных соединений (основа – восстанавливаемая изношенная поверхность и электродуговое покрытие) протекает комплекс сложных взаимосвязанных физических, физико-химических и теплофизических явлений и процессов. Эти процессы сопровождаются изменением агрегатного состояния, микро- и макроструктуры, дислокационной субструктуры, химического и фазового составов основы и покрытия и определяют формирование комплекса свойств [11–13].

За счет применения легирующих компонентов в составе шихты порошковой проволоки возможно изменение химического состава наплавленного покрытия и, как следствие, изменение механических свойств изделий [14; 15].

Например, молибденовые стали в смеси с рядом других легирующих материалов способствуют получению высокотвердого покрытия, применение которого возможно при изготовлении быстрорежущих изделий [16; 17].

Хромистые стали с содержанием хрома свыше 12 % являются коррозионностойкими и жаропрочными при температурах до 600 °С. В зависимости от соотношения содержания в них углерода и хрома эти стали имеют различное структурное состояние: феррит, мартенсит, феррито-мартенсит. Хромистые стали используются для наплавки деталей различного назначения: плунжеры гидропрессов, прокатные валки, штампы, пускорегулирующая арматура [18; 19].

В зависимости от содержания легирующих элементов различное применение находят аустенитные стали. Нестабильные аустенитные стали применяются для наплавки деталей, испытывающих интенсивные ударно-динамические нагрузки, которые приводят к распаду аустенита и повышению твердости [20–22].

Целью настоящей работы являются изготовление и металлографические исследования металлического слоя, наплавленного порошковой проволокой системы Co–Cr–Fe–Mn–Ni.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчет компонентов шихтовых материалов разрабатываемой порошковой проволоки проводился по методике, представленной в работе [23]. В качестве используемых материалов для изготовления порошковой проволоки использовали металлические порошкообразные материалы: ПХ-1С (по ТУ 14-1-1474–75), МР-0 (по ГОСТ 6008–82), ПК-1у (по ГОСТ 9721–79), ПНК 1Л5 (по ГОСТ 9722–97). В качестве оболочки порошковой проволоки использована лента толщиной 0,5 мм шириной 15 мм из нержавеющей стали AISI 304. Изготовление порошковой проволоки производилось на лабораторной установке НПЦ «Сварочные процессы и технологии» СибГИУ. Диаметр изготавливаемой проволоки 4 мм.

Наплавку изготовленной проволоки осуществляли в несколько проходов (4–5) на подложку из конструкционной низколегированной стали 09Г2С с использованием сварочного трактора АОТАI ASAW-1250 под сварочным флюсом АН-348А. Использовался следующий (ранее подобранный) режим наплавки: ток 420 А; напряжение 38 В; скорость наплавки 15 см/мин.

Для подготовки изготовленных образцов к исследованию использовался ленточнопильный станок REALREZ M51 и шлифовально-полировальный станок MODUL MP-1000.

Определение химического состава наплавленных покрытий проводилось с использованием оборудования ЦКП «Материаловедение» СибГИУ, атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС-71 и рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре XRF-1800.

Металлографические исследования проводились с использованием металлографического микроскопа METAM PB-34 и программного комплекса NEXSYS ImageExpert. Оценку неметаллических включений наплавленных слоев осуществляли согласно методике, указанной в ГОСТ 1778–2022, при увеличении 100[×].

Таблица 1. Составы шихты порошковой проволоки

Table 1. Compositions of flux-cored wire charge

Маркировка образца	Используемые компоненты шихты порошковой проволоки, г			
	ПХ-1С (Хром)	МР-0 (Марганец)	ПК-1у (Кобальт)	ПНК 1Л5 (Никель)
К3	10	35	40	15
К4	10	40	35	15

Изучение микроструктуры проводилось при увеличении 100[×], 400[×], 1000[×].

Замеры микротвердости исследуемых образцов проводились с использованием микротвердомера HVS-1000 по Микро-Виккерсу (ГОСТ 9450 – 76) путем вдавливания алмазной пирамидки. Испытательная нагрузка 9,8 Н, длительность приложения нагрузки 10 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для проведения исследований путем многопроходной наплавки изготовлены образцы (рис. 1), отличающиеся между собой концентрацией легирующих элементов в порошковой проволоке (табл. 1).

Результаты химического анализа наплавленного слоя приведены в табл. 2. По полученным данным определено, что наплавленный металл состоит из 60 – 70 % железа и 30 – 40 % легирующих элементов.

Загрязненность наплавленного слоя (рис. 2) изучали по торцу наплавленного образца. Согласно шкалам сравнения (ГОСТ 1778 – 2022) в наплавлен-

ных образцах встречаются оксиды точечные, балл 2а, силикаты недеформирующиеся, балл 4а и 4б. Определено, что образец К4 имеет меньшую загрязненность, чем образец К3, однако по сравнению с подложкой

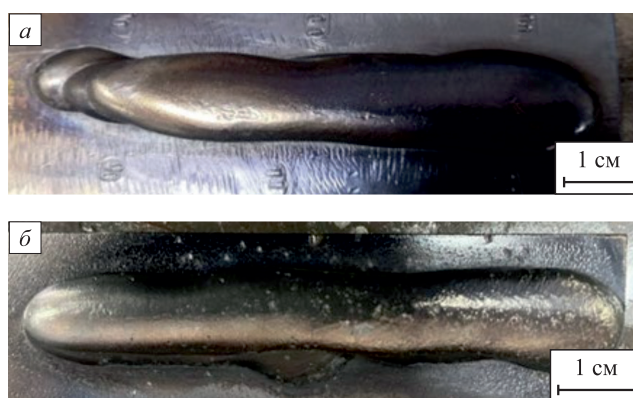


Рис. 1. Характерный вид наплавленных образцов: а – образец К3; б – образец К4

Fig. 1. Characteristic appearance of deposited samples: а – sample K3; б – sample K4

Таблица 2. Химический состав наплавленных образцов

Table 2. Chemical composition of deposited samples

Маркировка образца	Массовая доля элементов, %												
	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	W	V	Mo	Al	S	P	Co	Fe
К3	0,83	4,80	17,88	9,47	0,03	0,048	0,078	0,017	0,24	0,008	0,038	5,98	остальное
К4	0,75	5,73	17,06	11,39	0,03	0,110	0,072	0,019	0,18	0,012	0,035	5,44	остальное

Таблица 3. Результаты измерения микротвердости (HV) наплавленных образцов

Table 3. Results of measurement of microhardness (HV) of deposited samples

Маркировка образца	Микротвердость в точке замера																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
К3	176	161	149	155	175	182	164	161	150	146	148	154	157	142	145	186	162
К4	143	138	139	140	132	132	144	139	137	135	136	146	152	137	127	309	313
Маркировка образца	Микротвердость в точке замера								Основной металл (подложка)	Среднее значение, HV							
	18	19	20	21	22	23	24	25									
К3	160	149	155	126	167	147	220	126	120 – 130	159							
К4	138	124	123	125	127	129	131	192			151						

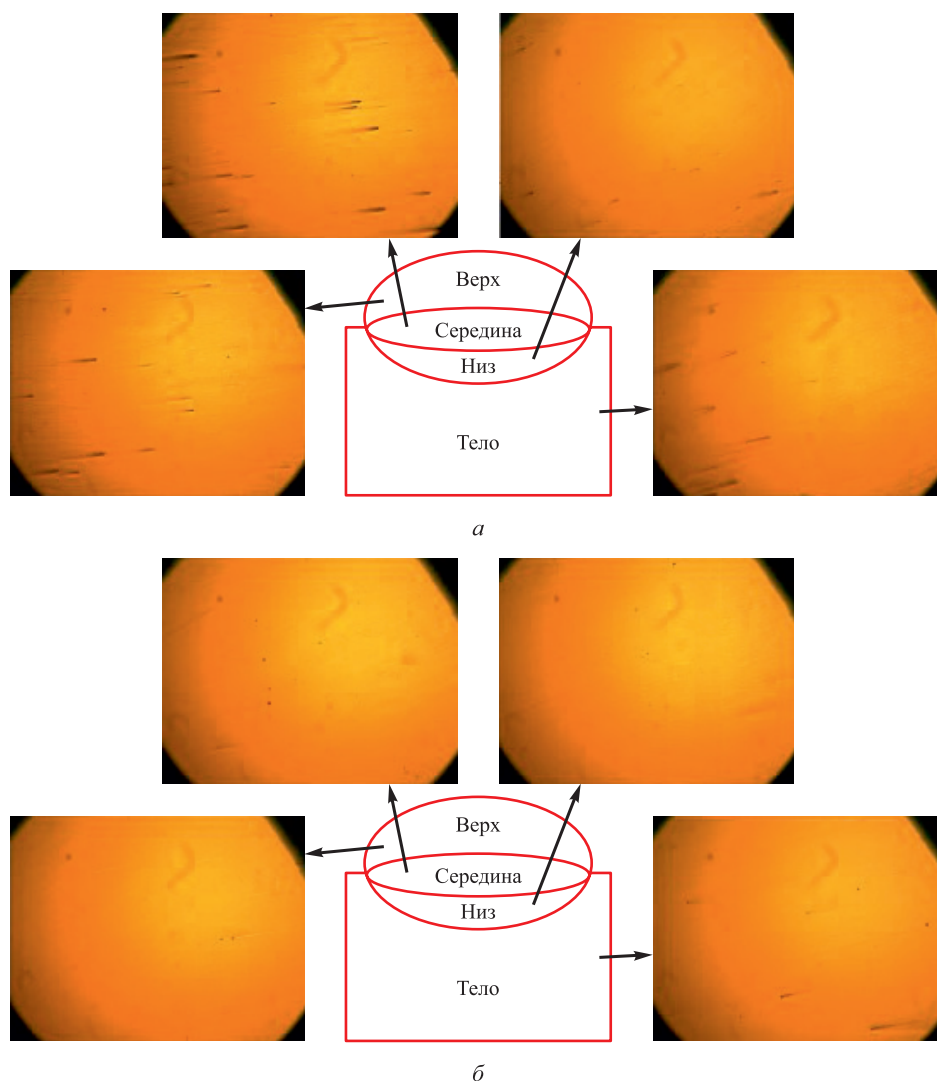


Рис. 2. Загрязненность образцов К3 (а) и К4 (б) неметаллическими включениями

Fig. 2. Contamination of samples K3 (a) and K4 (б) with nonmetallic inclusions

(сталью 09Г2С) полученные наплавленные слои образцов заметно чище.

На рис. 3 представлена схема расположения точек замера микротвердости образцов.

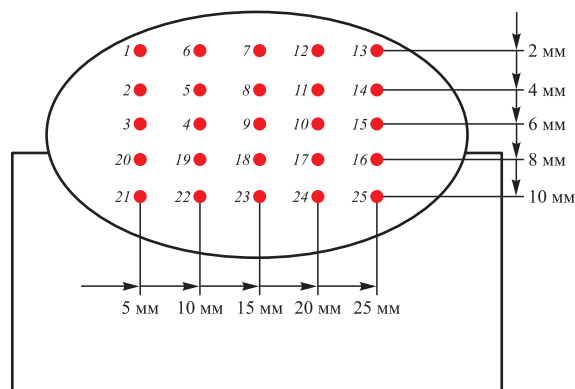


Рис. 3. Схема расположения точек измерения микротвердости

Fig. 3. Arrangement of microhardness measuring points

Результаты измерения микротвердости (табл. 3) указывают на то, что микротвердость наплавленных порошковыми проволоками системы Co–Cr–Fe–Mn–Ni слоев немного выше, чем микротвердость используемой подложки. При этом стоит отметить, что в наплавленном слое присутствуют зоны с повышенной в два раза микротвердостью. Чаще всего повышение микротвердости наблюдается на первых наплавленных слоях.

Анализ микроструктуры (рис. 4) проводился после травления наплавленных образцов царской водкой. Результаты проведенного анализа указывают на то, что подложка имеет феррито-перлитную структуру. На первых слоях наплавленного слоя встречается игольчатый мартенсит, что подтверждено результатами измерения микротвердости. Последующие слои наплавленных образцов представлены аустенитной кристаллической структурой. Причем структура имеет вытянутое (дендритное) строение, что присуще структурам образцов, полученных методом дуговой наплавки.

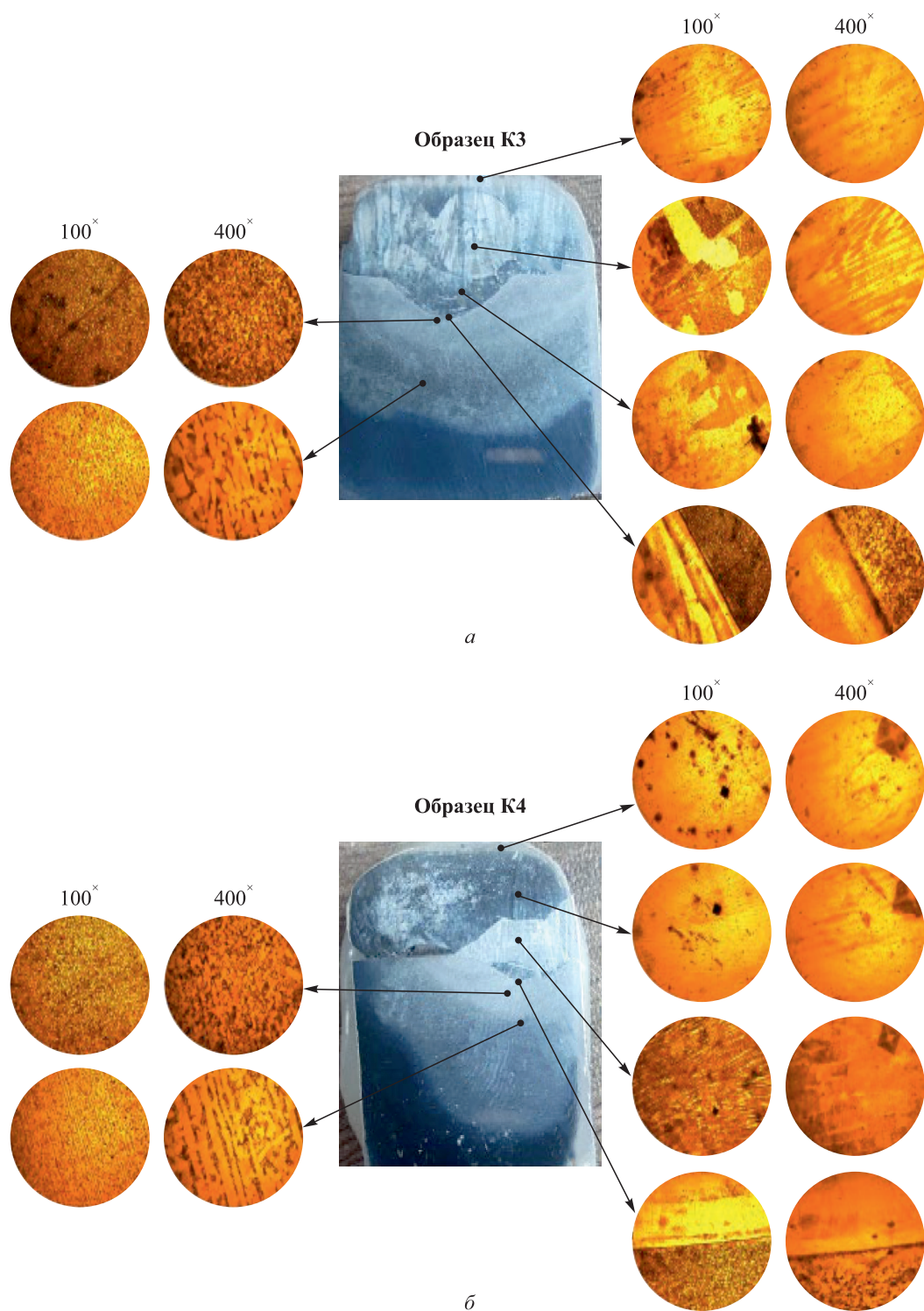


Рис. 4. Микроструктура образцов К3 (а) и К4 (б)

Fig. 4. Microstructure of samples K3 (a) and K4 (b)

Выводы

Проведенные исследования подтвердили принципиальную возможность формирования порошковыми проволоками системы Co–Cr–Fe–Mn–Ni покрытий с содержанием железа 60–70 % и суммарной долей легирующих элементов 30–40 %.

Оценка неметаллических включений показала, что в наплавленных образцах наблюдаются точечные оксиды (балл 2а) и недеформирующиеся силикаты (балл 4а и 4б). Образец К4 характеризуется меньшей загрязненностью по сравнению с К3, при этом слои наплавленных образцов имеют существенно более высокую чистоту, чем подложка из стали 09Г2С.

Микротвердость наплавленного металла незначительно превышает микротвердость подложки. В структуре выявлены локальные зоны (преимущественно в первых слоях), где микротвердость возрастает вдвое, что связано с формированием игольчатого мартенсита.

Микроструктурный анализ показал, что начальные слои наплавки содержат игольчатый мартенсит, тогда как последующие слои имеют аустенитную кристаллическую решётку с вытянутой дендритной морфологией, характерной для дуговой наплавки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Михайлицын С.В., Зверева И.Н., Шекшеев М.А. Сварочные и наплавочные материалы. Москва: Инфра-Инженерия; 2020:228.
2. Износостойкие наплавки: свойства, структура и фазовый состав / С.В. Райков, В.Е. Громов, Р.Е. Крюков, А.С. Князев. Новокузнецк: Полиграфист; 2024:179.
3. Varinov S.V., Zagorodskikh B.P., Simdyankin A.A. A study of the wear resistance of parts with an inhomogeneous friction surface. *Journal of Friction and Wear*. 2003;24(5):568–572.
4. Козырев Н.А., Шурупов В.М., Кушнарченко Н.Н., Козырева О.Е., Титов Д.А. Использование вольфрамсодержащих руд при наплавке. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2015;58(8):567–571. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-8-567-571>
Kozyrev N.A., Shurupov V.M., Kushnarenko N.N., Kozyreva O.E., Titov D.A. The usage of tungsten-containing ores at welding. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2015;58(8):567–571. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-8-567-571>
5. Kumar V.A., Murty S.V.S.N., Gupta R.K., Rao A.G., Prasad M.J.N.V. Effect of boron on microstructure evolution and hot tensile deformation behavior of Ti-5Al-5V-5Mo-1Cr-1Fe alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;831:154672. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154672>
6. Artem'ev A.A., Sokolov G.N., Zorin I.V., Dubtsov Yu.N., Antonov A.A., Lysak V.I. Formation of structure in clad abrasion-resistant alloys of the Fe – Cr – C – Mo – Ni – Ti – B system under the effect of ultrafine particles of titanium nitride. *Metal Science and Heat Treatment*. 2020;61(11-12):724–730. <https://doi.org/10.1007/s11041-020-00490-8>
7. Winkelmann H., Badisch E., Varga M., Danninger H. Wear mechanisms at high temperatures. Part 3: Changes of the wear mechanism in the continuous impact abrasion test with increasing testing temperature. *Tribology Letters*. 2010;37(2):419–429. <https://doi.org/10.1007/s11249-009-9534-3>
8. Kolokolov E.I., Pirozhkov R.V., Tomilin S.A. Applicability of 110G13P type powder steel for production of consolidation details of high parameters power fittings. *In the World of Scientific Discoveries, Series B*. 2014;2(2):29–35.
9. Козырев Н.А., Титов Д.А., Старовацкая С.Н., Шурупов В.М., Горюшкин В.Ф. Изучение влияния введения в шихту для производства порошковой проволоки системы C – Si – Mn – Cr – W – V углеродфторсодержащей добавки и никеля. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2014;57(6):31–33. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-6-31-33>
10. Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Шурупов В.М., Кибко Н.В., Башченко Л.П. Изучение процесса восстановления вольфрама из оксида при наплавке порошковыми проволоками. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019;62(3):215–221. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-3-215-221>
Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Shurupov V.M., Kibko N.V., Bashchenko L.P. Tungsten recovery from oxide during flux cord wire surfacing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019;62(3):215–221. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-3-215-221>
11. Tseng S.F., Hung T.Y., Chang C.M. Mechanical and microstructural properties of additively manufactured Ti–6Al–4V stents with CO₂ laser postannealing treatment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;119(9-10):6571–6581. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08381-9>
12. Григоренко Г.М., Коржик В.Н., Адеева Л.И., Туник А.Ю., Степанюк С.Н., Карпец М.В., Дорошенко Л.К., Лютик Н.П., Чайка А.А. Особенности металлургических процессов при плазменно-дуговом напылении покрытий, полученных из порошковой проволоки со стальной оболочкой и наполнителями В₄С и В₄С+ZrO₂. *Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2016;(32):125–137.
Grigorenko G.M., Korzhik V.N., Adeeva L.I., Tunik A.Yu., Stepanyuk S.N., Karpets M.V., Doroshenko L.K., Lyutik N.P., Chaika A.A. Peculiar features of metallurgical processes at plasma-arc spraying of coatings, made of steel wire with powder fillers В₄С and В₄С+ZrO₂. *Bulletin of the Azov State Technical University. Series: Technical Sciences*. 2016;(32):125–137. (In Russ.).
13. Peleshenko S., Korzhyk V., Voitenko O., Khaskin V., Tkachuk V. Analysis of the current state of additive welding technologies for manufacturing volume metallic products (review). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017;3(1(87)):42–52. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.99666>
14. Sheksheev M.A., Shiriaeva E.N., Mikhailitsyn S.V. Investigation of the influence of ultrafine particles of refractory materials on the formation of the structure and properties of the deposited metal. *AIP Conference Proceedings*. 2022;2503(1):060007. <https://doi.org/10.1063/5.0099350>
15. Krokhaliev A.V., Kharlamov V.O., Kuz'min S.V., Lysak V.I., Grinberg B.A. Fine structure of interphase boundaries in hard alloys of the chromium carbide–titanium system. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2016;57(5):504–508. <https://doi.org/10.3103/S1067821216050096>
16. Malushin N.N., Romanov D.A., Kovalev A.P., Osetkovskii V.L., Bashchenko L.P. Structural-phase state of a high-hardness heatresistant alloy formed by plasma cladding in a nitrogen atmosphere and high-temperature tempering. *Russian Physics Journal*. 2020;62(10):1865–1870. <https://doi.org/10.1007/s11182-020-01917-8>
17. Малушин Н.Н., Валуев Д.В. Плазменная наплавка и азотирование наплавленных деталей горно-металлур-

гического комплекса. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2012;(12):105–108.

Malushin N.N., Valuev D.V. Plasma surfacing and nitriding of deposited parts of the mining and metallurgical complex. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2012;(12):105–108. (In Russ.).

18. Belkahla Y., Mazouzi A., Lebouachera S.El.I., Hassan A.J., Fides M., Hvizdoš P., Cheniti B., Miroud D. Rotary friction welded C45 to 16NiCr6 steel rods: statistical optimization coupled to mechanical and microstructure approaches. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;116(7):2285–2298.
<https://doi.org/10.1007/s00170-021-07597-z>
19. Liu J.-Z., Zhang L.-J., Yang H.-X., Xie M.-X., Shang X.-T., Zhang J.-X. Enhancement of corrosion protection performance of SUS304/Q235B dissimilar metals lap joint through fiber laser. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;96(1-4):789–802.
<https://doi.org/10.1007/s00170-018-1634-5>
20. Zavadoveev A., Pozniakov V., Baudin T., Kim H.S., Klochkov I., Motrunich S., Heaton M., Aquier P., Rogante M.,

Denisenko A., Gajvoronskiy A., Skoryk M. Optimization of the pulsed arc welding parameters for wire arc additive manufacturing in austenitic steel applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;119(7-8):5175–5193.

<https://doi.org/10.1007/s00170-022-08704-4>

21. Yadaiah N., Bag S., Paul C.P., Kukreja L.M. Influence of self-protective atmosphere in fiber laser welding of austenitic stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;86(1-4):853–870.
<https://doi.org/10.1007/s00170-015-8194-8>
22. Liu H.H., Wang L.B., Liu W.J., Li L.Y., Yue J.F. Influence of AC magnetic field on the cladding layer during the micro beam plasma welding of austenitic stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;97(9):3459–3468.
<https://doi.org/10.1007/s00170-018-2182-8>
23. Разработка технологии изготовления электродов и порошковых проволок для сварки и родственных процессов: учебно-методическое пособие / А.С. Табатчиков, Ю.С. Коробов, Н.М. Разиков, Л.А. Онищенко; под общ. ред. Ю.С. Коробова. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та; 2023:112.

Сведения об авторах

Information about the Authors

Роман Евгеньевич Крюков, д.т.н., профессор кафедры механики и машиностроения, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-3394-7941

E-mail: rek_nzrmk@mail.ru

Сергей Валерьевич Коновалов, д.т.н., проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0003-4809-8660

E-mail: konovalov@sibsiu.ru

Алексей Романович Михно, директор НПЦ «Сварочные процессы и технологии», Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-7305-6692

E-mail: mikno-mm131@mail.ru

Ирина Алексеевна Панченко, к.т.н., старший научный сотрудник управления научных исследований, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-1631-9644

E-mail: i.r.ss@yandex.ru

Roman E. Kryukov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Mechanics and Machine Engineering, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-3394-7941

E-mail: rek_nzrmk@mail.ru

Sergei V. Konovalov, Dr. Sci. (Eng.), Vice-Rector for Research and Innovation, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0003-4809-8660

E-mail: konovalov@sibsiu.ru

Aleksei R. Mikhno, Director of the Scientific and Production Center “Welding Processes and Technologies”, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-7305-6692

E-mail: mikno-mm131@mail.ru

Irina A. Panchenko, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Department of Scientific Research, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-1631-9644

E-mail: i.r.ss@yandex.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

Р. Е. Крюков – формирование основной идеи исследований, разработка плана исследований, постановка задач, анализ результатов исследований.

С. В. Коновалов – анализ результатов исследований, консультирование в проведении исследований

А. Р. Михно – обработка полученных результатов, оформление статьи.

И. А. Панченко – организация исследований образцов, анализ результатов исследований.

R. E. Kryukov – formation of the research main idea, development of the research plan, setting tasks, analysis of results.

S. V. Konovalov – analysis of results, consulting in conducting research

A. R. Mikhno – processing of results, design of the article.

I. A. Panchenko – organization of the samples research, analysis of results.

Поступила в редакцию 09.06.2025

После доработки 27.03.2026

Принята к публикации 01.04.2026

Received 09.06.2025

Revised 27.05.2026

Accepted 01.04.2026



УДК 669.13.018

DOI 10.17073/0368-0797-2026-3-265-271

Оригинальная статья
Original article

ПРОЧНОСТЬ И МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ СЕРОГО ЧУГУНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ НАГРУЖЕНИЯ. Часть 1. СТАТИЧЕСКАЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ ОБРАЗЦОВ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ И КРУЧЕНИИ

Г. В. Клевцов¹✉, М. Л. Линдеров¹, Н. А. Клевцова¹,
М. В. Фесенюк², М. Н. Тюрков¹, И. Н. Пигалева¹

¹ Тольяттинский государственный университет (Россия, 445667, Самарская обл., Тольятти, Белорусская ул., 14)

² АО «ПО «Стрела» (Россия, 460005, Оренбург, ул. Шевченко, 26)

✉ klevtsov11948@mail.ru

Аннотация. Авторы исследовали образцы из феррито-перлитного серого чугуна СЧ15 в литом состоянии ($\sigma_b = 121 \pm 7$ МПа). Растяжение цилиндрических образцов диаметром 20 мм осуществляли на испытательной машине Н50КТ. Испытания чугуна на статическую трещиностойкость проводились при температурах 20, -70 и -196 °С на призматических образцах толщиной 10 и 20 мм по схеме трехточечного изгиба на установке Instron 8801. Авторы оценивали выполнение условий плоской деформации (ПД) по критерию $t/(K_Q/\sigma_{0.2})^2 \geq 0,6$, указанному в ГОСТ 25.506 – 85, а также по критерию $h_{\max}/t < 10^{-2}$, где h_{\max} – максимальная глубина пластической зоны под поверхностью изломов, t – толщина образца. Глубину пластических зон под поверхностью изломов определяли рентгеновским методом. Испытание на кручение цилиндрических образцов с диаметром рабочей части 10 мм и длиной 50 мм проводили при температуре 20 °С на установке МК-50. Авторы исследовали микрорельеф поверхности изломов с помощью растрового микроскопа SIGMA фирмы «ZEISS». Испытания чугуна на статическую трещиностойкость показали, что условие ПД по ГОСТ 25.506 – 85 соблюдается только в образцах толщиной 20 мм при температуре -70 °С. Однако, согласно критерию h_{\max}/t , условие ПД соблюдается для всех образцов, независимо от толщины и температуры испытания. Таким образом, полученные значения статической трещиностойкости ($20,6 \pm 1,5$ МПа·м^{1/2}) соответствуют K_{1C} . В области статического разрушения, независимо от толщины образцов и температуры испытания, разрушение чугуна происходило по механизму межзеренного хрупкого разрушения и скола. Результаты испытания на кручение показали, что зарождение трещин происходит на графитовых включениях вблизи поверхности образцов. Дальнейшее разрушение произошло под некоторым углом к сечению образца по механизму скола.

Ключевые слова: серый чугун, структура, прочность, механизм разрушения, статическая трещиностойкость, макро- и микрорельеф изломов, растяжение, кручение

Для цитирования: Клевцов Г.В., Линдеров М.Л., Клевцова Н.А., Фесенюк М.В., Тюрков М.Н., Пигалева И.Н. Прочность и механизм разрушения серого чугуна при различных видах нагружения. Часть 1. Статическая трещиностойкость и прочность образцов при растяжении и кручении. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2026;69(3):265–271. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-265-271>

STRENGTH AND FAILURE MECHANISM OF GRAY CAST IRON UNDER VARIOUS LOADING CONDITIONS. PART 1. STATIC CRACK RESISTANCE, TENSILE AND TORSIONAL STRENGTH OF THE SAMPLES

G. V. Klevtsov¹ , M. L. Linderov¹, N. A. Klevtsova¹,
M. V. Fesenyuk², M. N. Tyur'kov¹, I. N. Pigaleva¹

¹ **Togliatti State University** (14 Belorusskaya Str., Togliatti, Samara Region 445667, Russian Federation)

² **JSC Production Association “Strela”** (26 Shevchenko Str., Orenburg 460005, Russian Federation)

 klevtsov11948@mail.ru

Abstract. The authors studied the samples of as-cast ferritic-pearlitic GG15 gray cast iron with lamellar graphite ($\sigma_u = 121 \pm 7$ MPa). Tension of 20 mm diameter cylindrical samples was performed on N50KT testing machine. Static crack resistance tests of cast iron were carried out at temperatures of 20, -70 and -196 °C on 10 and 20 mm thick prismatic samples using a three-point bending scheme on Instron 8802 testing machine. The authors estimated the implementation of plane strain (PS) conditions by the $t/(K_{IC}/\sigma_{0.2})^2 \geq 0.6$ criterion specified in GOST 25.506 – 85, as well as by the $h_{max}/t < 10^{-2}$ criterion, where h_{max} is the maximum depth of the plastic zone under the fracture surface, t is the sample thickness. Depth of the plastic zones beneath the fractures surface was determined using X-ray diffraction. Tensile tests on cylindrical samples with a 10 mm diameter and 50 mm length were conducted at 20 °C using MK-50 tester. The authors examined the fractures surface microrelief using SIGMA scanning electron microscope (ZEISS). Static crack resistance tests of cast iron showed that at 20 °C, the PS condition according to GOST 25.506 – 85 is met only for 20 mm thick samples at -70 °C. However, according to the h_{max}/t criterion, the PS condition is met for all the samples, regardless of thickness and testing temperature. Therefore, the obtained static crack resistance values (20.6 ± 1.5 MPa·m^{1/2}) correspond to K_{IC} . To evaluate the PS conditions of GG15 cast iron, it is proposed to use the criterion $t/(K_{IC}/\sigma_{0.2})^2 \geq 0.38$. In the static failure area, regardless of the sample thickness and test temperature, cast iron destruction occurred via intergranular brittle failure and cleavage mechanisms. Results from tensile tests of the samples showed that crack initiation occurred at graphite inclusions near the sample surface. Subsequent sample failure occurred at an angle to the sample cross-section by a cleavage mechanism.

Keywords: gray cast iron, structure, strength, failure mechanism, static crack resistance, fracture macrorelief, fracture microrelief, tension, torsion

For citation: Klevtsov G.V., Linderov M.L., Klevtsova N.A., Fesenyuk M.V., Tyur'kov M.N., Pigaleva I.N. Strength and failure mechanism of gray cast iron under various loading conditions. Part 1. Static crack resistance, tensile and torsional strength of the samples. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2026;69(3):265–271. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-265-271>

ВВЕДЕНИЕ

Чугун является основным литейным конструкционным материалом для изготовления отливок деталей сложной конфигурации, испытывающих в процессе эксплуатации не только сжимающие, но и другие виды нагружения. Одна из специфических особенностей микроструктуры промышленных чугунов – это, прежде всего, ярко выраженная гетерогенность, обусловленная наличием в металлической матрице включений графита [1; 2]. В процессе приложения нагрузки межфазная граница между включением графита и металлической матрицей или само включение могут служить местом зарождения трещины. Поэтому форма графита, наряду с металлической основой и другими факторами, оказывает существенное влияние на прочностные свойства чугунов [2 – 6]. В меньшей степени изучено влияние графитовых включений на статическую трещиностойкость чугунов [7 – 9], особенно в серых чугунах, где форма графита самая неблагоприятная. В дальнейшем трещина может распространяться по металлической матрице, огибая или разрушая графитовые включения [3; 10; 11]. Анализ механизмов разрушения промышленных чугунов посвящены работы [3; 7 – 15].

Так, в работах [11; 15] отмечено, что анализ результатов фрактографических исследований динамически разрушенных образцов показал, что разрушение серого чугуна СЧ35 и легированного износостойкого чугуна ЧМН-35М происходит по хрупкому типу с явным преобладанием межзеренного механизма.

При испытании образцов на статическую трещиностойкость (K_{IC}) одним из основных критериев реализации у вершины трещины условий плоской деформации, согласно ГОСТ 25.506 – 85 [16], является $t/(K_{IC}/\sigma_{0.2})^2 \geq 2,5$ для сталей, алюминиевых, титановых, магниевых сплавов и $t/(K_{IC}/\sigma_{0.2})^2 \geq 0,6$ для чугунов, где t – толщина образца или детали в месте разрушения; $\sigma_{0.2}$ – предел текучести материала. Основываясь на том, что согласно положению механики разрушения наиболее объективную информацию о локальном напряженном состоянии материала в момент разрушения дает анализ размеров и формы пластических зон, образующихся у вершины трещины [17], в работе [18] предложен единый критерий оценки локального напряженного состояния материала у вершины трещины при различных видах нагружения (статическом, ударном) как отношение максимальной глубины пластической зоны под поверхностью изломов h_{max} к толщине образца или

детали t , т. е. h_{\max}/t . Согласно данному критерию, при плоской деформации (ПД) отношение $h_{\max}/t < 10^{-2}$; при плоском напряженном состоянии (ПН) $h_{\max}/t > 10^{-1}$, в переходной области (ПД ↔ ПН) $10^{-2} \leq h_{\max}/t \leq 10^{-1}$ [18].

Целью настоящей работы являются оценка прочности и выявление особенности механизма разрушения серого чугуна с пластинчатым графитом при испытании образцов на растяжение, статическую трещиностойкость и кручение.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исследуемого материала был выбран промышленный феррито-перлитный серый чугун СЧ15 (GG15) (3,3 % С, 1,8 % Si, 0,75 % Mn) в литом состоянии. Исследование структуры чугуна проводили на металлографическом микроскопе Axiovert 40 MAT; испытания на твердость – на твердомере ТН 300. Статическое растяжение литых цилиндрических образцов диаметром 20 мм осуществляли при температурах 20, –70 и –196 °С на универсальной испытательной машине Н50КТ согласно ГОСТ 1497 – 84 и ГОСТ 22706 – 77. Испытания чугуна на статическую трещиностойкость проводились при температурах 20, –70 и –196 °С на призматических образцах толщиной 10 и 20 мм по схеме трехточечного изгиба на установке Instron 8801 согласно ГОСТ 25.506 – 85. Испытание на кручение цилиндрических образцов с диаметром рабочей части 10 мм и длиной 50 мм осуществляли при температуре 20 °С на установке МК–50 согласно ГОСТ 3565 – 80. По диаграмме «Крутящий момент – угол закручивания» рассчитывали механические свойства чугуна при кручении. Микрорельеф поверхности изломов исследовался на растровом электронном микроскопе (РЭМ) SIGMA фирмы «ZEISS».

При испытании чугуна на статическую трещиностойкость оценку локального напряженного состояния материалов у вершины трещины проводили по основному критерию $t/(K_{1C}/\sigma_{0,2})^2$, указанному в ГОСТ 25.506 – 85 [16], а также по критерию h_{\max}/t [18]. Для определения глубины пластических зон под поверхностью изломов использовали метод послойного стравливания излома с последующим рентгенографированием его поверхности [18]. Глубину пла-

стических зон под поверхностью излома определяли по изменению ширины рентгеновских дифракционных линий (211) $FeK_{\alpha 1}$ после многократного стравливания. Съемку поверхности изломов проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-2.0 в FeK_{α} излучении.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Структура и механические свойства чугуна СЧ15 при растяжении

Чугун СЧ15 имеет феррито-перлитную структуру с пластинчатым графитом со средним размером зерна 80 мкм (рис. 1) и обладает невысокими прочностными свойствами при растяжении (табл. 1). При всех температурах испытания образцы разрушались хрупко. Изломы – кристаллические крупнозернистые.

Локальное напряженное состояние, статическая трещиностойкость и механизм разрушения образцов из чугуна СЧ15

Испытания на статическую трещиностойкость призматических образцов толщиной 10 и 20 мм из чугуна СЧ15 показали, что при температуре 20 °С, независимо от толщины образцов, условие ПД по ГОСТ 25.506 – 85

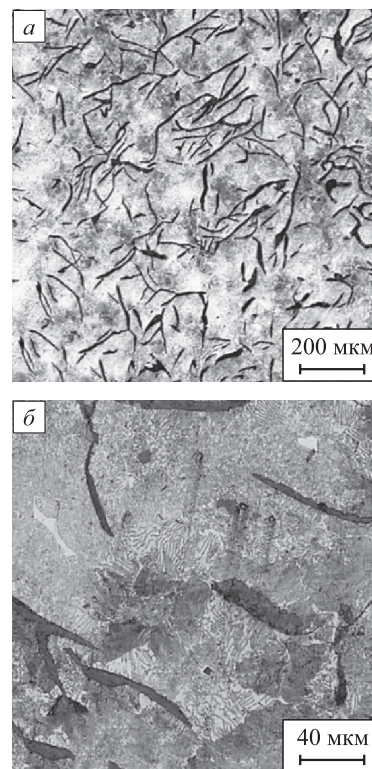


Рис. 1. Микроструктура (а) и перлитная область (б) чугуна СЧ15: а – 100×; б – 500×

Fig. 1. Microstructure (a) and pearlitic area (b) of GG15 cast iron: a – 100×, б – 500×

Таблица 1. Средний размер зерна (d_{cp}) и механические свойства чугуна СЧ15 при растяжении

Table 1. Average grain size (d_{cp}) and mechanical properties of GG15 cast iron under tension

Материал	d_{cp} , мкм	НВ	T , °С	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
СЧ15	80	163	20	121 ± 7	105 ± 8	2,0 ± 0,8
			–70	131 ± 5	120 ± 15	0,7 ± 0,6
			–196	142 ± 12	131 ± 15	1,5 ± 0,5

Таблица 2. Статическая трещиностойкость и критерии реализации условий ПД в образцах толщиной 10 и 20 мм по ГОСТ 25.506 – 85 и h_{\max}/t

Table 2. Static crack resistance and criteria for implementation of PD conditions in samples with a thickness of 10 and 20 mm, according to GOST 25.506 – 85 and h_{\max}/t

T, °C	10 мм			20 мм		
	$K_{1C}(K_C)$, МПа·м ^{1/2}	$t/(K_Q/\sigma_{0,2})^2 \geq 0,6$	$h_{\max}/t < 10^{-2}$	$K_{1C}(K_C)$, МПа·м ^{1/2}	$t/(K_Q/\sigma_{0,2})^2 \geq 0,6$	$h_{\max}/t < 10^{-2}$
20	21,6 ± 1,5	0,24	3,50 · 10 ⁻³	21,2 ± 1,4	0,49	1,75 · 10 ⁻³
-70	–	–	–	19,4 ± 1,2	0,77	1,00 · 10 ⁻³
-196	20,2 ± 1,3	0,42	1,50 · 10 ⁻³	–	–	–

($t/(K_{1C}/\sigma_{0,2})^2 \geq 0,6$) не соблюдается (табл. 2). Следовательно, полученные значения статической трещиностойкости, согласно вышеуказанному ГОСТу, соответствуют величине КС. Однако, по критерию $h_{\max}/t < 10^{-2}$ условие ПД для всех образцов, испытанных при 20 °С, соблюдается. Таким образом, полученное значение трещиностойкости, согласно данному критерию, есть K_{1C} [17].

При понижении температуры испытания условие ПД по ГОСТ 25.506 – 85 в образцах толщиной 10 мм не выполняется вплоть до температуры –196 °С, а в образцах толщиной 20 мм условие ПД соблюдается уже при температуре –70 °С (табл. 2). Таким образом, по критерию $h_{\max}/t < 10^{-2}$ условие ПД выполняется для всех образцов, испытанных как при комнатной температуре, так и при низких температурах (табл. 2). Следовательно, полученные значения трещиностойкости соответствуют K_{1C} .

Рассмотрим фрактографические особенности строения изломов образцов из чугуна СЧ15, испытанных на статическую трещиностойкость при различных температурах испытания. Разрушение образцов в области

статического разрушения чугуна, независимо от толщины и температуры испытания, произошло макрорупко (рис. 2, а – з). Микрофрактографический анализ области статического разрушения образцов показал, что независимо от толщины образцов и температуры испытания разрушение чугуна произошло по механизму межзеренного хрупкого разрушения и механизму скола (рис. 2, д – з). Причем, на поверхности изломов образцов, разрушенных при 20 °С, доминирует скол (рис. 2, д, ж), а на поверхности изломов образцов, разрушенных при низких температурах, доминирует межзеренное хрупкое разрушение (рис. 2, е, з). Графитовые включения при всех температурах испытания разрушились рупко.

Прочность и механизм разрушения чугуна СЧ15 при кручении

Результаты испытания на кручение образцов из чугуна СЧ15 диаметром 10 мм показали низкое значение крутящего момента и малый угол закручивания (рис. 3) по сравнению с углом закручивания образцов

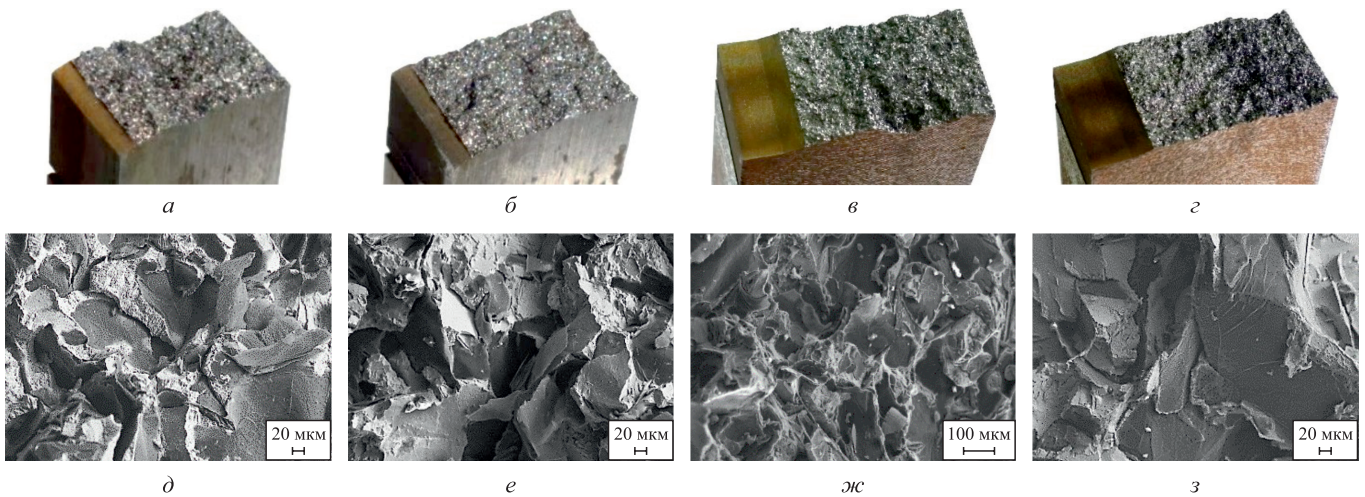


Рис. 2. Общий вид изломов образцов из чугуна СЧ15 толщиной 10 (а, б) и 20 мм (в, г) толщиной полученных при температурах 20 (а, в), –196 (б) и –70 °С (г), а также микрорельеф соответствующих изломов в области статического разрушения (д – з); д, е, з – 200×; ж – 100×

Fig. 2. General view of fractures of GG15 cast iron samples 10 (a, б) and 20 mm (в, г) thick obtained at temperatures of 20 (a, в), –196 (б) and –70 °С (г), and microrelief of the corresponding fractures in the static failure area (д – з); д, е, з – 200×; ж – 100×

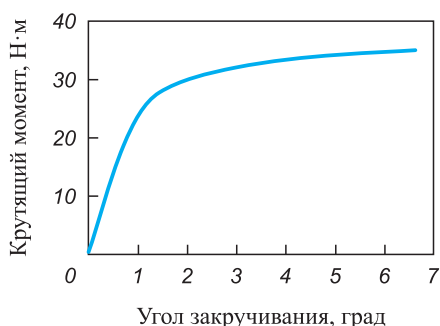


Рис. 3. Характерный вид диаграммы «Крутящий момент – угол закручивания» образцов из чугуна СЧ15

Fig. 3. Typical appearance of the “Torque – twist angle” diagram for GG15 cast iron samples

такого же диаметра, но из другой материала, например, аустенитной стали [19]. Оценка механических свойств чугуна при кручении, проведенная по результатам анализа диаграмм «Крутящий момент – угол закручивания», показала низкое сопротивление серого чугуна крутящим нагрузкам (табл. 3).

Изломы, полученные при испытании образцов из чугуна на кручение – макроразрывные, кристаллические. Разрушение произошло частично под углом к плоскости сечения образцов (рис. 4, а) по механизму скола (рис. 4, б – з). В периферийной области изломов можно видеть частичное затирание микрорельефа, возникшее от трения с ответной поверхностью, а также хрупкое разрушение графитовых включений (рис. 4, б). Следовательно, можно предположить, что разрушение при кручении образцов из чугуна, как и в случае разрушения образцов из стали [19], началось с периферийной

области, затем произошло хрупкое разрушения образца по всему сечению.

АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одним из факторов, влияющих на прочность и механизм разрушения чугуна СЧ15, являются имеющиеся в его структуре пластинчатые графитовые включения, выполняющие роль концентраторов напряжения. При испытании образцов из серого чугуна на статическую трещиностойкость данный фактор, по-видимому, не должен оказывать существенного влияния на результаты испытаний, так как в образцах перед испытанием выращивают усталостную трещину. Увеличение толщины образцов от 10 до 20 мм и последующее охлаждение до низких температур, как следует из табл. 2, не оказало существенного влияния на локальное напряженное состояние материала у вершины трещины, а, следовательно, и на значение статической трещиностойкости чугуна СЧ15, которое составило в среднем $20,6 \pm 1,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Как видно из табл. 2, условие ПД по критерию $t/(K_{1C}/\sigma_{0,2})^2 \geq 0,6$ (ГОСТ 25.506 – 85) достигается только при испытании образцов толщиной 20 мм при температуре $-70 \text{ }^\circ\text{C}$, в то время как по критерию $h_{\text{max}}/t < 10^{-2}$ условие ПД соблюдается для всех образцов, испытанных как при комнатной температуре, так и при низких температурах.

Из рис. 2 видно, что разрушение образцов из чугуна СЧ15, независимо от толщины образцов и температуры испытания, произошло по механизмам межзеренного хрупкого разрушения и скола. Из работы [20] следует, что такие механизмы разрушения свидетельствуют о том, что разрушение материалов с ОЦК решеткой при

Таблица 3. Механические свойства чугуна СЧ15 при кручении

Table 3. Mechanical properties of GG15 cast iron under torsion

Материал	Диаметр образца, мм	Крутящий момент, Н·м	Угол закручивания, град	τ_k , МПа	$\tau_{0,3}$, МПа	g , %
Чугун СЧ15	10	$34 \pm 1,0$	$6,2 \pm 0,3$	$22,3 \pm 5$	$17,2 \pm 8$	$1,9 \pm 0,4$

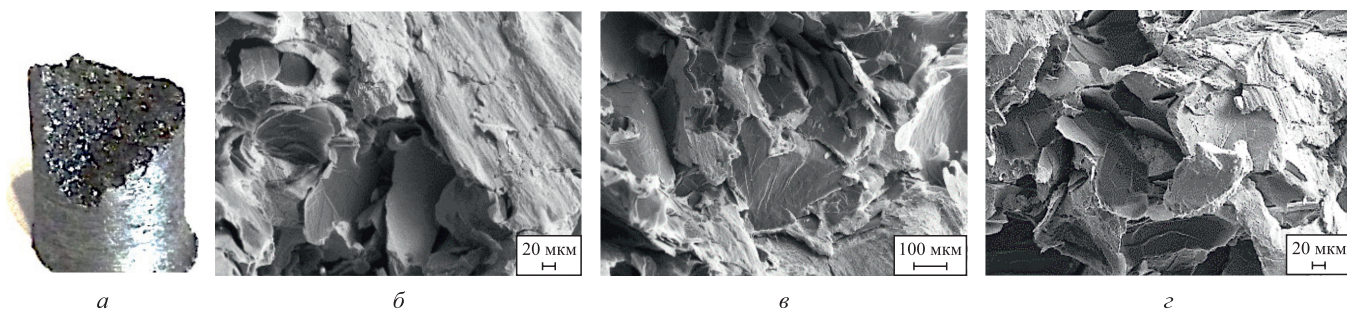


Рис. 4. Общий вид (а) и микрорельеф поверхности излома образца из чугуна СЧ15 после кручения, полученный в периферийной (б), переходной (е) и центральной (з) части излома; б, з – 200 \times , е – 100 \times

Fig. 4. General view (a) and microrelief of fracture surface of GG15 cast iron sample after torsion, obtained in peripheral (b), transition (e) and central (z) fracture parts; б, з – 200 \times , е – 100 \times

однократных видах нагружения произошло в условиях ПД. Следовательно, независимо от толщины образцов и температуры испытания, разрушение по критерию $h_{\max}/t < 10^{-2}$ произошло в условиях ПД. Отсюда также следует, что критерий реализации условия плоской деформации $h_{\max}/t < 10^{-2}$ лучше коррелирует с механизмом разрушения чугуна, чем критерий $t/(K_{1C}/\sigma_{0,2})^2 \geq 0,6$.

Наличие пластинчатых графитовых включений в структуре чугуна СЧ15 оказало влияние и на механизм разрушения образцов при кручении. Микрорельеф поверхности излома образцов из чугуна в периферийной области (рис. 4, б) свидетельствует о том, что зарождение трещин произошло вблизи поверхности образцов на графитовых включениях, которые выполнили роль концентраторов напряжения. Дальнейшее разрушение произошло под некоторым углом к сечению образца по механизму скола (рис. 4, в, з). Такой механизм зарождения и распространения трещин предопределил малый угол закручивания ($6,2^\circ$) и низкие значения механических свойств чугуна СЧ15 при кручении (табл. 3).

Выводы

При испытании образцов толщиной 10 и 20 мм из серого чугуна СЧ15 на статическую трещиностойкость разрушение образцов как при комнатной, так и при низких температурах произошло по механизмам межзеренного хрупкого разрушения и скола.

Критерий реализации условий ПД, рассчитанный по глубине пластической зоны под поверхностью изломов ($h_{\max}/t < 10^{-2}$), лучше коррелирует с механизмом разрушения чугуна, чем критерий $t/(K_{1C}/\sigma_{0,2})^2 \geq 0,6$ по ГОСТ 25.506 – 85.

Среднее значение статической трещиностойкости (K_{1C}) серого чугуна СЧ15, независимо от толщины исследуемых образцов и температуры испытания, составляет $20,6 \pm 1,5$ МПа·м^{1/2}.

Разрушение образцов из чугуна СЧ15 при кручении произошло при малом угле закручивания ($6,2^\circ$) по механизму скола. Зарождение трещин произошло в периферийной области образцов на графитовых включениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Гиршович Н.Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. Москва: Машиностроение; 1966:562.
2. Pokrovskii A.I., Chau A.S., Kunovskii E.B. Effect of the shape of graphite inclusions on acoustic characteristics of articles from cast and deformed iron. *Metal Science and Heat Treatment*. 2011;53(7–8):311–317. <https://doi.org/10.1007/s11041-011-9388-9>
3. Покровский А.И., Хроль И.Н. Сравнительные исследования изломов высокопрочного чугуна в литом и деформированном состоянии. *Литье и металлургия*. 2015;81(4):131–145.
Pokrovsky A.I., Khrol I.N. Comparative researches of fractures of high-strength cast iron in the as-cast and deformed

- state. *Litiyo i Metallurgiya (FOUNDRY PRODUCTION AND METALLURGY)*. 2015;81(4):131–145. (In Russ.).
4. Xu T., Hu C., Xie D. Effect of remodification and heat treatment on formation and growth of thermal fatigue crack in wear resistant cast iron containing low alloy. *Journal of Rare Earths*. 2003;21:202–205.
5. Bates C.E. Alloy Element Effects on Grey Iron Properties: Part II. *AFS Trans*. 1986;94:889–905.
6. Benedetti M., Curtolo T., Dallago M., Fontanari V., Lusuardi D. Yield and fracture loci for a ductile cast iron EN-GJS-600–3 under biaxial stresses. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2021;45(3):783–800. <https://doi.org/10.1111/ffe.13633>
7. Bradley W.L., Srinivasan M. Fracture and fracture toughness of cast irons. *International Materials Reviews*. 1990;35(1):129–161. <https://doi.org/10.1179/095066090790324028>
8. Owadano T., Kishitake K., Nagai K., Kubo Y. Fracture toughness of gray cast iron evaluated by J-integrals. *The Journal of the Japan Foundrymen's Society*. 1978;50(6):368–373. https://doi.org/10.11279/imo.50.6_368
9. Lindqvist S., Kuutti J., Sirkiä L., Forsström A. Constraint effects on fracture toughness of ductile cast iron in the ductile regime. *Engineering Fracture Mechanics*. 2024;306:110202. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.110202>
10. Узлов К.И., Хулин А.Н., Борисенко А.Ю., Сухомлин В.И. Анализ характера разрушения промышленных изделий из высокопрочных бейнитных чугунов в зависимости от структурного состояния их матрицы. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2010;262(4):73–77.
Uzlov K.I., Khulin A.N., Borisenko A.Yu., Sukhomlin V.I. Analysis of failure of industrial products from high-strength bainite cast irons depending on the structural state of their matrix. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2010;262(4):73–77. (In Russ.).
11. Iacoviello F., Di Bartolomeo O., Di Cocco V., Piacente V. Damaging micromechanisms in ferritic–pearlitic ductile cast irons. *Materials Science and Engineering: A*. 2008;478(1–2):181–186. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.05.110>
12. Ghahremaninezhad Ali, Ravi-Chandar K. Deformation and failure in nodular cast iron. *Acta Materialia*. 2012;60(5):2359–2368. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.12.037>
13. Chemezov D., Filatov K., Bogomolova E., Sergeeva M., Noskova T., Lukashov S., Rudenok A. Experimental study of fracture of the cast iron specimen during compression. *ISJ Theoretical & Applied Science*. 2020;12(92):144–148. https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2020.12.92.27_13
14. Yoganandh J., Natarajan S., Babu S.P.K. Erosive wear behavior of nickel-based high alloy white cast iron under mining conditions using orthogonal array. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2013;22:2534–2541. <https://doi.org/10.1007/s11665-013-0539-6>
15. Габец Д.А., Марков А.М. Исследование влияния легирующих элементов на структуру и свойства серых чугунов, работающих в условиях ударно-фрикционного износа. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2019;21(1):70–81. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2019-21.1-70-81>
Gabets D.A., Markov A.M. Study of the influence of alloying elements on the structure and properties of gray cast iron operating under conditions of shock-friction wear. *Obrabotka*

metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2019;21(1):70–81. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17212/1994-6309-2019-21.1-70-81>

16. ГОСТ 25.506–85. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. Москва: Издательство стандартов; 1985;61.
17. Браун У., Сроули Дж. Испытание высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации. Москва: Мир; 1972;246.
18. Клевцов Г.В., Ботвина Л.Р., Клевцова Н.А., Лимарь Л.В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций. Москва: МИСиС; 2007;264.
19. Клевцов Г.В., Валиев Р.З., Фесенюк М.В., Клевцова Н.А., Тюрков М.Н., Абрамова М.М., Рааб Г.И. Прочность и механизм разрушения при кручении ультрамелкозернистой аустенитной стали медицинского назначения. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2021;64(11):832–838.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-11-832-838>
20. Klevtsov G.V., Valiev R.Z., Klevtsova N.A. Effect of the local stress state on the fracture mechanism of metallic materials with different lattices under single loads. *Physical Mesomechics.* 2023;26:656–665.
<https://doi.org/10.1134/S102995992306005X>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Геннадий Всеволодович Клевцов, д.т.н., профессор кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы», Тольяттинский государственный университет
ORCID: 0000-0002-4928-7415
E-mail: klevtsov11948@mail.ru

Михаил Леонидович Линдеров, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник НИИ прогрессивных технологий, Тольяттинский государственный университет
ORCID: 0000-0001-8655-4191
E-mail: dartvi@gmail.com

Наталья Артуровна Клевцова, д.т.н., доцент, профессор кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы», Тольяттинский государственный университет
ORCID: 0000-0001-8667-656X
E-mail: inshtet@mail.ru

Максим Викторович Фесенюк, к.т.н., начальник отдела, АО «ПО «Стрела»
ORCID: 0000-0002-4584-6638
E-mail: maksim_fesenyuk@mail.ru

Максим Николаевич Тюрков, к.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой «Прикладная механика и инженерная графика», Тольяттинский государственный университет
ORCID: 0000-0002-1828-6102
E-mail: turkovmn@mail.ru

Ирина Николаевна Пигалева, заведующий лабораторией кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы», Тольяттинский государственный университет
E-mail: irina1.985@mail.ru

Gennadii V. Klevtsov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Welding, Pressure Processing and Related Processes, Togliatti State University
ORCID: 0000-0002-4928-7415
E-mail: klevtsov11948@mail.ru

Mikhail L. Linderov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher of the Research Institute of Advanced Technologies, Togliatti State University
ORCID: 0000-0001-8655-4191
E-mail: dartvi@gmail.com

Natal'ya N. A. Klevtsova, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Prof. of the Chair of Welding, Pressure Processing and Related Processes, Togliatti State University
ORCID: 0000-0001-8667-656X
E-mail: inshtet@mail.ru

Maksim V. Fesenyuk, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Division, JSC Production Association "Strela"
ORCID: 0000-0002-4584-6638
E-mail: maksim_fesenyuk@mail.ru

Maksim N. Tyur'kov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assist. Prof., Head of the Chair of Applied Mechanics and Engineering Graphics, Togliatti State University
ORCID: 0000-0002-1828-6102
E-mail: turkovmn@mail.ru

Irina N. Pigaleva, Head of Laboratory of the Chair of Welding, Pressure Processing and Related Processes, Togliatti State University
E-mail: irina1.985@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

Г. В. Клевцов – научное руководство.
М. Л. Линдеров – проведение испытаний на K_{1C} .
Н. А. Клевцова – расчет характеристик материала при растяжении и кручении.
М. В. Фесенюк – проведение испытаний на кручение.
М. Н. Тюрков – макро- и микрофрактография изломов.
И. Н. Пигалева – проведение низкотемпературных испытаний на K_{1C} .

G. V. Klevtsov – scientific guidance.
M. L. Linderov – conducting tests on K_{1C} .
N. A. Klevtsova – calculation of material properties under tension and torsion.
M. V. Fesenyuk – conducting torsion tests.
M. N. Tyur'kov – macro- and microfractography of fractures.
I. N. Pigaleva – conducting low-temperature tests on K_{1C} .

Поступила в редакцию 02.12.2025
 После доработки 23.01.2026
 Принята к публикации 03.04.2026

Received 02.12.2025
 Revised 23.01.2026
 Accepted 03.04.2026



УДК 621.771.014:621.771.016

DOI 10.17073/0368-0797-2026-3-272-279



Оригинальная статья

Original article

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА УСИЛИЙ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА УПРУГИЕ СВОЙСТВА ПОЛОС ИЗ ЛЕГИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

И. Д. Поспелов

■ Череповецкий государственный университет (Россия, 162600, Вологодская обл., Череповец, пр. Луначарского, 5)

✉ idpospelov@chsu.ru

Аннотация. В работе представлено усовершенствование базовой методики энергосилового расчёта процесса горячей прокатки, основанной на упругопластической модели очага деформации, путём повышения точности определения усилий указанного процесса за счёт уточнения зависимости упругих свойств полосы от температуры её нагрева. Для оценки снижения упругих свойств материала полосы от температуры прокатки были построены графические зависимости изменения модуля упругости для сталей марок 30ХГСА и 50ХФА. Данные графические зависимости автор получил путём анализа классической справочной литературы по изменению механических свойств сталей при обработке давлением. Проверка эффекта от применения новых зависимостей на точность определения усилий была осуществлена путём вычислительного эксперимента для технологических режимов горячей прокатки в чистовой группе действующего непрерывного широкополосного стана двумя способами. В первом способе расчёта усилий используется полученная ранее общая зависимость модуля упругости от температуры для низкоуглеродистых сталей, в то время как во втором способе используются новые адекватные регрессионные зависимости, определенные из графиков изменений для каждой из исследованных сталей 30ХГСА и 50ХФА. В ходе экспериментальных расчетов была определена погрешность между расчетными и измеренными значениями усилий прокатки, и затем эти погрешности были сопоставлены. В результате автор пришел к выводу, что применение новых зависимостей изменения модуля упругости полосы от температуры горячей прокатки, в сравнении с применением общей зависимости для низкоуглеродистых сталей, дает повышение точности расчёта усилия прокатки только для стали 50ХФА. Снижение погрешности расчёта усилий с использованием такой зависимости было подтверждено путём статистической оценки сопоставления расчётных и измеренных значений усилий для 10 технологических режимов прокатки конструкционной легированной стали 50ХФА.

Ключевые слова: модуль упругости, конструкционные легированные стали 30ХГСА и 50ХФА, температуры горячей прокатки, регрессионные уравнения, усилие прокатки, относительная точность расчёта, непрерывный широкополосный стан

Для цитирования: Поспелов И.Д. Совершенствование методики расчёта усилий горячей прокатки с учётом влияния температуры на упругие свойства полос из легированных конструкционных сталей. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2026;69(3):272–279. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-272-279>

IMPROVEMENT OF THE METHOD FOR CALCULATING HOT ROLLING FORCE TAKING INTO ACCOUNT THE EFFECT OF TEMPERATURE ON ELASTIC PROPERTIES OF ALLOYED CONSTRUCTION STEEL STRIPS

I. D. Pospelov

■ Cherepovets State University (5 Lunacharskogo Ave., Cherepovets, Vologda Region 162600, Russian Federation)

✉ idpospelov@chsu.ru

Abstract. The paper presents an improvement of the basic methodology for energy-force calculation of hot rolling process, based on the elastic-plastic model of the deformation zone, by increasing the accuracy of determining the forces of this process with refining the dependence of the strip elastic properties on its heating temperature. To assess the decrease in the elastic properties of the strip material with respect to the rolling temperature,

graphical dependencies of the change in the modulus of elasticity for 0.3–Cr–Mn–Si and 0.5–Cr–V high quality alloyed steels were obtained. These graphical dependencies were received by analyzing the classical reference literature on the change in the steels mechanical properties during pressure treatment. The author tested the effect of applying new dependencies on the accuracy of determining forces by conducting a computational experiment for the technological modes of hot rolling in finishing group of an operating continuous wide-strip mill using two methods. The first method of calculating the forces uses the previously obtained general dependence of the modulus of elasticity on temperature for low-carbon steels, while the second method uses new adequate regression dependencies determined from the graphs of changes for each of the studied 0.3–Cr–Mn–Si and 0.5–Cr–V high quality alloyed steels. During the experimental calculations, the error between the calculated and measured values of the rolling forces was determined, and these errors were then compared. As a result, the author concluded that the use of new dependencies of the modulus of elasticity of the strip on the hot rolling temperature, in comparison with the use of a general dependence for low-carbon steels, gives an increase in the accuracy of the rolling force calculation only for 0.5–Cr–V high quality alloyed steel. The reduction of the error in calculating the forces using such a dependence was verified by a statistical assessment of the comparison of the calculated and measured values of the forces for 10 technological rolling modes for 0.5–Cr–V high quality construction alloyed steel.

Keywords: modulus of elasticity, 0.3–Cr–Mn–Si and 0.5–Cr–V high quality construction alloyed steels, hot rolling temperature, regression equations, rolling force, relative calculation accuracy, continuous wide-strip mill

For citation: Pospelov I.D. Improvement of the method for calculating hot rolling force taking into account the effect of temperature on elastic properties of alloyed construction steel strips. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2026;69(3):272–279.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-272-279>

ВВЕДЕНИЕ

Важным фактором при производстве высокопрочной полосы из конструкционных марок сталей является обеспечение необходимых технологических режимов, которые определяют возможность горячей прокатки на конкретном широкополосном стане, затраты энергии на прокатку стальной полосы, достижения требуемых прочностных и качественных характеристик проката.

При проектировании технологических режимов горячей прокатки нового сортамента высокопрочных полос на начальном этапе проводят энергосиловой расчёт и оценивают предельно допустимый уровень контактных напряжений в очаге деформации, чтобы избежать негативных факторов разрушения рабочих валков и перегрузок основного оборудования станов [1–4]. Повышение точности энергосилового расчёта позволяет снижать погрешности, что повышает вероятность успешной прокатки, например, при промышленном эксперименте. Также энергосиловой расчёт производят при реконструкции и обновлении оборудования для оценки новых возможностей стана.

В работах [5–8] установлено, что при горячей деформации прокаткой полосы в очагах деформации необходимо учитывать упругие характеристики стали, данная особенность не учитывалась в классических методах [9–12] расчёта энергосиловых параметров.

В результате развития базовой методики энергосилового расчёта горячей прокатки [5–8] установлено, что модуль упругости при температурах горячей прокатки почти в два раза меньше, чем при комнатной температуре. Учёт такой особенности, а также фактического химического состава стали и упругих свойств рабочих валков клетей «кварто» позволяет снизить погрешность расчета усилий прокатки [13]. Также определено, что температура прокатываемой полосы, особенно в последних клетях чистовых групп станов горячей прокатки, увеличивает максимальную долю упругих участков до 40 % от всей длины очага деформации.

Энергосиловой расчёт по методике, представленной в работах [5–8], с учётом указанных выше особенностей работы [13] позволил усовершенствовать базовую методику расчёта мощности двигателей главного привода клетей «кварто» [14–17] применительно к семиклетевой чистовой группе непрерывного широкополосного стана горячей прокатки 2000 ПАО «Северсталь» [18]. Однако следует заметить, что зависимость модуля упругости от температуры [13] была получена только для полос из низкоуглеродистых сталей, преимущественно используемых при дальнейшем производстве холоднокатаного проката.

Определение усилия процесса горячей прокатки в каждой клетки на начальной стадии энергосилового расчёта [6–8] начинают с вычисления контактных нормальных напряжений на втором упругом участке очага деформации $x_{2упр}$ (рис. 1). Указанные напряжения напрямую зависят от модуля упругости (Юнга); повышение точности определения модуля Юнга позволит снизить погрешность прогнозирования усилия прокатки при прокатке полос из новых высокопрочных марок сталей, упругопластические характеристики которых не соответствуют изначальным паспортным характеристикам непрерывных широкополосных станов горячей прокатки.

При анализе работы [19] модуль Юнга стали St60Mn определяется в зависимости от технологических параметров прокатки (суммарного обжатия, температуры, скорости деформации). Однако диапазон температур 1250–922 °С в работе не охватывает всю чистовую прокатку, так как в работе сделан упор на вариативность скоростей прокатки и суммарного обжатия при конкретной температуре. В публикации [20] модуль упругости в диапазоне температур горячей прокатки 1100–800 °С заменён функцией распределения касательного модуля упругости. Применять такую функцию в методике энергосилового расчёта [5–8] не представляется возможным, так как касательные напряжения практически не влияют на определение усилий горячей прокатки.

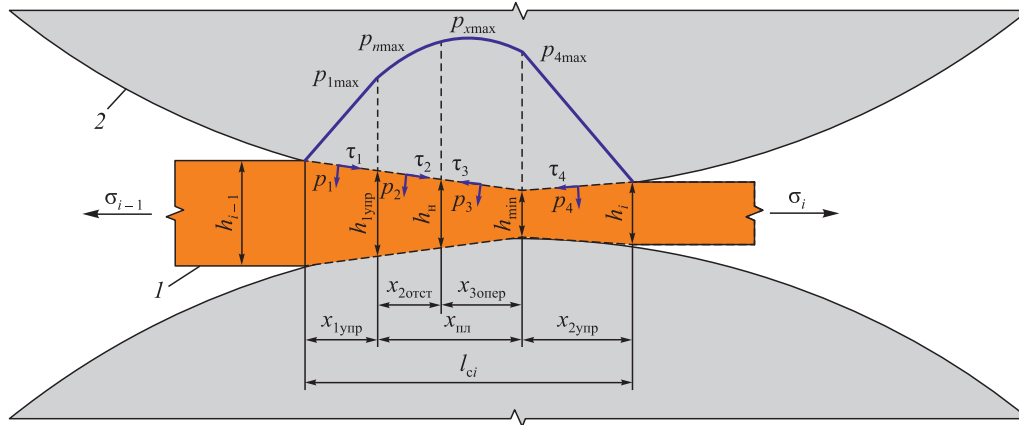


Рис. 1. Графическая схема очага деформации при горячей прокатке:

1 – полоса; 2 – рабочий валок; h_{i-1} , h_i – исходная и конечная толщины прокатываемой полосы;
 $h_{1упр}$, $h_{мин}$ – толщины на границах первого и второго упругих участков, мм; h_n – толщина в нейтральном сечении, мм;
 $x_{1упр}$, $x_{2упр}$ – длины упругих участков, мм; $x_{2отст}$, $x_{3опер}$ – длины пластических участков отставания и опережения, мм;
 τ_i – контактное касательное напряжение на i -ом участке очага деформации, МПа;
 p_i – контактное нормальное напряжение на i -ом участке очага деформации, МПа;
 p_{imax} – максимальное значение контактного нормального напряжения на i -ом участке очага деформации, МПа;
 σ_i , σ_{i-1} – переднее и заднее натяжения, МПа

Fig. 1. Graphical scheme of deformation zone during hot rolling:

1 – strip; 2 – working roll; h_{i-1} , h_i – thickness of the strip before and after rolling, mm;
 $h_{1упр}$, $h_{мин}$ = $h_{2упр}$ – thicknesses at boundaries of the first and second elastic deformation zones, mm; h_n – thickness in neutral section, mm;
 $x_{1упр}$, $x_{2упр}$ – lengths of elastic zones, mm; $x_{2отст}$, $x_{3опер}$ – lengths of plastic sections of lag and advance, mm;
 τ_i – contact tangential stresses at the i -th section of deformation zone, MPa;
 p_i – normal contact stresses at the i -th section of deformation zone, MPa;
 p_{imax} – maximal normal contact stresses at the i -th section of deformation zone, MPa; σ_i , σ_{i-1} – front and back tensions, MPa

В работе [21] изменение модуля упругости в зависимости от температуры представлено в диапазоне температур 200 – 1400 °С, однако исследования выполнены только для IF-сталей. Из анализа представленных выше работ [19 – 21] можно сделать вывод, что для точного расчёта нормальных контактных напряжений на упругих участках очага деформации и усилий прокатки при производстве высокопрочных конструкционных легированных марок сталей необходимо получить зависимости изменения их модуля упругости при всём диапазоне температур горячей прокатки.

Целью данной работы является исследование влияния модуля упругости при температурах горячей прокатки высокопрочных конструкционных легированных марок сталей для совершенствования методики расчёта усилий.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Усилие горячей прокатки по модели напряжённо-деформированного состояния полосы в контакте с рабочими валками определяется формулой [5 – 8]:

$$P = l_c b p_{cp}, \quad (1)$$

где l_c – длина дуги очага деформации (рис. 1), мм; b – ширина полосы, мм; p_{cp} – среднее значение нормальных контактных напряжений в очаге деформации, МПа:

$$p_{cp} = \frac{x_{1упр}p_1 + x_{пл}p_{23} + x_{2упр}p_4}{l_c}, \quad (2)$$

где $x_{1упр}$, $x_{пл}$ и $x_{2упр}$ – длины первого упругого, пластического и второго упругого участка восстановления части толщины полосы (рис. 1), мм; p_1 , p_{23} и p_4 – средние значения нормальных контактных напряжений для соответствующих участков длинами x_1 , $x_{пл}$ и $x_{2упр}$ (рис. 1), МПа.

Уравнения, которые выражают связь нормальных контактных напряжений с модулем упругости E_{II} на участках длинами $x_{1упр}$ и $x_{2упр}$, представлены в табл. 1.

Результаты расчёта контактных напряжений p_1 и p_4 при известных значениях частных абсолютных обжатий Δh_i и межклетевых удельных натяжений σ_{i-1} и σ_i зависят от правильного определения коэффициента контактного трения μ_i , фактического сопротивления пластической деформации $\sigma_{ф.пл}$, зависящим от химического состава прокатываемой стали, и модуля упругости полосы E_{II} . Определение значений μ_i и $\sigma_{ф.пл}$ с учётом особенностей деформационно-скоростных параметров горячей прокатки и химического состава полосы представлено в работах [13; 18].

В общем случае модуль упругости полосы из низкоуглеродистой стали в зависимости от температуры t_i в i -ой клетки стана вычисляется по уравнению

$$E_{Pi} = E_{Пбаз} f\left(\frac{t_i}{t_{баз}}\right), \quad (3)$$

Таблица 1. Формулы для расчёта средних значений напряжений p_1 и p_4 для каждого из упругих участков длинами $x_{1упр}$ и $x_{2упр}$

Table 1. Formulas for calculating the average values of stresses p_1 and p_4 for each of elastic sections with lengths $x_{1упр}$ and $x_{2упр}$

<p>Участок упругого сжатия длиной $x_{1упр}$</p>	$p_1 = 1,15E_{II} \left\{ \frac{1}{\delta_{i-1}} + \frac{L}{\delta_{i-1} + 1} \left[\left(\frac{\delta_{i-1} - 1}{(\delta_{i-1} + 1)\delta_{i-1}} - \frac{\sigma_{i-1}}{1,15E_{II}} \right) (D^{\delta_{i-1} + 1} - 1) - 2 \ln D \right] \right\},$ <p>где $\delta_{i-1} = \frac{\mu_i}{\text{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$; $L = \frac{E_{II} - \sigma_{ф.пл.}}{E_{II}}$; $D = \frac{E_{II}}{E_{II} - \sigma_{ф.пл.}}$</p>
<p>Участок упругого восстановления части толщины полосы длиной $x_{2упр}$</p>	$p_4 = 1,15E_{II} \left\{ \frac{1}{\delta_i} + \frac{L}{\delta_i + 1} \left[\left(\frac{\delta_i - 1}{(\delta_i + 1)\delta_i} - \frac{\sigma_i}{1,15E_{II}} \right) (D^{\delta_i + 1} - 1) - 2 \ln D \right] \right\},$ <p>где $\delta_i = \frac{\mu_i}{\text{tg}\beta}$; $L = \frac{E_{II} - \sigma_{ф.пл.}}{E_{II}}$; $D = \frac{E_{II}}{E_{II} - \sigma_{ф.пл.}}$</p>

где $E_{IIбаз} = 215\,000$ МПа – базовая величина модуля упругости стали при комнатной температуре; $t_{баз} = 20\,^{\circ}\text{C}$ – базовое значение температуры полосы; $f\left(\frac{t_i}{t_{баз}}\right)$ – функциональная зависимость, характеризующая влияние температуры полосы (t_i , $^{\circ}\text{C}$) из низкоуглеродистой стали на модуль упругости [13]:

$$f\left(\frac{t_i}{t_{баз}}\right) = 1,008 - 1,29 \cdot 10^{-4} \left(\frac{t_i}{t_{баз}}\right)^2 - 6,71 \cdot 10^{-3} \left(\frac{t_i}{t_{баз}}\right)^3. \quad (4)$$

Для исследования изменения модуля упругости полос E_{II} из конструкционных легированных сталей

30ХГСА и 50ХФА и их аналогов в диапазоне температур горячей прокатки 1050 – 750 $^{\circ}\text{C}$, характерных для чистовых групп широкополосных станов, на основе справочных данных [22 – 24] были построены кривые, показанные на рис. 2.

Вычислительный эксперимент для проверки влияния изменения модуля упругости (рис. 2) на точность расчёта усилия [13] проводили для технологических режимов горячей прокатки сталей следующего химического состава, мас. %, 30ХГСА: 0,29 С, 0,84 Мн, 0,93 Si, 0,83 Cr, 0,06 Ni, 0,001 W; 50ХФА: 0,51 С, 0,67 Мн, 0,27 Si, 0,81 Cr, 0,07 Ni, 0,16 V, 0,007 W (табл. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

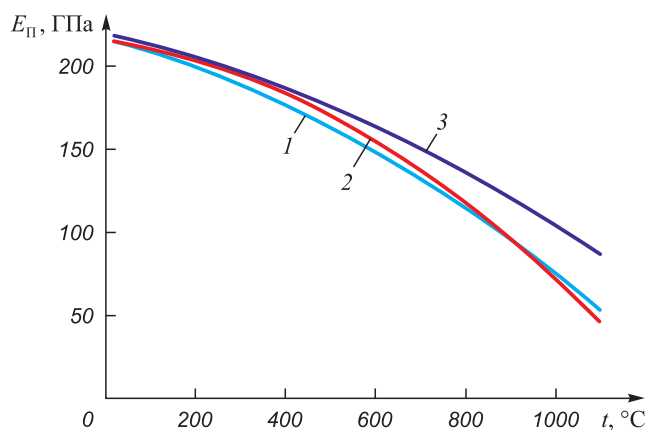


Рис. 2. Изменение модуля упругости конструкционных низкоуглеродистых и легированных сталей в зависимости от температуры нагрева:

- 1 – кривая зависимости для низкоуглеродистых сталей;
- 2 – кривая зависимости для стали 30ХГСА;
- 3 – кривая зависимости для стали 50ХФА

Fig. 2. Change in modulus of elasticity of structural low-carbon and alloyed steels depending on heating temperature:
 1 – influence curve for low-carbon steels;
 2 – influence curve for 0.3–Cr–Mn–Si high quality alloyed steel;
 3 – influence curve for 0.5–Cr–V high quality alloyed steel

В табл. 3 представлены достоверные регрессионные уравнения с высокими коэффициентами детерминации R^2 функций влияния температуры полосы на модуль упругости для сталей 30ХГСА и 50ХФА, полученные на основе аппроксимации кривых, показанных на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что кривые 2 и 3 изменения модуля упругости в диапазоне температур 800 – 1050 $^{\circ}\text{C}$ горячей прокатки в чистовой группе клетей стана 2000 (табл. 2) для стали 50ХФА отличаются от кривых изменения модуля упругости стали 30ХГСА. При этом кривая 2 для стали 30ХГСА в указанном диапазоне температур почти совпадает с кривой 1 общей зависимости изменения модуля упругости для низкоуглеродистых сталей (рис. 2).

Чтобы проверить, на сколько изменилась погрешность расчета усилия прокатки ΔP_i между измеренным значением $P_{i(изм)}$ из табл. 2 и расчётным $P_{i(расч)}$, был проведен вычислительный эксперимент. С использованием функции влияния температуры полосы на модуль упругости для низкоуглеродистых сталей (4) определены усилия P'_i и значения погрешностей расчета таких усилий $\Delta P'_i$. Аналогичные расчёты P_i и ΔP_i проведены

Таблица 2. Технологические режимы горячей прокатки в чистовой группе широкополосного стана 2000

Table 2. Technological modes of hot rolling in finishing group of wide-strip mill 2000

Сталь	Номер клетки	b , мм	h_i , мм	ε_i , %	v_i , м/с	t_i , °C	σ_{i-1} , МПа	σ_i , МПа	$P_{i(\text{изм})}$, МН
30ХГСА	6	1269	20,69	40	1,83	934,56	–	8	28,03
	7		12,69	39	2,95	904,44	8	12	30,54
	8		8,66	32	4,33	894,12	12	15	23,33
	9		6,62	24	5,75	860,18	15	22	18,91
	10		5,21	21	7,29	855,74	22	25	16,90
	11		4,35	16	8,83	834,43	25	25	14,84
	12		4,04	7,1	9,85	810,30	25	13	7,33
50ХФА	6	1300	19,95	44	1,40	1023,25	–	8	22,33
	7		12,90	35	2,18	1000,07	8	12	19,18
	8		8,92	31	3,16	947,93	12	15	17,99
	9		6,65	26	4,24	885,94	15	30	17,79
	10		5,11	23	5,52	886,56	30	30	15,86
	11		4,32	15	6,61	823,98	30	30	14,36
	12		3,97	8,1	7,36	801,54	30	14	8,63

Примечание: v_i – скорость прокатки, м/с; $P_{i(\text{изм})}$ – измеренное усилие прокатки, МН

Таблица 3. Регрессионные уравнения $f\left(\frac{t_i}{t_{\text{баз}}}\right)$ для сталей 30ХГСА и 50ХФА

Table 3. Regression equations $f\left(\frac{t_i}{t_{\text{баз}}}\right)$ for 0.3–Cr–Mn–Si and 0.5–Cr–V high quality alloyed steels

Сталь	Уравнение регрессии	R^2
30ХГСА	$f\left(\frac{t_i}{t_{\text{баз}}}\right) = 1,0006 - 2,0 \cdot 10^{-4} \left(\frac{t_i}{t_{\text{баз}}}\right)^2 - 3,3 \cdot 10^{-3} \left(\frac{t_i}{t_{\text{баз}}}\right)^3$	0,9966
50ХФА	$f\left(\frac{t_i}{t_{\text{баз}}}\right) = 1,0205 - 1,0 \cdot 10^{-4} \left(\frac{t_i}{t_{\text{баз}}}\right)^2 - 5,7 \cdot 10^{-3} \left(\frac{t_i}{t_{\text{баз}}}\right)^3$	0,9876

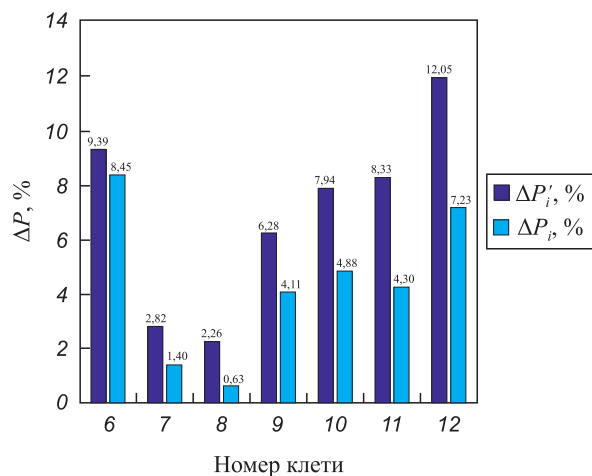


Рис. 3. Гистограмма распределения погрешностей расчёта усилий $\Delta P'_i$ и ΔP_i по клетям при прокатке полосы из стали 50ХФА

Fig. 3. Histogram of distribution of errors in calculating the forces $\Delta P'_i$ and ΔP_i across the working stands when rolling a 0.5–Cr–V high quality alloyed steel strip

с использованием зависимостей из табл. 3. Для сравнения и оценки в табл. 4 представлены относительные значения погрешностей расчёта усилий $\Delta P'_i$ и ΔP_i .

Таблица 4. Значения погрешностей расчёта усилий $\Delta P'_i$ и ΔP_i

Table 4. Values of errors in calculating the forces $\Delta P'_i$ and ΔP_i

Номер клетки	30ХГСА		50ХФА	
	$\Delta P'_i$, %	ΔP_i , %	$\Delta P'_i$, %	ΔP_i , %
6	10,51	10,54	9,39	8,45
7	3,48	3,46	2,82	1,40
8	1,08	1,02	2,26	0,63
9	4,18	3,98	6,28	4,11
10	7,75	7,46	7,94	4,88
11	5,73	5,24	8,33	4,30
12	9,50	8,80	12,05	7,23

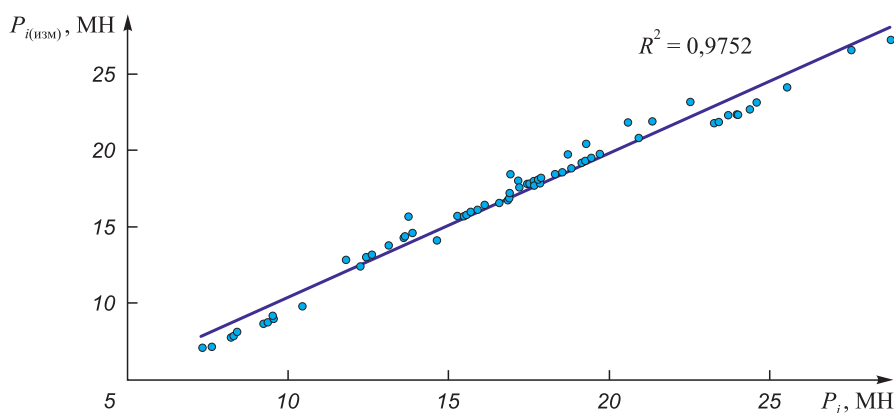


Рис. 4. Диаграмма соответствия измеренных $P_{i(изм)}$ и расчетных P_i значений усилий прокатки с применением новой зависимости учёта влияния температуры на модуль упругости стали 50ХФА

Fig. 4. Comparison diagram of the measured $P_{i(изм)}$ and calculated P_i values of rolling forces using new dependence of the effect of temperature on modulus of elasticity of 0.5–Cr–V high quality alloyed steel

Из табл. 4 видно, что для горячекатаных полос из стали 50ХФА использование зависимости из табл. 3 в уравнении (3) повышает точность расчёта усилия прокатки P_i , а для полос из стали 30ХГСА без существенной потери точности определения величины P_i можно использовать полученную ранее функциональную зависимость для низкоуглеродистых сталей (4).

Для наглядного представления на рис. 3 представлена гистограмма распределения погрешностей расчёта усилий $\Delta P'_i$ и ΔP_i (табл. 4) по клетям для технологического режима (табл. 2) прокатки полосы из стали 50ХФА. Из рис. 3 и табл. 4 видно, что минимальное значение погрешности расчёта ΔP_i удалось снизить с 2,26 до 0,63 %, максимальное значение ΔP_i – с 12,05 до 7,23 %, а среднее значение ΔP_i снизилось с 7,01 до 4,43 %. Повышение точности расчета усилия прокатки обусловлено высокими упругими свойствами данной стали, применяемой для изготовления деталей, к которым предъявляют требования повышенной износостойкости, обеспеченными большими содержаниями углерода 0,62 – 0,70 % и марганца 0,90 – 1,20 %.

На рис. 4 показана диаграмма соответствия измеренных на стане $P_{i(изм)}$ и расчётных P_i значений усилий прокатки с применением новой зависимости $f\left(\frac{t_i}{t_{баз}}\right)$ из

табл. 3 для стали 50ХФА. Расчёт указанных значений P_i проведён для технологических режимов прокатки полос в диапазоне толщины 4,0 – 6,5 мм и ширины 1300 – 1320 мм. Статистический ряд расхождений содержит (количество режимов 10 умножено на число клетей 7) 70 членов. При анализе изображения на рис. 4 видно, что расчётные и измеренные значения усилий прокатки различаются слабо $R^2 = 0,9752$, при этом фактическое значение критерия Фишера $F = 1353,75$ значительно превосходит табличное значение $F_{кр}(1; 68) = 3,97$ при $\alpha = 0,05$ и степенях свободы $k_1 = 1$ и $k_2 = 68$.

Выводы

Методика расчета усилий процесса горячей прокатки для конструкционных легированных сталей 30ХГСА и 50ХФА, основанная на упругопластической модели очага деформации, дополнена зависимостью изменения модуля упругости полос от температуры.

На основе графических изображений кривых получены достоверные функциональные зависимости в виде уравнений регрессии для расчёта значений модуля упругости указанных сталей в функции диапазона температур горячей прокатки.

Установлено, что величины модуля упругости в диапазоне температур горячей прокатки в чистой группе клетей стана 2000 для стали 50ХФА значительно отличаются от значений, полученных для низкоуглеродистых сталей и стали 30ХГСА.

Для проверки точности новых функциональных зависимостей изменения модуля упругости нагретых полос рассчитаны усилия для технологических режимов горячей прокатки сталей 30ХГСА и 50ХФА. Установлено, что применение новой зависимости учёта влияния температуры на модуль упругости стали 50ХФА позволяет повысить точность определения усилия прокатки. Среднее значение погрешности расчёта снизилось с 7,01 до 4,43 %. Для стали 30ХГСА без потери точности расчёта усилия можно применять ранее полученную зависимость изменения модуля упругости от температуры для низкоуглеродистых конструкционных сталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Palit P., Jugade H.R., Jha A.K., Souvik D., Mukhopadhyay G. Failure analysis of work rolls of a thin hot strip mill. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. 2015;3(C):39–45. <https://doi.org/10.1016/j.csefa.2015.01.001>
2. Setiawan R., Siradj E., Iman F. Failure analysis of ICDP work roll of hot strip mill: case study of shell-core interface

- spalling. *Jurnal Pendidikan Teknologi Kejuruan*. 2022;5(1): 28–34. <https://doi.org/10.24036/jptk.v5i1.27023>
3. Salehbrahimnejad B., Doniavi A., Moradi M., Shahbaz M. Investigation of the initial residual stress effects on a work roll maximum in-service stress in hot rolling process by a semi-analytical method. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023;99(9):53–64. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.04.084>
 4. Гарбер Э.А., Кожевникова И.А., Тарасов П.А. Эффективные режимы горячей прокатки тонких полос на широкополосных станах. *Производство проката*. 2009;(1):10–16. Garber E.A., Kozhevnikova I.A., Tarasov P.A. Effective hot rolling modes for thin strips at wide-strip mills. *Proizvodstvo prokata*. 2009;(1):10–16. (In Russ.).
 5. Гарбер Э.А., Кожевникова И.А. Сопоставительный анализ напряжённо-деформированного состояния металла и энергосиловых параметров процессов горячей и холодной прокатки тонких широких полос. *Производство проката*. 2008;(1):10–15. Garber E.A., Kozhevnikova I.A. Comparative analysis of metal stress-strain state and energy-force parameters of hot and cold rolling processes of thin wide strips. *Proizvodstvo prokata*. 2008;(1):10–15. (In Russ.).
 6. Гарбер Э.А., Кожевникова И.А., Завражнов А.А., Траино А.И. Напряжённое состояние в очаге деформации при прокатке высокопрочной толстолистовой стали. *Металлы*. 2007;(3):33–39. Garber E.A., Kozhevnikova I.A., Tarasov P.A., Zavrazhnov A.A., Traino A.I. State of stress in the deformation zone during rolling of high-strength plate steel. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2007;2007(3):194–200. <https://doi.org/10.1134/S0036029507030068>
 7. Гарбер Э.А., Кожевникова И.А., Тарасов П.А. Расчет усилий горячей прокатки тонких полос с учетом напряженно-деформированного состояния в зоне прилипания очага деформации. *Производство проката*. 2007;(4):7–15. Garber E.A., Kozhevnikova I.A., Tarasov P.A. Calculation of hot rolling forces for thin strips taking into account the stress-strain state in adhesion area of deformation zone. *Proizvodstvo prokata*. 2007;(4):7–15. (In Russ.).
 8. Гарбер Э.А., Кожевникова И.А., Тарасов П.А., Завражнов А.А., Траино А.И. Моделирование контактных напряжений и усилий горячей прокатки тонких широких полос с учетом зоны прилипания и упругих участков очага деформации. *Металлы*. 2007;(2):26–36. Garber E.A., Kozhevnikova I.A., Tarasov P.A., Zavrazhnov A.A., Traino A.I. Simulation of contact stresses and forces during hot rolling of thin wide strips with allowance for a stick zone and elastic regions in the deformation zone. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2007;2007(2):47–56. <https://doi.org/10.1134/S003602950702005X>
 9. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки. Москва: Металлургия; 1980:320.
 10. Королев А.А. Механическое оборудование прокатных и трубных цехов: Учебник для вузов. Москва: Металлургия; 1987:480.
 11. Целиков А.И., Полухин П.И., Гребеник В.М. и др. Машины и агрегаты металлургических заводов: Учебник для студентов металлургических и машиностроительных специальностей вузов: В 3-х томах. Москва: Альянс; 2018:679.
 12. Коновалов Ю.В., Остапенко А.Л., Пономарев В.И. Расчет параметров листовой прокатки: Справочник. Москва: Металлургия; 1986:430.
 13. Гарбер Э.А., Поспелов И.Д., Кожевникова И.А. Влияние химического состава и упругих свойств полосы и валков на энергосиловые параметры широкополосных станов горячей прокатки. *Производство проката*. 2011;(8):2–7. Garber E.A., Pospelov I.D., Kozhevnikova I.A. Influence of chemical composition and elastic properties of strip and rolls on energy-force parameters of wide strip hot rolling mills. *Proizvodstvo prokata*. 2011;(8):2–7. (In Russ.).
 14. Garber E.A., Samarin S.N., Ermilov V.V., Traino A.I. Simulation of rolling friction in the working stands of wide-strip mills. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2007;(2):120–126. <https://doi.org/10.1134/S0036029507020061>
 15. Гарбер Э.А., Кожевникова И.А., Тарасов П.А., Траино А.И. К вопросу о влиянии трения первого и второго рода на энергосиловые параметры горячей прокатки в клетях кварто. *Металлы*. 2007;(6):47–56. Garber E.A., Kozhevnikova I.A., Tarasov P.A., Traino A.I. Effect of sliding and rolling friction on the energy-force parameters during hot rolling in four-high stands. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2007;2007(6):484–491. <https://doi.org/10.1134/S0036029507060080>
 16. Гарбер Э.А., Самарин С.Н., Ермилов В.В. Определение затрат энергии на трение качения в клетях кварто. *Производство проката*. 2007;(2):25–32. Garber E.A., Samarin S.N., Ermilov V.V. Determination of energy consumption for friction rolling in four-high stands. *Proizvodstvo prokata*. 2007;(2):25–32. (In Russ.).
 17. Гарбер Э.А., Кожевникова И.А., Тарасов П.А. Новая методика расчета энергосиловых параметров широкополосовых станов горячей прокатки. *Сталь*. 2009;(9):54–60. Garber E.A., Kozhevnikova I.A., Tarasov P.A. Calculating the energy parameters of broad-strip hot-rolling mills. *Steel in Translation*. 2009;39(9): 795–802. <https://doi.org/10.3103/S0967091209090150>
 18. Поспелов И.Д., Нечаев Р.Р. Совершенствование методики расчета мощности чистовой группы непрерывного широкополосного стана горячей прокатки. *Сталь*. 2024;(2):25–30. Pospelov I.D., Nechaev R.R. Improving the methodology for calculating the finishing group power of a continuous wide-strip hot rolling mill. *Steel in Translation*. 2024;54(2): 151–156. <https://doi.org/10.3103/S0967091224700396>
 19. Nwachukwu P., Oluwole L. Effects of rolling process parameters on the mechanical properties of hot-rolled St60Mn steel. *Case Studies in Construction Materials*. 2017;6:134–146. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.01.006>
 20. Liu C., Wu H., He A., Jing F., Sun W., Shao J., Chihuan Y. Effect of uneven distribution of material property on buckling behavior of strip during hot finishing rolling. *ISIJ International*. 2023;63(1):102–110. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-221>
 21. Yin Y., Zhang J. Finite Element analysis on inclusion migration during hot-rolling process of ultralow carbon steel. *Pro-*

cesses. 2023;11(3):934.

<https://doi.org/10.3390/pr11030934>

22. Сорокин В.Г., Гервасьев М.А. и др. Стали и сплавы. Марочник: Справочное издание. Москва: Интермет Инжиниринг; 2001:608.
23. Зубченко А.С. Марочник сталей и сплавов. Москва: Машиностроение; 2001:672.
24. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. Москва: Металлургия; 1973:224.

Сведения об авторе

Information about the Author

Иван Дмитриевич Поспелов, к.т.н., доцент, Череповецкий государственный университет

ORCID: 0009-0000-5974-5718

E-mail: idpospelov@chsu.ru

Ivan D. Pospelov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Cherepovets State University

ORCID: 0009-0000-5974-5718

E-mail: idpospelov@chsu.ru

Поступила в редакцию 09.07.2025

После доработки 09.09.2025

Принята к публикации 03.04.2026

Received 09.07.2025

Revised 09.09.2025

Accepted 03.04.2026



УДК 621.774.353

DOI 10.17073/0368-0797-2026-3-280-285



Оригинальная статья

Original article

ОЦЕНКА ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОПЕРЕЧНО-ВИНТОВОЙ ПРОШИВКИ ЗАГОТОВКИ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛА В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ

А. О. Халезов¹, Д. Ш. Нухов² , Е. А. Григорьев²¹ АО «Северский трубный завод» (Россия, 623388, Свердловская обл., Полевской, ул. Вершинина, 7)² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19) d.s.nukhov@urfu.ru

Аннотация. Совершенствование процесса прошивки заготовки на станах поперечно-винтовой прокатки тесно связано с изучением характера формоизменения металла в очаге деформации. Параметры истинного очага деформации определяются совокупностью факторов: калибровкой инструментов деформации и их позиционированием в очаге деформации, формой контактной поверхности, условиями протекания процесса (в особенности в неустановившейся его стадии) и т. д. Вследствие этого, точно определить параметры истинного очага деформации, опираясь лишь на геометрическое представление очага деформации, достаточно сложно. Указанные трудности аналитического описания характера формоизменения металла в очаге деформации не позволяют с высокой точностью определить ширину контактной поверхности по фактической геометрии очага деформации, а вместе с ней и площадь контактной поверхности, а следовательно – оценить энергосиловые параметры процесса. В работе проводились исследования процесса поперечно-винтовой прошивки заготовки с применением метода конечно-элементного (МКЭ) моделирования с целью корректировки расчетных параметров геометрического очага деформации для оценки энергосиловых параметров процесса. В статье представлены результаты применения методики оценки формоизменения заготовки при поперечно-винтовой прошивке с применением программы МКЭ моделирования. Методика позволяет учитывать сложный характер течения металла в очаге деформации и корректировать расчетные параметры для оценки энергосиловых параметров процесса. Результаты расчетов показали сходимость значений моментов прокатки с графиком момента прокатки, полученного с пульта управления прошивным станом в ТПЦ-1 АО «Северский трубный завод» при прошивке заготовки диаметром 360 мм в гильзу размером $D \times S = 433 \times 26$ мм из стали марки Д.

Ключевые слова: поперечно-винтовая прошивка, формоизменение при винтовой прокатке, геометрия очага деформации, ширина контактной поверхности, площадь контактной поверхности, точность гильз, компьютерное моделирование процессов, энергосиловые параметры процесса

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема № FEUZ-2026-0013).

Для цитирования: Халезов А.О., Нухов Д.Ш., Григорьев Е.А. Оценка энергосиловых параметров поперечно-винтовой прошивки заготовки с учетом особенностей формоизменения металла в очаге деформации. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2026;69(3):280–285.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-280-285>

EVALUATION OF ENERGY-POWER PARAMETERS OF BILLET HELICAL PIERCING IN ACCORDANCE WITH METAL FORMING PECULIARITIES IN DEFORMATION ZONE

A. O. Khalezov¹, D. Sh. Nukhov² , E. A. Gregorev²

¹JSC Seversky Pipe Plant (7 Vershinina Str., Polevskoi, Sverdlovsk Region 623388, Russian Federation)

²Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

 d.s.nukhov@urfu.ru

Abstract. Improving the process of billets piercing on helical rolling mills is closely related to the study of the nature of metal forming in deformation zone. The parameters of true deformation zone are determined by a combination of factors: calibration of the deformation tools and their positioning in the deformation zone, shape of the contact surface, the process conditions (especially in its unsteady stage), etc. As a result, it is quite difficult to accurately determine these parameters relying only on geometric representation of the deformation zone. These difficulties in the analytical description of the nature of metal forming in the deformation zone do not allow one to accurately determine the contact surface width from the actual geometry of the deformation zone, and with it the area of the contact surface, and therefore to estimate the process energy–power parameters. The work involved studying the billet helical piercing using FEM (finite-element method) modeling of the process in order to adjust the calculated parameters of the geometric deformation zone and to assess the energy-power parameters. The paper presents the results of the method application for assessing the helical piercing during helical piercing using the FEM modeling software. This method makes it possible to take into account the complex nature of the metal flow in the deformation zone and to adjust the calculated parameters for estimation of the process energy-power parameters. The calculation results showed the convergence of the values of the rolling moments with the graph of the rolling moment obtained from the control panel of the piercing mill in the pipe rolling shop No. 1 of JSC Seversky Pipe Plant when piercing $\varnothing 360$ mm billets into a sleeve measuring $D \times S = 433 \times 26$ mm made of steel grade D.

Keywords: helical piercing, forming during helical rolling, geometry of deformation, contact surface width, contact surface area, accuracy of sleeves, process computer simulation, energy-power parameters

Acknowledgements: The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. FEUZ-2026-0013).

For citation: Khalezov A.O., Nukhov D.Sh., Gregorev E.A. Evaluation of energy-power parameters of billet helical piercing in accordance with metal forming peculiarities of in deformation zone. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2026;69(3):280–285.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-280-285>

ВВЕДЕНИЕ

Трубопрокатные агрегаты представляют собой технологические линии с высоким темпом прокатки и коэффициентом выхода годного металла. Высокий темп производства в первую очередь определяется эффективностью первого процесса пластической деформации металла – прошивкой непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) в пустотелую гильзу на стане поперечно-винтовой прошивки [1 – 3]. Одним из критериев эффективности процесса является оценка энергосиловых параметров – усилия металла на валки, а также момента и мощности прокатки [4]. Для аналитического определения этих параметров большое значение имеет построение истинного очага деформации [5 – 7]. Процесс поперечно-винтовой прокатки характеризуется сложным течением металла в продольном и поперечном направлениях [5; 8 – 9]. Из-за поворота валков на угол подачи и раскатки, а также из-за сложной калибровки инструмента, истинный очаг деформации искажается, что влияет на настроечные параметры стана, вносит неточности при расчете энергосиловых параметров процесса [5; 10 – 12]. В поперечном сечении очага деформации при поперечно-винтовой прошивке, в частности, наблюдается образование «наплыва»

металла перед валком, вызванное увеличением радиуса заготовки при входе в локальный очаг деформации [5]. Существующие аналитические методики не позволяют определить параметры очага деформации, не используя допущения и упрощения [5; 13 – 16]. Перспективным направлением является применение современных методов исследований, основанных на строгих научных положениях механики твердого деформированного тела, в частности метода конечно-элементного (МКЭ) моделирования процессов обработки металлов давлением [17 – 19].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПОПЕРЕЧНО-ВИНТОВОЙ ПРОШИВКЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ МКЭ МОДЕЛИРОВАНИЯ

При работе в программе QFORM была поставлена задача МКЭ моделирования на основе режимов прошивки, а также калибровки и настройки инструмента, принятых при производстве труб в трубопрокатном цехе ТПЦ-1 АО «Северский трубный завод» («СТЗ»). Диаметр заготовки D_3 был принят равным 360 мм. Для моделирования процессов горячей деформации при температуре 1200 °С в качестве материала заготовки была выбрана сталь 45, определяющие соотно-

Таблица 1. Параметры настройки стана

Table 1. Mill settings

Расстояние, мм		Выдвижение оправки за пережим валков, мм	Угол, град		Частота вращения валков, об/мин
между валками	между линейками		подачи	раскатки	
324	358	100	10	12	30

шения для которой имеются в базе данных программы QFORM. Позиционирование инструмента проводилось, исходя из принятых на производстве технологических параметров настройки прошивного стана (табл. 1).

Параметры для расчета приведены ниже.

• Постоянные условия трения, коэффициент трения по Зибелю:

- на контакте заготовки с валком – 1,5;
- на контакте заготовки с оправкой и линейками – 0,4.

• Скорость валков – 30 об/мин.

• Длина заготовки – 1000 мм, при максимальном количестве шагов между разбиениями стеки – 20.

• Шаг расчета:

- максимальное приращение деформации – 0,1;
- максимальное приращение времени – 0,5 с.

• Равномерный нагрев во всем объеме заготовки.

• Инструмент деформации – абсолютное твердое тело.

Решение задачи МКЭ моделирования процесса позволило определить фактическое «пятно контакта» металла с валком (рис. 1, а), а также рассчитать основные параметры очага деформации. Время прохождения заготовки через очаг деформации по МКЭ моделированию составило 10 с. Для оценки адекватности результатов исследования в работе были рассчитаны параметры очага деформации также по пятну контакта, полученному в ходе промышленного эксперимента (рис. 1, б): в ТПЦ-1 АО «СТЗ» была осуществлена «тормаженка» при прошивке НЛЗ диаметром 360 мм в гильзу размером $D \times S = 433 \times 26$ мм из стали марки Д (сталь 45).

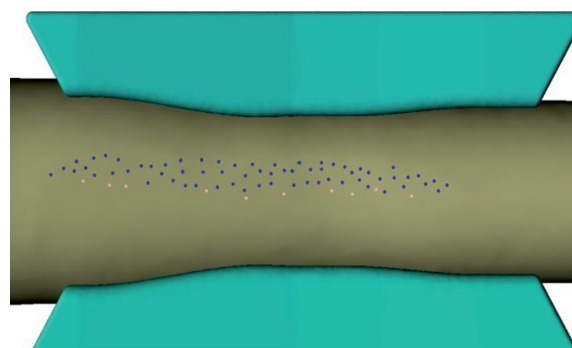
Можно заметить, что форма контактной поверхности в программе QFORM по фактическому пятну контакта отлична от результатов физического моделирования. И при таких вводных определение ширины и площади контактной поверхности по фактическому пятну контакта, полученному при визуализации конечно-элементной модели процесса в программе QFORM, существенно исказит результаты в сравнении с реальными значениями.

Для повышения точности расчета в работе предлагается скомбинировать данную задачу: произвести расчет ширины контакта по аналитическим формулам, но с применением значений абсолютного частного обжатия, коэффициента овализации и всех остальных параметров, полученных по результатам конечно-элементного моделирования. Таким образом, предлагается

использовать в качестве расчетных величин значения параметров, полученных не из простого построения геометрии очага деформации, а выгруженные по результатам решения задачи МКЭ моделирования. Тем самым учитывается вся сложность характера течения металла в продольном и поперечном направлениях поперечно-винтовой прокатки и, в частности, учитывается образование наплыва металла в поперечном направлении очага деформации на каждом шаге винтовой линии.

Ширину контактной поверхности металла с валком в i -ом сечении чаще всего определяют по формуле А.И. Целикова с поправками, внесенными А.З. Глейбергом [2]:

$$b_i = \sqrt{\frac{2R_i r_i}{R_i + r_i} \Delta r_i} + \frac{R_i r_i}{R_i + r_i} (\xi_i - 1), \quad (1)$$



а



б

Рис. 1. Контактная поверхность металла с валком прошивного стана, полученная при численном (а) и физическом (б) моделировании

Fig. 1. Contact surface of metal with piercing mill roll obtained by numerical (a) and physical modeling (б)

где R_i – радиус вала; r_i – радиус заготовки; Δr_i – радиальное обжатие; ξ_i – коэффициент овализации в i -ом сечении, которые определяются при анализе результата МКЭ моделирования в программе QFORM.

Для вычисления площади контактной поверхности очага деформации разбивают на n участков длиной Δl в продольном направлении. Общую площадь контактной поверхности в этом случае определяют по формуле [2]

$$F = \sum \frac{b_i + b_{i+1}}{2} \Delta l, \quad (2)$$

где b_i и b_{i+1} – значения ширины контактной поверхности в двух соседних сечениях.

На рис. 2 представлены результаты расчета ширины и площади контактной поверхности по предлагаемому подходу (кривая 1). Скорректированный график изменения ширины контактной поверхности демонстрирует

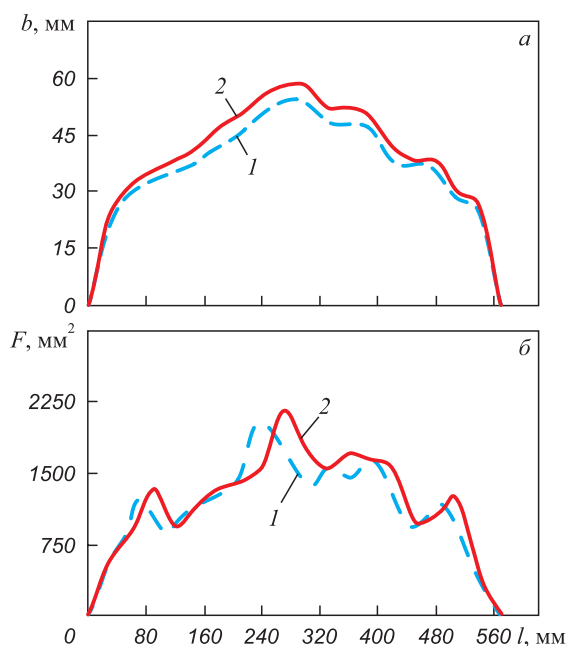


Рис. 2. Результаты расчетов ширины (а) и площади контактной поверхности (б) по предлагаемой методике (1) и по результатам промышленного эксперимента (2)

Fig. 2. Results of calculation of the width (a) and contact surface area (b) using the proposed method (1) and results of an industrial experiment (2)

Таблица 2. Значения усилий и моментов прокатки в соответствующих сечениях очага деформации

Table 2. Values of rolling forces and moments in the corresponding sections of deformation zone

Показатель	Номер сечения																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Усилие прошивки P , кН	30	45	55	63	71	84	77	82	69	61	90	83	70	71	67	68	66	59	44	28
Момент прокатки M , кН·м	92	95	115	118	118	126	131	141	146	138	131	131	133	115	115	113	97	92	82	80

большую сходимость с результатами промышленного эксперимента (кривая 2).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА НА ОСНОВЕ СКОРРЕКТИРОВАННЫХ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ

Результаты расчета ширины и площади контактной поверхности позволяют оценить энергосиловые параметры процесса, а именно: усилие и момент прокатки.

Усилие определено по формуле [2]

$$P_i = pF_i, \quad (3)$$

где p – усредненное нормальное контактное давление, которое можно вычислить по формуле [2]

$$p = 2\sigma_T(1 + 0,5\pi) = 5,14\sigma_T, \quad (4)$$

где σ_T – предел текучести металла при данной температуре прошивки. Момент прокатки определен по формуле [2]

$$M = Pb\psi \left(1 + \frac{1}{l} \right), \quad (5)$$

где b – ширина контактной поверхности; $\psi = 0,5$ – коэффициент плеча; l – отношение диаметра трубы к диаметру вала.

По формулам (3) – (5) был произведен расчет параметров на каждом шаге винтовой линии: количество шагов винтовой линии составило 20 (соответствующие количество сечений) на общей длине контакта 560 мм (табл. 2).

Максимальное усилие прокатки составило 1246 кН, а максимальный момент – 118 кН·м. Результаты расчетов хорошо сходятся с графиком момента прокатки, полученного с пульта управления прошивным станом в ТПЦ-1 АО «СТЗ» при прошивке НЛЗ диаметром 360 мм в гильзу размером $D \times S = 433 \times 26$ мм из стали марки Д (сталь 45) (рис. 3).

Выводы

В работе представлены результаты применения методики оценки формоизменения заготовки при

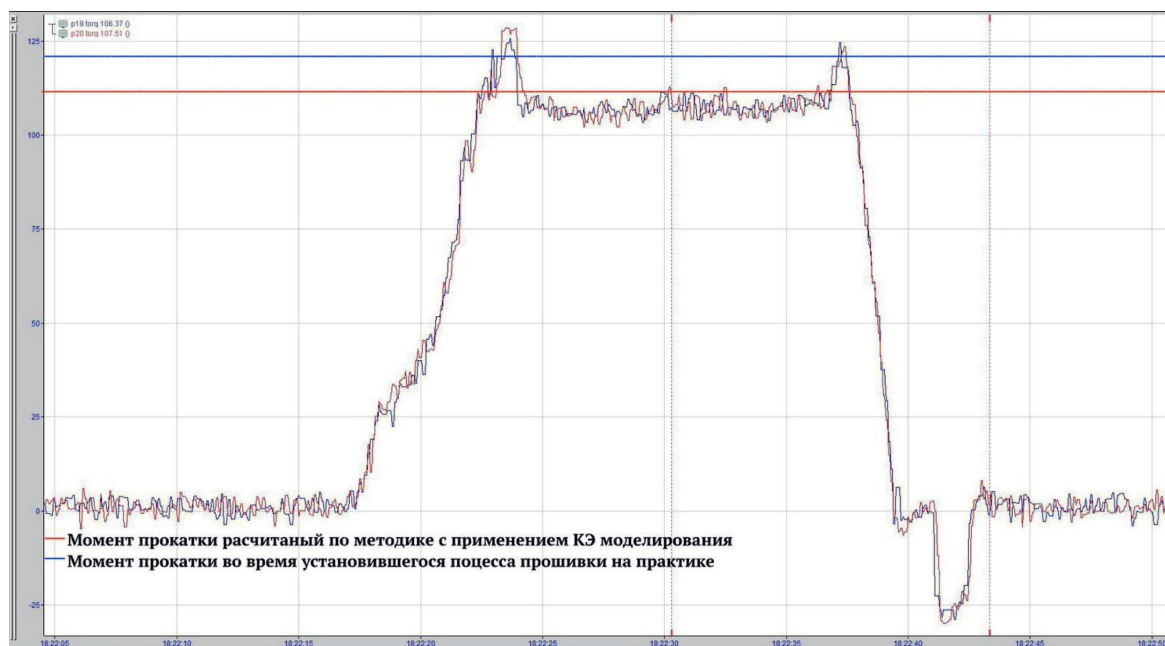


Рис. 3. График момента прокатки с пульта управления прошивным станом в ТПЦ -1 АО «СТЗ»

Fig. 3. Graph of the rolling moment from the control panel of piercing mill in pipe rolling shop No. 1 of JSC Seversky Pipe Plant

поперечно-винтовой прошивке с использованием программы МКЭ моделирования. Методика позволяет учитывать сложный характер течения металла в очаге деформации, в том числе учитывает влияние наплыва металла при входе и выходе из локального очага, и на основе этого позволяет корректировать расчет ширины контактной поверхности.

Результаты расчета длины и ширины контактной поверхности позволили определить энергосиловые параметры процесса – усилие и момент прокатки в каждом локальном очаге деформации. Максимальное усилие прокатки составило 1246 кН, а максимальный момент – 118 кН·м. Результаты расчетов показали сходимость с графиком момента прокатки, полученного с пульта управления прошивным станом в ТПЦ-1 АО «СТЗ» при прошивке НЛЗ диаметром 360 мм в гильзу размером $D \times S = 433 \times 26$ мм из стали марки Д (сталь 45).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Потапов И.Н. Теория трубного производства. Москва: Металлургия; 1991:424.
2. Данилов Ф.А. Горячая прокатка и прессование труб. Москва: Металлургия; 1972:591.
3. Тетерин П.К. Теория поперечной и винтовой прокатки. Москва: Металлургия; 1971:368.
4. Осадчий В.Я. Производство и качество стальных труб: учебное пособие для вузов. Москва: Издательство МГУПИ; 2012:370.
5. Богатов А.А. Винтовая прокатка непрерывно-литых заготовок из конструкционных марок стали: учебное пособие. Екатеринбург: Издательство УрФУ; 2017:164.

6. Михалкин Д.В., Корсаков А.А., Алютина Е.В., Храмов Е.В., Алешенко А.С., Галкин С.П., Гамин Ю.В., Больных К.В., Кривоногов И.Н. Повышение точности труб путем применения профилированной трубной заготовки. *Металлург.* 2020;64(4):40–45.
Mikhalkin D.V., Korsakov A.A., Alyutina E.V., Khramkov E.V., Aleshchenko A.S., Galkin S.P., Gamin Yu.V., Bol'nykh K.V., Krivonogov I.N. Improvement of the precision of pipes with the use of profiled pipe billets. *Metallurgist.* 2020;64:315–321.
<https://doi.org/10.1007/s11015-020-00998-7>
7. Skripalenko M.M., Romantsev B.A., Skripalenko M.N. Microstructure and hardness of hollow tube shells at piercing in two-high screw rolling mill with different plugs. *Materials.* 2022;15(6):2093. <https://doi.org/10.3390/ma15062093>
8. Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Скрипаленко М.Н., Юсупов В.С., Воротников В.А., Сидоров А.А. Оценка сдвиговых деформаций, кинематического состояния параметров очага деформации в процессах двухвалковой винтовой прокатки. *Металлург.* 2024;66(7):94–97.
Romantsev B.A., Skripalenko M.M., Skripalenko M.N., Yusupov V.S., Vorotnikov V.A., Sidorov A.A. Assessment of shear strains, kinematic state, and deformation zone in two-high screw rolling processes. *Metallurgist.* 2024;68:1059–1064. <https://doi.org/10.1007/s11015-024-01815-1>
9. Goncharuk A.V., Fadeev V.A., Kadach M.V. Seamless pipes manufacturing process improvement using mandreling. *Solid State Phenomena.* 2021;316:402–407.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.316.402>
10. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., Wójcik Ł., Skripalenko M.M. Prediction of ductile fracture in skew rolling processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing.* 2021;163:103706.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2021.103706>

11. Pater Z., Tofil A. FEM simulation of the tube rolling process in diescher's mill. *Advances in Science and Technology – Research Journal*. 2014;222:51–55.
<https://doi.org/10.12913/22998624.1105165>
12. Nguyen Q., Aleshchenko A.S. Research on the mandrel wear of a screw rolling piercing mill by the finite element method. *Key Engineering Materials*. 2022;910:381–387.
<https://doi.org/10.4028/p-4m4o75>
13. Jiang Y.-z., Tang H.-p. Method for improving transverse wall thickness precision of seamless steel tube based on tube rotation. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2015;22:924–930.
[https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(15\)30091-1](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(15)30091-1)
14. Liu H., Li Q., Gui H., Li Sh., Chen J., Tuo L., Zhang P., Shen Ch. Technology optimization analysis of three-roll rotary piercing process for seamless steel pipe. *JOM*. 2024;76:3465–3475.
<https://doi.org/10.1007/s11837-024-06541-2>
15. Wei Z., Wu C. A new analytical model to predict the profile and stress distribution of tube in three-roll continuous retained mandrel rolling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2022;302:117491.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117491>
16. Lu L., Wang Z.-x., Wang F.-z., Zhu G.-y., Zhang X. Simulation of tube forming process in Mannesmann mill. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*. 2011;16:281–285.
<https://doi.org/10.1007/s12204-011-1144-1>
17. Lezhnev S., Naizabekov A., Tolkushkin A., Panin E., Kuis D., Arbuz A., Tsyba P., Shyraeva E. Choosing the design of a radial-shear rolling mill for obtaining a screw profile. *Modelling*. 2024;5(3):1101–1115.
<https://doi.org/10.3390/modelling5030057>
18. Arbuz A., Kawalek A., Panichkin A., Ozhmegov K., Popov F., Lutchenko N. Using the radial shear rolling method for fast and deep processing technology of a steel ingot cast structure. *Materials (Basel)*. 2023;16(24):7547.
<https://doi.org/10.3390/ma16247547>
19. Романенко В.П., Фомин А.В., Севастьянов А.А., Никулин А.Н. Исследование механических свойств железнодорожных колес, полученных из заготовки, проштампованной в стане винтовой прокатки. *Металлург*. 2018;62(6):73–77.
Romanenko V.P., Fomin A.V., Sevast'yanov A.A., Nikulin A.N. A study of the mechanical properties of railroad wheels manufactured from a billet broached in a helical rolling mill. *Metallurgist*. 2018;62:568–573.
<https://doi.org/10.1007/s11015-018-0694-y>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Александр Олегович Халезов, инженер технического бюро ТПЦ-1, ПАО «Северский трубный завод»

ORCID: 0000-0002-8635-4015

E-mail: alekssanja633@mail.ru

Данис Шамильевич Нухов, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

ORCID: 0000-0003-4141-2127

E-mail: d.s.nukhov@urfu.ru

Егор Андреевич Григорьев, бакалавр кафедры «Обработка металлов давлением», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

ORCID: 0000-0001-9630-3986

E-mail: egorik.grigirik@mail.ru

Aleksandr O. Khalezov, Engineer of the Technical Bureau of the Pipe Rolling Shop No. 1, JSC Seversky Pipe Plant

ORCID: 0000-0002-8635-4015

E-mail: alekssanja633@mail.ru

Danis Sh. Nukhov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Metal Forming", Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

ORCID: 0000-0003-4141-2127

E-mail: d.s.nukhov@urfu.ru

Egor A. Gregorev, Bachelor of the Chair "Metal Forming", Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

ORCID: 0000-0001-9630-3986

E-mail: egorik.grigirik@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

А. О. Халезов – постановка научно-практической задачи и обоснование ее актуальности.

Д. Ш. Нухов – структурирование статьи, описание научно-практической проблемы, описание результатов конечно-элементного моделирования.

Е. А. Григорьев – постановка и решение задачи конечно-элементного моделирования процесса, обработка результатов численного моделирования, построение графиков.

A. O. Khalezov – formulation of scientific and practical task and justification of its relevance.

D. Sh. Nukhov – article structuration, description of the scientific and practical problem, description of FEM results.

E. A. Gregorev – formulation and solution of the problem of the process finite element modeling, processing the numerical modeling results, plotting graphs.

Поступила в редакцию 31.10.2025

После доработки 12.11.2025

Принята к публикации 03.04.2026

Received 31.10.2025

Revised 12.11.2025

Accepted 03.04.2026



УДК 519.876.2:519.7

DOI 10.17073/0368-0797-2026-3-286-293



Оригинальная статья

Original article

ПРЕДПОСЫЛКИ АДАПТАЦИИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ БИНАРНОГО АЛГОРИТМА ТАКАГИ–СУГЕНО ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОРПОРАТИВНОЙ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

С. А. Царева , В. В. Новожилов, Ю. В. Царев

Ярославский государственный технический университет (Россия, 150023, Ярославль, Московский пр., 88)

zarew@rambler.ru

Аннотация. В статье рассматривается вопрос оценки эффективности корпоративной системы менеджмента качества (КСМК) металлургической компании. Особую сложность представляет оценка эффективности КСМК в крупных вертикально интегрированных холдингах, где классические подходы, основанные на достижении установленных критериев, часто не учитывают отраслевую специфику, многоуровневую структуру и влияние неопределенностей. Объектом исследования выступает вертикально интегрированная КСМК крупного металлургического холдинга, объединяющая более 10 производственных площадок. Авторы отмечают, что традиционные методы оценки, используемые в компании, не позволяют в полной мере учесть остаточные риски недостижения целевых значений критериев эффективности. В качестве решения предлагается модифицированная методика на основе алгоритма Такаги–Сугено, которая интегрирует в расчет не только фактические показатели эффективности процессов и их весовые коэффициенты, но и оценку остаточного риска для каждого критерия. Проведено сравнение существующей методики оценки эффективности КСМК металлургической компании с предлагаемой методологией, в которой реализован алгоритм бинарных нечетких множеств Такаги–Сугено. Расчеты для каждого метода реализованы в модели, основанной на информационной системе AnyLogic. Расчеты с использованием разработанной модели позволили объективно оценить эффективность процессов. Оценка эффективности КСМК на основе каждого метода подтвердила, что система эффективна. Значение эффективности КСМК компании по существующей методологии составило 0,81, по предлагаемой – 0,92. Использование показателя остаточного риска невыполнения процесса позволяет более точно оценить эффективность КСМК. Разработанная модель выявила процессы, чья эффективность была завышена или занижена при стандартном подходе, что свидетельствует о влиянии рисков факторов.

Ключевые слова: фазификация, нечеткие множества, алгоритм Такаги–Сугено, управление качеством, AnyLogic моделирование

Для цитирования: Царева С.А., Новожилов В.В., Царев Ю.В. Предпосылки адаптации имитационного моделирования на основе бинарного алгоритма Такаги–Сугено для повышения эффективности корпоративной системы менеджмента качества. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2026;69(3):286–293. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-286-293>

PRECONDITIONS OF ADAPTING SIMULATION MODELING BASED ON THE TAKAGI-SUGENO BINARY ALGORITHM TO IMPROVE THE EFFECTIVENESS OF CORPORATE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM

S. A. Tsareva , V. V. Novozhilov, Yu. V. Tsarev

Yaroslavl State Technical University (88 Moskovskii Ave., Yaroslavl 150023, Russian Federation)

zarew@rambler.ru

Abstract. The article discusses the issue of assessing the effectiveness of corporate quality management system of a metallurgical company. Of particular difficulty is the assessment of the effectiveness of corporate quality management systems (QMS) in large vertically integrated holdings, where classical approaches based on the achievement of established criteria often do not take into account industry specifics, multi-level structure and the impact of uncertainties. The object of the research is the vertically integrated corporate QMS of a large metallurgical holding company, which unites more than 10 production sites. The authors note that the traditional assessment methods used in the company do not fully take

into account the residual risks of failure to achieve the target values of the performance criteria. As a solution, a modified methodology based on the Takagi–Sugeno algorithm is proposed, which integrates into the calculation not only the actual performance indicators of the processes and their weights, but also assessment of the residual risk for each criterion. The existing methodology for assessing the effectiveness of corporate QMS of a metallurgical company is compared with the proposed methodology, which implements the Takagi–Sugeno binary fuzzy set algorithm. Calculations for each method are implemented in a model based on the AnyLogic information system. Calculations using the developed model made it possible to assess the effectiveness of processes using both methods and to compare their applicability for performance assessments. Evaluating the effectiveness of corporate QMS for each method confirmed that the system is effective. Value of the effectiveness of the company's QMS according to the existing methodology was 0.81, and according to the proposed one – 0.92. The use of the residual risk of process failure allows for a more accurate assessment of the effectiveness of corporate QMS. The developed model identified processes whose efficiency was overestimated or underestimated under the standard approach, which indicates the influence of risk factors.

Keywords: phasification, fuzzy sets, Takagi–Sugeno algorithm, quality management, AnyLogic modeling

For citation: Tsareva S.A., Novozhilov V.V., Tsarev Yu.V. Preconditions of adapting simulation modeling based on the Takagi–Sugeno binary algorithm to improve the effectiveness of corporate quality management system. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2026;69(3):286–293. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-286-293>

ВВЕДЕНИЕ

Эффективное функционирование и достижение целей организацией любого размера и формы обеспечивается способностью управлять изменениями и возникающими в результате рисками и неопределенностями, которые вносят коррективы в существующие бизнес-процессы. Подходы к управлению в условиях быстро меняющихся факторов окружающей среды должны обеспечивать гибкость системы управления и направлены на принятие правильных управленческих решений в условиях ограниченной и неоднозначной информации. Использование процессного подхода как системы взаимосвязанных процессов позволяет организации управлять отношениями и взаимозависимостями между системными процессами таким образом, чтобы можно было улучшить общие результаты деятельности организации [1].

Многие исследования посвящены формированию методологических подходов к вопросу оценки эффективности систем менеджмента качества [2–4], которые в большинстве случаев предполагают оценку эффективности системы через достижение установленных критериев процесса, целей в области качества и результатов внутренних аудитов. Однако использование «классических» подходов в рамках оценки эффективности вертикально интегрированной корпоративной системы менеджмента качества (КСМК) металлургического холдинга не позволяет учесть специфику показателей, в том числе отраслевых особенностей, многоуровневое формирование значений критериев и влияние изменений.

В этих условиях большое практическое значение для предприятий приобретает задача разработки комплексного подхода к оценке эффективности системы менеджмента качества (СМК) с использованием математического моделирования для анализа достижения критериев результативности и анализа состояния системы в динамике на основе методов нечеткой логики [5–9]. Кроме того, в работе [10] представлен подход к интеграции методов бережливого производства и целей производственного про-

цесса с использованием нечеткой логики. Модель с нечеткой логикой включает в себя двенадцать общих методов бережливого производства, три контрольные переменные (время настройки, частота ошибок и техническая готовность) и пять целей производственного процесса, которые реализуются через целевые переменные «каждая деталь, каждый интервал», общую эффективность оборудования, время выполнения заказа, уровень качества и службу доставки. Показана базовая структура нечеткой логики и моделирования производственного процесса. В статье [11] рассматривается работа отдела по работе с персоналом компании по реализации систематического процесса оценки и отбора наиболее квалифицированных кандидатов из числа претендентов на определенную должность в организации на основе нечетких множеств. Оценка эффективности системы управления предприятием может быть реализована в среде моделирования AnyLogic [12–15].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является металлургическое предприятие, являющееся производителем и поставщиком стальных труб, трубных решений и вспомогательных услуг на территории Российской Федерации. Компания производит готовые трубы, в том числе специальные трубы и трубопроводные системы, а также другую продукцию для энергетической, химической, машиностроительной, строительной и других отраслей. На сегодняшний день КСМК компании, отвечающая требованиям стандартов ISO 9001:2015, ГОСТ Р ИСО 9001–2015, СТО Газпром 9001–2018 и API Spec Q1, объединяет более десяти производственных площадок, а также два научно-исследовательских центра в России.

Вертикально интегрированная процессная модель компании КСМК (табл. 1) построена по дивизиональному принципу. Сквозные процессы на корпоративном уровне включают в себя единые требования к подразделениям и предприятиям через единые цели в области качества, процессы и их критерии.

Процессная модель компании включает в себя три уровня.

- Головная компания реализует функции управления корпоративными процессами и централизованно контролирует их реализацию. Целью корпоративных процессов является стратегическое планирование и определение ключевых показателей, дивизиональное управление в рамках СМК.

- Дивизиональный уровень управления в СМК осуществляет планирование и управление дивизиональными процессами, развертывание целевых показателей, выполнение корпоративных требований с учетом региональной специфики размещения производственных площадок и отраслевых особенностей.

- Производственный уровень осуществляет оперативное управление локальными процессами предприятия с учетом потребностей подразделений, внедрение и достижение целевых показателей по процессам предприятия.

Оценка эффективности процессов СМК осуществляется на основе установленных на корпоративном уровне технологических критериев. Для каждого процесса определяется количество критериев и их целевые значения.

Каждому критерию присваивается весовой коэффициент для каждого отдельного процесса $\sum K_i = 1$. Эффективность критерия рассчитывается по отношению фактического значения показателя к плановому значению, максимально возможному значению $R_k = 1$. В общем случае расчет эффективности каждого процесса (табл. 2) проводится по формуле

$$R_p = \sum_{i=1}^n Rk_i K_i, \quad (1)$$

где R_p – эффективность процесса; Rk_i – эффективность критерия; K_i – весовой коэффициент i -го критерия.

Следует отметить, что определение фактической ценности эффективности по каждому отдельному критерию корпоративного процесса рассчитывается как среднее арифметическое критериев эффективности аналогичных локальных процессов всех предприятий, входящих в рассматриваемую группу компаний.

Для применения алгоритма будем рассматривать показатели эффективности критериев процесса как входные нечеткие лингвистические переменные; эффективность процесса КСМК – в качестве выходной нечеткой лингвистической переменной. Фактическое значение критерия эффективности определим как x_i .

Особое внимание следует уделить определению остаточного риска недостижения целевого значения критерия эффективности y_i для каждого критерия, который формируется как произведение вероятности наступления рисковог о события и тяжести последствий. Каждой величине остаточного риска присваивается весовой коэффициент B_i . Пороговые уровни для предпосылок каждого из правил находятся с помощью минимальной операции. Результирующие пороговые уровни α_i приняты соответствующими значениям остаточного риска недостижения целевого значения критерия эффективности. Отдельные выходы правил z_i для критериев вычисляются, опираясь на обобщенный опыт [19; 20], по формуле

$$z_i = A_i x_i + B_i y_i, \quad (2)$$

где A_i – весовой коэффициент критерия эффективности процесса, определяемый экспертным методом.

Таблица 1. Обобщенная процессно-функциональная модель КСМК

Table 1. Generalized process-functional model of corporate QMS

Корпоративные процессы	Управление компанией – определение бизнес-стратегии – бюджетирование – совершенствование КСМК – внутренний аудит КСМК	Стратегическое планирование, формирование единой политики и целей в области качества, анализ и мониторинг деятельности КСМК. Определение общих для всех предприятий группы принципов управления закупками, продажами, персоналом и инфраструктурой. Процедуры управления рисками, специальными процессами, документированной информацией и несоответствиями.
Дивизиональные процессы	Российское подразделение – процессы создания стоимости – вспомогательные процессы	Оперативно-тактическое планирование процессов с учетом региональной и отраслевой специфики, общие функции управления процессами, в том числе межзаводским управлением. Внедрение целей в области качества и показателей эффективности на уровне предприятия.
Процессы предприятий	Предприятия – процессы создания стоимости на местном уровне – локальные вспомогательные процессы	Оперативное планирование на основе корпоративных и дивизиональных требований и принципов, развёртывание целей в области качества и показателей эффективности на уровне отделов, формирование мероприятий по их достижению. Процедуры анализа запросов потребителей, управления изменениями, управления знаниями.

Таблица 2. Процессы и критерии эффективности КСМК

Table 2. Processes and effectiveness criteria of corporate QMS

Индекс процесса	Имя процесса	Критерии эффективности	Целевое значение
1	2	3	4
ДП 15	Работа с уведомлениями и жалобами потребителей. Анализ удовлетворенности клиентов	К1 Количество уведомлений, по которым было возбуждено судебное разбирательство и принято решение в пользу потребителя	Не более 1
		К2 Повторяемость несоответствий для каждого решения на кумулятивной основе	1
		К3 Сближение количества полученных заводами нотификаций с количеством нотификаций, поданных в ОТК	Не менее 0,98
		К4 Оценка потребителем параметра «Оперативное и объективное рассмотрение рекламаций» по результатам опроса (по каждому заводу)	Не ниже 4 для каждого решения по 5-балльной системе
		К5 Количество отклоненных уведомлений по каждому виду продукции (по каждому заводу), по которым претензионной комиссией приняты решения о признании претензий	0 (без учета бизнес-решений)
		К6 Рассмотрение уведомлений о качестве поставляемой продукции в пределах до 14 рабочих дней	Не менее 72 %
ДП 13	Маркетинг	К1 Точность прогноза рынка	±10 %
		К2 Соблюдение сроков, установленных в годовом плане маркетинга	Не менее 95 %
ДП 10	Доставка продукции	К1 Несоответствие фактических объемов поставленной продукции в сроки, установленные контрактами/аккредитивами/ базами поставки (отношение объема продукции, не поставленной в срок по вине поставщика логистических услуг, при условии своевременной отгрузки заводами, к общему объему продукции по контрактам/аккредитивам)	Не более 10 %
		К2 Отношение количества претензий (официально признанных уведомлений) потребителей по несоответствующей продукции по вине поставщика транспортных услуг к общему количеству претензий за отчетный период	Не более 10 %
		К3 Соответствие согласованного с поставщиком логистических услуг уровня стоимости перевозки фактической стоимости перевозки на момент доставки продукции	Не более 0,01 %
ДП 5	Сбытовой	К1 Выполнение плана продаж	Не менее 95 %
		К2 Обеспечение загрузки производственных мощностей на начало месяца не ниже нормы	Не менее 95 %
		К3 Соблюдение сроков выполнения клиентских заявок	7,0
ДП 9	Закупка материалов	К1 Своевременная поставка материалов на заводы	Не менее 90 %
ДП 6	Планирование производства. Контроль выполнения производственной программы	К1 Индикатор невыполнения заказов	Не более 4 %
		К2 Показатель выполнения заказов из утвержденного перечня заказов	Не менее 72 %
		К3 Изменение утвержденных списков заказов по инициативе отдела продаж	Не более 20 %
КП 2	Внутренний аудит	К4 Выполнение программы аудита (количество)	100 %
КП 4	Совершенствование CQMS	К1 Степень выполнения руководством решений предыдущего анализа СКУК	100 %
		К2 Количество достигнутых целей в области качества из общего числа	Не менее 90 %
		К3 Реализация мероприятий по разворачиванию целей в области качества из общего числа	90 %

Таблица 2 (продолжение). Процессы и критерии эффективности КСМК

Table 2 (continuation). Processes and effectiveness criteria of corporate QMS

Индекс процесса	Имя процесса	Критерии эффективности	Целевое значение
1	2	3	4
ДП 12	Управление персоналом	К1 Процент удовлетворенных заявок на подбор персонала, соответствующего требованиям	Не менее 70 %
		К2 Показатель эффективности адаптации (процент сотрудников, успешно завершивших испытательный срок)	Не менее 80 %
		К3 Рейтинг обучающих мероприятий по пятибалльной шкале (на основе отзывов сотрудников)	Не менее 4
		К4 Процент выполнения плана обучения	Не менее 80 %
		К5 Оценка эффективности обучения по пятибалльной шкале на основе обратной связи от руководителей подразделений	Не менее 4
		К6 Выполнение годового плана стажировки	Не менее 70 %
ДП 7	Дизайн и разработка	К1 Процент выполнения плана проектирования и разработки	Не менее 70 %
ДП 8	Система технического контроля	К1 Количество несоответствующей продукции, отгруженной потребителям на основании признанных нотификаций, в среднем по предприятиям Группы ТМК по сравнению с предыдущим аналогичным периодом	Меньше или равно 1
ДП 16	Управление корпоративной системой неразрушающего контроля	К1 Количество аттестованных установок автоматизированного неразрушающего контроля на предприятиях по сравнению с предыдущим аналогичным периодом	Меньше или равно 1

Следующим шагом является определение четкого значения выходной переменной для остаточного риска неэффективности отдельного процесса на основе формулы

$$R_{PC} = z_0 = \frac{\alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_2 + \dots + \alpha_n z_n}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n}. \quad (3)$$

Эффективность процесса R_p определена как $R_p = 1 - R_{PC}$. Расчет эффективности СМК с учетом использования алгоритма Такаги-Сугено проводится по формуле (1). Вывод об эффективности сделан на основе шкалы градации эффективности КСМК, представленной в табл. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для реализации процесса оценки эффективности КСМК была разработана модель в среде AnyLogic, которая позволяет визуализировать и упростить работу с данными при оценке эффективности работы компании. Интерфейс приложения показан на рисунке.

Интерфейс содержит элементы для управления входными данными критериев эффективности процессов и остаточными значениями риска отказа отдельных процессов. Рассчитанные значения эффективности процесса по методологии СМК и с использованием

Таблица 3. Шкала градации эффективности КСМК

Table 3. Effectiveness gradation scale of corporate QMS

R	Действия в отношении КСМК
0 – 0,5	Не эффективно. Цели и задачи не были достигнуты. Необходимо принять корректирующие меры для выявления и устранения причин несоответствий.
0,5 – 0,8	Средний уровень производительности. Поставленные цели и задачи достигнуты частично. Должны быть разработаны корректирующие действия по выявлению и устранению причин возникновения несоответствий.
0,8 – 1,0	Эффективность КСМК



Интерфейс приложения для оценки эффективности процессов СМК в среде AnyLogic

Application interface for assessing the effectiveness of QMS processes in AnyLogic environment

алгоритма Такаги-Сугено отображаются в соответствующих окнах интерфейса модели, и для каждого метода строится диаграмма оценки эффективности процесса. Общие значения производительности отображаются в интерфейсе программы. По методологии КСМК эффективность составила 0,81, а по методике оценки эффективности КСМК с использованием алгоритма Такаги-Сугено – 0,92.

Полученные в результате моделирования диаграммы производительности процессов КСМК позволяют сделать вывод об эффективности таких процессов, как ДП-15 «Работа с обращениями и жалобами потребителей. Анализ удовлетворенности потребителей», ДП-6 «Планирование производства. Контроль исполнения производственных программ», ДП-12 «Управление человеческими ресурсами» и ДП-8 «Система технического контроля», рассчитанных с использованием алгоритма Такаги-Сугено, которые увеличились по сравнению с результатами расчетов по методике, применяемой в Группе компаний. На рост показателей эффективности повлияло введение индикатора остаточного риска по этим процессам. В свою очередь, процессы КП-4 «Совершенствование СМК» и КП-2 «Внутренний аудит» получили более низкие баллы при расчете в соответствии с алгоритмом Такаги-Сугено, что может быть признаком наличия организационных недостатков или особенностей расчета, степень влияния рисков на эти процессы незначительна.

Выводы

Использование методики расчета эффективности процессов корпоративной системы менеджмента

качества на основе алгоритма Такаги-Сугено позволяет:

- учитывать качественные аспекты, влияющие на эффективность процессов корпоративной системы менеджмента качества, такие как внешние и внутренние факторы, риски;
- детально проанализировать систему показателей, характеризующих эффективность и устойчивость корпоративной системы менеджмента качества, и на основании полученных результатов внести в нее соответствующие изменения;
- комплексно оценивать эффективность каждого процесса СМК, степень влияния рисков на недостижение целевых значений критериев эффективности, а также их влияние на оценку эффективности системы в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. ГОСТ Р ИСО 9001–2015. Системы менеджмента качества. Требования. Москва: «Стандартинформ»; 2015:32.
2. Искандерова Р.Р. Методика оценки эффективности СМК предприятия. *Молодой ученый*. 2015;85(5):278–280. Iskanderova R.R. Methodology for assessing the effectiveness of QMS of an enterprise. *Young scientist*. 2015;85(5): 278–280. (In Russ.).
3. Редько Л.А., Сальков С.Е., Червова Л.В. Оценка эффективности системы менеджмента качества. *Вестник науки Сибири*. 2013;9(3):65–69. Red’ko L.A., Sal’kov S.E., Chervova L.V. Assessing the effectiveness of quality management system. *Bulletin of Science of Siberia*. 2013;9(3):65–69. (In Russ.).
4. Меркушова Н.И. Анализ подходов к оценке эффективности систем менеджмента качества в организациях. В кн.: *Проблемы современной экономики: Материалы Между-*

- народной научной конференция 20–23 декабря 2011, Челябинск. Челябинск: Два комсомольца; 2011:127–129.
5. Абалдова С.Ю., Волынский В.Ю. Разработка системы нечеткого вывода для оценки эффективности системы менеджмента качества предприятия на основе алгоритма Мамдани. *Известия вузов. Серия: Экономика, финансы и управление производством*. 2011;7(1):86–93.
Abaldova S.Yu., Volynskii V.Yu. Development of a fuzzy inference system for assessing the effectiveness of enterprise's quality management system based on the Mamdani algorithm. *Ivecofin*. 2011;7(1):86–93. (In Russ.).
 6. Kang Z., Zhao Y., Kim D. Investigation of enterprise economic management model based on fuzzy logic algorithm. *Heliyon*. 2023;9(8):e19016.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19016>
 7. Pislaru M., Herghiligiu I.V., Robu I.-B. Corporate sustainable performance assessment based on fuzzy logic. *Journal of Cleaner Production*. 2019;223:998–1013.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.130>
 8. Tafuro A., Dammacco G., Esposito P., Mastroleo G. Rethinking performance measurement models using a fuzzy logic system approach: a performative exploration on ownership in waste management. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2022;79:101092. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2021.101092>
 9. Caiado R.G.G., Scavarda L.F., Gavião L.O., Ivson P., Nascimento D.L.M., Garza-Reyes J.A. A fuzzy rule-based industry 4.0 maturity model for operations and supply chain management. *International Journal of Production Economics*. 2021;231:107883.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107883>
 10. Drews T., Molenda P., Oechsle O., Koller J. Manufacturing system optimization with lean methods, manufacturing process objectives and fuzzy logic controller design. *Procedia CIRP*. 2020;93:658–663.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.145>
 11. Nalbant K.G. A methodology for personnel selection in business development: An interval type 2-based fuzzy DEMATEL-ANP approach. *Heliyon*. 2024;10(1):e23698.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23698>
 12. Стенников В.А., Барактенко Е.А., Майоров Г.С. Разработка мультиагентной модели интегрированной системы энергоснабжения в программной среде AnyLogic. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020;24(5):1080–1092.
<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1080-1092>
Stennikov V.A., Barakhtenko E.A., Mayorov G.S. Developing a multiagent model of an integrated energy supply system in AnyLogic simulation software. *iPolytech Journal*. 2020;24(5):1080–1092. (In Russ.).
<http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1080-1092>
 13. Суханов А.А., Скороходова А.С. Моделирование бизнес-процессов в среде AnyLogic. *Сборник материалов XIX Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 21–22 апреля 2023 г., Томск*. Томск: изд. ООО «СТТ»; 2023:415–417.
 14. Ершова И.В., Тотмянин А.А. Моделирование производственных задач с помощью программы AnyLogic. *Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении*. 2023;19(1):32–39.
<https://doi.org/10.30987/2658-6436-2023-1-32-39>
Ershova I.V., Totmyanin A.A. Modeling production tasks using the AnyLogic program. *Automation and Modeling in Design and Management*. 2023;19(1):32–39. (In Russ.).
<https://doi.org/10.30987/2658-6436-2023-1-32-39>
 15. Копытин Д.В., Кorableва А.А. Применение имитационного моделирования в программе AnyLogic для исследования бизнес-процессов на железной дороге. *NovaInfo.Ru*. 2021;124:17–20.
Kopytin D.V., Korableva A.A. Using of simulation software anylogic for modelling business processes on railroad. *NovaInfo.Ru*. 2021;124:17–20. (In Russ.).
 16. Ходашинский И.А., Сарин К.С. Методика построения компактных и точных нечетких систем типа Такаги–Сугено. *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. 2016;19(1):50–56.
<https://doi.org/10.21293/1818-0442-2016-19-1-50-56>
Hodashinsky I.A., Sarin K.S. Technique for designing accurate and compact Takagi–Sugeno fuzzy systems. *Proceedings of TUSUR University*. 2016;19(1):50–56. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21293/1818-0442-2016-19-1-50-56>
 17. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / Перевод с английского. 2-е издание. Москва: БИНОМ, Лаборатория знаний; 2013:798.
 18. Бельцева Л.Б. Дизайн корпоративной СМК. Принципы построения СМК в промышленных холдингах. *Методы управления качеством*. 2020;(5):44–50.
Beltseva L.B. Design of corporate QMS. Principles of building CQMS in industrial holdings. *Methods of Quality Management*. 2020;(5):44–50.
 19. Южакова Ю.О., Царева С.А. Оценка эффективности интегрированной системы менеджмента для производителя нефтедобывающего оборудования в условиях адаптации алгоритмов нечеткой логики. В кн.: *XXX Международная научно-практическая заочная конференция. Научные исследования: ключевые проблемы 3-го тысячелетия. 1–2 ноября 2018 г. Москва*. Москва: Издательство «Научные публикации»; 2018:25(6):4–9.
 20. Гвоздик М.И., Абдулалиев Ф.А., Шилов А.Г. Модели оценки риска в нечеткой среде с использованием логического вывода на нечетких множествах первого порядка. *Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России»*. 2017;(2):107–120.
Gvozdik M.I., Abdulaliev F.A., Shilov A.G. Risk assessment models in a fuzzy environment using logical inference on first-order fuzzy sets. *Scientific and analytical journal "Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia"*. 2017;(2):107–120. (In Russ.).

Сведения об авторах

Information about the Authors

Софья Александровна Царева, к.х.н., доцент института экономики и менеджмента, Ярославский государственный технический университет

ORCID: 0000-0003-2099-4885

E-mail: zarew@rambler.ru

Владимир Владимирович Новожиллов, аспирант, Ярославский государственный технический университет

ORCID: 0009-0002-3418-2378

E-mail: novojilovvv.19@edu.ystu.ru

Юрий Валерьевич Царев, к.т.н., доцент кафедры «Информационные системы и технологии» Института цифровых систем, Ярославский государственный технический университет

ORCID: 0000-0002-4337-2897

E-mail: tsarevyv@ystu.ru

Sophia A. Tsareva, Cand. Sci. (Chem.), Assist. Prof. of the Institute of Economics and Management, Yaroslavl State Technical University

ORCID: 0000-0003-2099-4885

E-mail: zarew@rambler.ru

Vladimir V. Novozhilov, Postgraduate, Yaroslavl State Technical University

ORCID: 0009-0002-3418-2378

E-mail: novojilovvv.19@edu.ystu.ru

Yuri V. Tsarev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Information Systems and Technologies of the Institute of Digital Systems, Yaroslavl State Technical University

ORCID: 0000-0002-4337-2897

E-mail: tsarevyv@ystu.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

С. А. Царева – адаптация и анализ имитационного моделирования на основе бинарного алгоритма Такаги-Сугено.

В. В. Новожиллов – участие в проведении исследования, оформление результатов.

Ю. В. Царев – организация и проведение практического исследования, оформление результатов.

S. A. Tsareva – adaptation and analysis of simulation modeling based on the binary Takagi-Sugeno algorithm.

V. V. Novozhilov – participation in the research, registration of results.

Yu. V. Tsarev – organizing and conducting the practical research, registration of results.

Поступила в редакцию 11.08.2025

После доработки 13.10.2025

Принята к публикации 02.04.2026

Received 11.08.2025

Revised 13.10.2025

Accepted 02.04.2026



УДК 621.787.4

DOI 10.17073/0368-0797-2026-3-294-304



Оригинальная статья

Original article

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ПРОЦЕССЕ ПРАВКИ И УПРОЧНЕНИЯ НЕЖЕСТКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

С. А. Зайдес, Буй Мань Зунг

Иркутский национальный исследовательский технический университет (Россия, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83)

manhdungbuik52@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрено напряженно-деформированное состояние нежестких цилиндрических деталей при комбинированном процессе правки и упрочнении плоскими клиновыми плитами. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения геометрической точности и эксплуатационной надежности длинномерных мало жестких валов, которые подвержены значительным деформациям в процессе изготовления и термообработки. Разработан новый способ для правки и упрочнения нежестких цилиндрических деталей типа валов и осей в одной технологической операции, предназначенной в основном для обработки деталей из пластичных металлов и сплавов. Цель работы заключается в определении допустимых геометрических значений искривленных цилиндрических деталей и рациональных технологических параметров процесса правки и упрочнения плоскими клиновыми плитами. В ходе исследования была разработана теоретическая модель, позволившая определить критические условия захвата и стабильного вращения цилиндрической заготовки между рабочими поверхностями плоских клиновых плит. На основании теоретического расчета определено допустимое значение исходного прогиба заготовки, которое не должно превышать 4 мм на длине 200 мм. Для верификации теоретических данных было проведено компьютерное моделирование в программном комплексе ANSYS. Использование метода конечных элементов позволило уточнить границы устойчивого протекания процесса. По результатам моделирования установлено, что для обеспечения прямолинейности оси заготовки без повреждения ее поверхности значение исходного прогиба не должно превышать 3,5 мм на длине 200 мм. Оценка распределения остаточных напряжений и пластических деформаций показала, что рациональная степень относительного обжатия находится в пределах 1,3 – 1,5 %. Полученные результаты могут быть использованы при разработке эффективных технологий обработки нежестких цилиндрических деталей, способствующих повышению их эксплуатационных характеристик и точности изготовления.

Ключевые слова: правка, упрочнение, напряженно-деформированное состояние, нежесткая цилиндрическая деталь, плоская клиновья плита, относительное обжатие, конечно-элементное моделирование

Для цитирования: Зайдес С.А., Буй М.З. Оценка напряженно-деформированного состояния при комбинированном процессе правки и упрочнения нежестких цилиндрических деталей. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2026;69(3):294–304.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-294-304>

EVALUATION OF STRESS–STRAIN STATE IN THE COMBINED PROCESS OF STRAIGHTENING AND STRENGTHENING OF NON-RIGID CYLINDRICAL PARTS

S. A. Zaides, Bui Manh Dung

Иркутск National Research Technical University (83 Lermontova Str., Irkutsk 664074, Russian Federation)

manhdungbuik52@gmail.com

Abstract. The article examines the stress-strain state of flexible cylindrical parts during the combined process of straightening and strengthening with flat wedge plates. The relevance of the work is determined by the need to improve the geometric accuracy and operational reliability of long, low-rigid shafts subjected to significant deformations during manufacturing and heat treatment. The authors developed a new method for straightening and strengthening flexible cylindrical parts such as shafts and axles in a single technological operation. It is intended primarily for machining parts made of ductile metals and alloys. The objective of the study was to determine the permissible geometric values of curved cylindrical parts and rational technological parameters for the straightening and strengthening process with flat wedge plates. A theoretical model was developed during the study, which made it possible to determine the critical conditions for gripping and stable rotation of a cylindrical billet

between the working surfaces of flat wedge plates. Based on the theoretical calculation, the permissible value of the billet initial deflection was determined, which should not exceed 4 mm over a length of 200 mm. To verify the theoretical data, computer simulations were conducted using the ANSYS software package. Using the finite element method, the process's stable boundaries were clarified. The simulation results revealed that, to ensure the straightness of the billet axis without damaging the surface, the initial deflection should not exceed 3.5 mm over a length of 200 mm. An assessment of the distribution of residual stresses and plastic deformations revealed that the optimal relative reduction ratio is within the range of 1.3 – 1.5 %. The obtained results can be used in development of effective technologies for machining flexible cylindrical parts, contributing to improved performance and manufacturing accuracy.

Keywords: straightening, strengthening, stress–strain state, non-rigid cylindrical part, flat wedge plate, percent reduction, finite element modeling

For citation: Zaides S.A., Bui M.D. Evaluation of the stress–strain state in the combined process of straightening and strengthening of non-rigid cylindrical parts. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2026;69(3):294–304. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-294-304>

ВВЕДЕНИЕ

Нежесткие детали, изготовленные из конструкционных материалов, к которым относятся валы роторов, гребные валы, ходовые винты и пр., являются наиболее технологически сложными для механической обработки. Это ответственные детали, во многом определяющие ресурс и надежность технического изделия, требуемые эксплуатационные показатели которых обеспечиваются высокой точностью изготовления, эксплуатационной стабильностью размеров и качеством поверхностных слоев рабочих элементов [1 – 3]. Однако достижение данных высоких показателей сопряжено со значительными трудностями ввиду возникающих погрешностей обработки, которые обусловлены технологическими упругими и остаточными деформациями [4]. Поэтому обеспечение высокой точности нежестких валов, обусловленной пространственной погрешностью, является весьма сложной технологической задачей, решение которой зависит исключительно от возможности эффективного управления напряженно-деформированным состоянием заготовки в процессе обработки [5; 6].

Современное машиностроение предъявляет повышенные требования к точности геометрических параметров и надёжности конструктивных элементов, особенно в отношении длинномерных цилиндрических деталей, таких как валы, оси, штоки и направляющие. Эти элементы широко применяются в транспортной, авиационной, энергетической, станкостроительной и других отраслях промышленности. Однако в процессе их изготовления часто возникают начальные геометрические отклонения от прямолинейности, обусловленные остаточными напряжениями после механической и термической обработки, нарушениями условий хранения, либо деформацией при транспортировке [7 – 9]. Искривление деталей существенно осложняет дальнейшую обработку, снижает точность сборки и может приводить к вибрациям, неравномерному износу, снижению ресурса и выходу узлов из строя при эксплуатации [10; 11].

Существующие методы устранения прогиба, включая правку на прессах, ударную правку или термическую правку, во многих случаях не обеспечивают необходимой точности, требуют ручной настройки и не позволяют совместить процессы правки и повы-

шения прочности в одной технологической операции [12]. В этой связи особый интерес представляют методы поверхностного пластического деформирования (ППД), которые позволяют не только скорректировать геометрию детали, но и значительно улучшить её эксплуатационные характеристики за счёт формирования остаточных сжимающих напряжений упрочнённого слоя в приповерхностной зоне [13; 14].

В Иркутском национальном исследовательском техническом университете разрабатываются новые способы и устройства для правки и упрочнения нежестких цилиндрических деталей типа валов и осей. Способ правки и упрочнения в одной технологической операции, техническая новизна которого подтверждена патентом РФ на изобретение [15], предназначен в основном для обработки деталей из пластичных металлов и сплавов. Разработанные способы основаны на обкатке деталей плоскими плитами. Плоско-обкатные станы обладают рядом преимуществ: простота изготовления и невысокая стоимость рабочего инструмента, стабильное положение детали на плоскости инструмента, высокая стойкость рабочего инструмента и высокая производительность процесса. Поскольку рабочий инструмент выполнен в виде плоских клиновых плит, то можно совместить процессы правки и упрочнения в одной технологической операции и выправлять цилиндрические детали, искривленные в разных плоскостях. Такой геометрической формой рабочего инструмента можно упрочнять даже весьма тонкие цилиндрические детали типа валов и осей [16].

Цель работы: на основе анализа прямолинейности оси и напряженно-деформированного состояния заготовки определить допустимые геометрические значения искривленных цилиндрических деталей и рациональные технологические параметры процесса правки и упрочнения плоскими клиновыми плитами.

КОМБИНИРОВАННЫЙ СПОСОБ ПРАВКИ И УПРОЧНЕНИЯ ИСКРИВЛЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ

Схема разработанного способа правки и упрочнения искривленных нежестких цилиндрических деталей представлена на рис. 1.

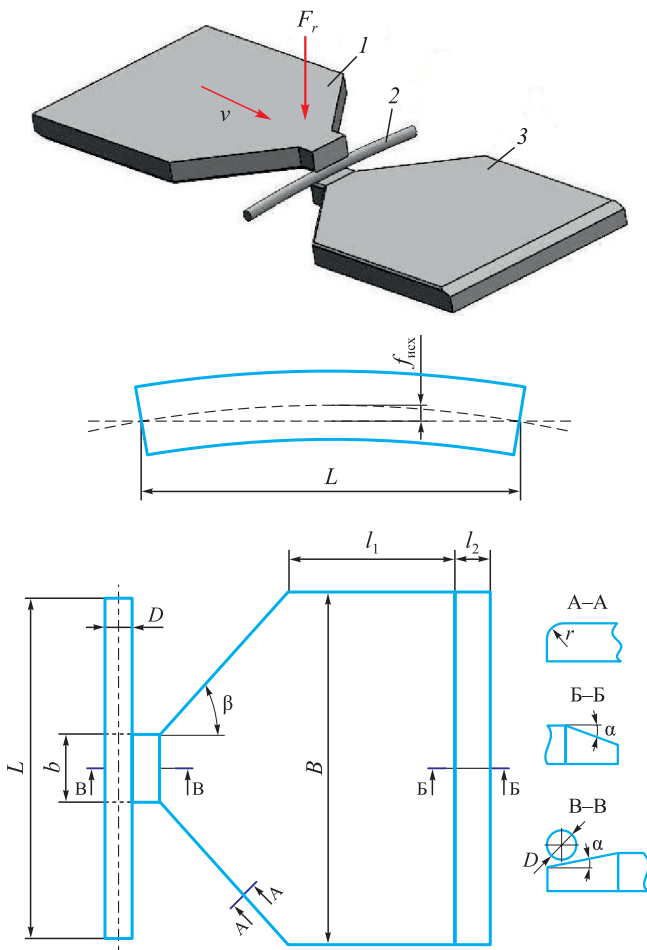


Рис. 1. Схема комбинированного процесса правки и упрочнения искривленных цилиндрических деталей плоскими клиновыми плитами:

1 – верхняя плита; 2 – заготовка; 3 – нижняя плита

Fig. 1. Schematic diagram of the combined process of straightening and strengthening of curved cylindrical parts using flat wedge plates:
1 – upper plate; 2 – billet; 3 – lower plate

Процесс правки и упрочнения искривленных цилиндрических деталей реализуется при помощи двух клиновидных плит, направленных узкой частью навстречу друг другу, одна из которых жестко закреплена, а другая перемещается в вертикальном и горизонтальном направлениях. Заготовка диаметром D и длиной L с исходным прогибом $f_{исх}$ устанавливается на заходный участок нижней плиты ширины b с углом подъема α , вогнутость при этом обращена к нижней плите. Со стороны верхней плиты на заготовку действует радиальная сила F_r для выправления локального участка заготовки. Далее верхняя плита перемещается в горизонтальном направлении со скоростью v . За счет контакта с верхней плитой и сил трения цилиндрическая заготовка получает вращательный момент, начинает поворачиваться вокруг своей оси и одновременно испытывает изгиб, направленный против начального искривления. Клиновидная форма плоских плит с углом β осуществляет постепенное выправление заготовки по всей длине.

На калибрующем участке длиной l_1 происходит выравнивание напряжений по всей длине заготовки, что обеспечивает необходимое качество процесса упрочнения поверхностным пластическим деформированием. После упрочнения заготовка переходит на выходной участок с длиной l_2 и углом наклона α . Во избежание концентрации напряжений по краям плит сделаны скругления радиусом r .

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ УСЛОВИЯ ВРАЩЕНИЯ ИСКРИВЛЕННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ДЕТАЛИ НА ПЛОСКИХ КЛИНОВЫХ ПЛИТАХ

Для анализа условий, при которых вращение цилиндрической заготовки действительно начинается (а не происходит проскальзывание), был выполнен оценочный расчет момента сопротивления вращению. Вращение возникает за счет касательной силы трения между верхней плитой и искривленной заготовкой при ее горизонтальном перемещении. Кривизна заготовки является сопротивлением вращению на плитах. Однако если моменты, создаваемые трением $M_{тр}$ и радиальной силой M_{Fr} , меньше сопротивления вращению $M_{сопр}$, заготовка начнет скользить по поверхности плит, не поворачиваясь. Поскольку радиальная сила F_r действует на заготовку в вертикальном направлении, поэтому при вращении заготовки вокруг своей оси ею можно пренебречь. Условие вращающего момента можно выразить следующим условием:

$$M_{тр} \geq M_{сопр}. \quad (1)$$

На рис. 2 представлена схема силы трения, действующей на заготовку в процессе правки и упрочнения на клиновом участке.

Поскольку плоские плиты имеют клиновидную форму, контакт между ними и цилиндрической заготовкой не

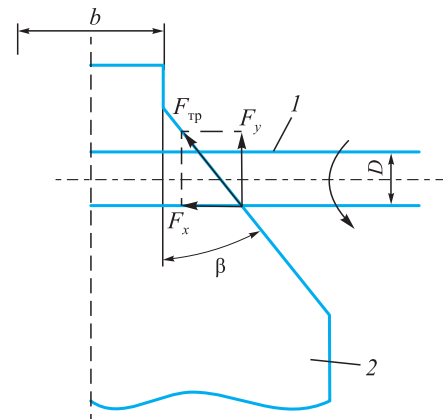


Рис. 2. Схемы трения между цилиндрической заготовкой (1) и плоской клиновидной плитой (2) в процессе правки

Fig. 2. Diagrams of friction between cylindrical billet (1) and flat wedge plate (2) during straightening

прямолинейный. При этом касательная составляющая трения будет направлена не только вдоль оси заготовки F_x , но и по окружности её поверхности F_y , которая создает вращающий момент. Тогда формула момента от силы трения будет следующая:

$$M_{тр} = F_y D = F_{тр} D \cos \beta = \mu F_r D \cos \beta. \quad (2)$$

Момент сопротивления вращению возникает за счет искривления цилиндрической детали и определен по формуле [4]

$$M_{сопр} = EIk, \quad (3)$$

где F_r – радиальная сила, Н; μ – коэффициент трения между заготовкой и клиновыми плитами; D – диаметр заготовки, мм; β – угол развала клинового участка плит, град; E – модуль упругости материала, МПа; I – момент инерции поперечного сечения, мм⁴; k – начальная кривизна заготовки, мм⁻¹.

Значения начальной кривизны k и момента инерции поперечного сечения I для цилиндра можно принять как [17]:

$$k = \frac{8f_{исх}}{L^2}, \quad I = \frac{\pi D^4}{64}, \quad (4)$$

где $f_{исх}$ – начальное максимальное отклонение оси заготовки (исходный прогиб детали), мм; L – длина заготовки, мм.

Подставив уравнение (4) в (3), получим:

$$M_{сопр} = \frac{E\pi D^4 f_{исх}}{8L^2}. \quad (5)$$

Подставив уравнения (2) и (5) в условие (1), получим:

$$\mu F_r D \cos \beta \geq \frac{E\pi D^4 f_{исх}}{8L^2}. \quad (6)$$

Из уравнения (6) следует, что условие вращения заготовки действительно зависит от величины ее начальной кривизны. При увеличении начальной кривизны заготовки контакт между инструментом и ее поверхностью становится менее равномерным, а сопротивление изгибу возрастает. Это приводит к тому, что момент, передаваемый через силы трения, возможно не будет вызывать вращение детали. Вместо этого наблюдается проскальзывание на плоских плитах, что снижает эффективность правки. Таким образом, существует критическое значение начальной кривизны, выше которого разработанный метод становится неэффективным без увеличения нормальной силы или коэффициента трения. Преобразовав уравнение (6), получаем максимальное допустимое значение отклонения от оси заготовки (исходный прогиб):

$$f_{исх} \leq \frac{8\mu F_r L^2 \cos \beta}{E\pi D^3}. \quad (7)$$

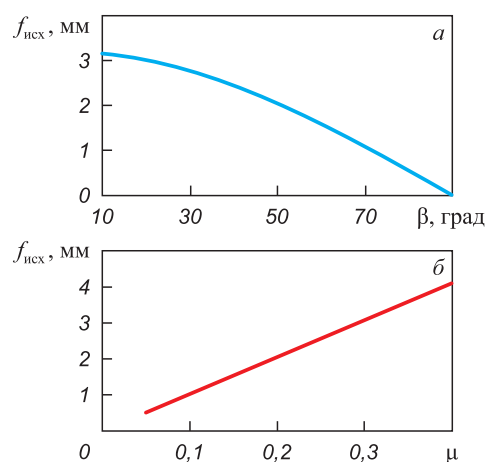


Рис. 3. Зависимость максимального исходного прогиба заготовки от угла клинового участка плит (а) и коэффициента трения (б)

Fig. 3. Dependence of the billet maximum initial deflection on the angle of plates wedge section (а) and on friction coefficient (б)

Согласно работе [18], предельное значение радиальной силы F_r для выправления центрального участка без повреждения поверхностного слоя заготовки определяется как

$$F_r \leq \frac{8I\sigma_T}{D^2} = \frac{\pi D^2 \sigma_T}{8}, \quad (8)$$

где σ_T – предел текучести исследуемого материала, МПа. Подставив уравнение (8) в (7), получим:

$$f_{исх} \leq \frac{\mu L^2 \sigma_T \cos \beta}{ED}. \quad (9)$$

На основе выражения (9) построим зависимости максимального исходного прогиба заготовки $f_{исх}$ от угла клинового участка плоских плит β и коэффициента трения μ между заготовкой и плитами для конструкционной стали Ст3 при постоянной длине и диаметре заготовки (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что значение $f_{исх}$ находится в обратной зависимости от угла β клинового участка плоских плит и в прямой зависимости от коэффициента трения. Из теоретического расчета установлено, что максимальное значение исходного прогиба заготовки должно составлять не более 4 мм. При превышении этого значения вращение заготовки не будет происходить, а будет просто проскальзывание. Далее для оценки качества процесса правки и упрочнения проведено исследование с помощью компьютерного моделирования.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРАВКИ И УПРОЧНЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИСКРИВЛЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

На основе приведенного выше расчета определено предельно допустимое отклонение оси заготовки, при

котором разработанный метод правки и упрочнения остается эффективным. Для оценки реального поведения заготовки в условиях взаимодействия с плоскими клиновыми плитами, а также для оценки напряженно-деформированного состояния заготовки, проведен ряд численных экспериментов в среде ANSYS. Применение численного моделирования является удобным методом представления сложного поведения материала и дает возможность выявить оптимальные параметры обработки без проведения дорогостоящих экспериментальных испытаний, а также предсказать потенциальные дефекты, возникающие при правке и упрочнении таких деталей [19].

Для моделирования использован модуль *ANSYS Transient Structural*, учитывающий контактное взаимодействие, трение и упругопластические свойства материала. Моделирование позволило определить, насколько эффективно устранение начальной кривизны, как распределяются остаточные напряжения, глубину упрочнения и минимальное обжатие, необходимое для достижения процесса правки.

Исследуемая заготовка представляет собой цилиндр длиной $L = 200$ мм и диаметром $D = 10$ мм, выполненный из конструкционной стали с линейным изгибом оси (одинарная кривизна). Искривление задано в одной плоскости, форма отклонения приближена к синусоидальному или дуговому профилю, что характерно для заготовок после термообработки, неравномерного охлаждения или внутренних напряжений. Величины исходного прогиба $f_{исх}$ заготовки заданы от 0,5 мм до 5 мм.

Материал заготовки – углеродистая конструкционная сталь Ст3 (упругопластический, модуль Юнга $E = 1,8 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; диаграмма деформирования материала – билинейная, предел текучести $\sigma_T = 255$ МПа, предел прочности $\sigma_B = 480$ МПа, модуль упрочнения $E_T = 1,45 \cdot 10^3$ МПа). Материал для плоских клиновых плит – конструкционная сталь высокой прочности и жесткости. При моделировании рабочий инструмент принят как абсолютно жесткое тело. Коэффициент трения для пары сталь–

сталь в зоне контакта цилиндрической заготовки с плитами $\mu = 0,1$. С учетом механического взаимодействия заготовки из стали с абсолютно жестким телом приняты конечные элементы тетраэдрического типа. Сетка использована с постоянным размером (в данном исследовании 0,5 мм) и одного типа по всему объему заготовки. Скорость движения верхней плиты выбрана $v = 10$ мм/с. Из работ [16; 20] взяты основные геометрические параметры инструмента: ширина заходного участка плит $b = 40$ мм, угол клинового участка плит $\beta = 45^\circ$. Конечно-элементная модель процесса правки и упрочнения цилиндрической искривленной детали плоскими клиновыми плитами показана на рис. 4.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА ПРАВКИ И УПРОЧНЕНИЯ ППД ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ

Для оценки эффективности разработанного способа правки и упрочнения цилиндрической заготовки с исходным искривлением использован ряд параметров, позволяющих количественно и качественно охарактеризовать степень восстановления геометрической формы детали и уровень упрочнения после комбинированного процесса. Основные критерии исследования: остаточная кривизна оси детали, равномерность распределения интенсивности остаточных напряжений и пластических деформаций по длине и сечению заготовки, глубина упрочнения и т. д. [21].

Основным технологическим параметром процесса является степень относительного обжатия ($Q, \%$). На рис. 5 представлена геометрия центральной оси цилиндрической заготовки длиной $L = 200$ мм с исходным прогибом $f_{исх} = 1$ мм до и после правки с обжатием величиной $Q = 1,5 \%$.

Для оценки прямолинейности оси цилиндрических деталей использован показатель остаточной кривизны (λ), который оценивается как максимальное отклонение продольной оси детали от прямолинейного положения после завершения процесса правки и определяется как отношение максимального остаточного отклонения к длине детали ($\lambda = f_{ост}/L$) [22; 23]. Результат компьютерного моделирования процесса показал, что после правки заготовки длиной 200 мм с исходным

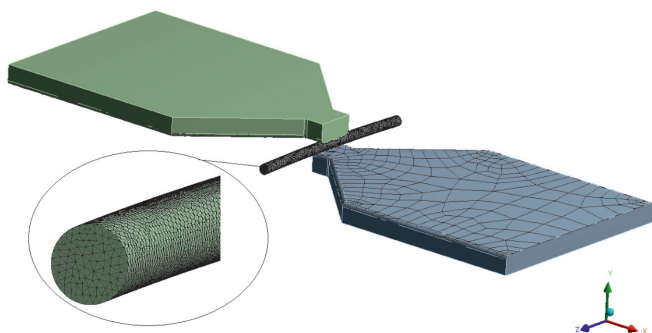


Рис. 4. Конечно-элементная модель процесса правки и упрочнения искривленной цилиндрической детали

Fig. 4. Finite element model of straightening and strengthening of curved cylindrical part

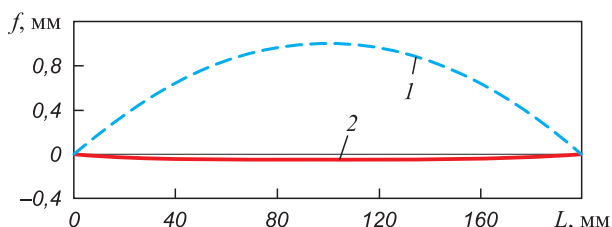


Рис. 5. Геометрия центральной оси цилиндрической заготовки до (1) и после (2) правки клиновыми плитами

Fig. 5. Geometry of central axis of cylindrical billet before (1) and after (2) straightening with wedge plates

прогибом 1 мм при величине относительного обжатия $Q = 1,5\%$ создается перегиб заготовки в сторону, противоположную начального искривления, и максимальный остаточный прогиб составляет 0,04 мм (рис. 5). В этом случае величина остаточной кривизны $\lambda = 0,2$ мм/м является допустимым значением для валов общего машиностроения [2].

Для оценки качества выправления оси проведены исследования заготовки с разными исходными прогибами. На рис. 6 показана зависимость остаточной кривизны λ от исходного прогиба заготовок $f_{исх}$ при одинаковых условиях процесса (постоянном относительном обжатии Q).

График позволяет определить область исходных прогибов, при которых правка эффективна (остаточная кривизна стремится к допустимому значению), и установить критическое значение исходного прогиба, выше которого правка не приводит к удовлетворительному результату. Из рис. 6 следует, что при фиксированном условии правки (постоянное обжатие) увеличение начального прогиба $f_{исх}$ приводит к возрастанию остаточной кривизны λ . При значении $f_{исх}$ больше 2 мм наблюдается остаточная кривизна больше 0,5 мм/м, что выше допустимого значения. Поэтому при правке заготовок с большими искривлениями для получения положительного результата необходимо увеличить величину относительного обжатия Q , которая определяется как отношение глубины вдавливания верхней плиты к диаметру заготовки D .

На рис. 7 показана зависимость величины относительного обжатия от исходного прогиба заготовки, необходимого для получения допустимой остаточной кривизны.

Из рис. 7 следует, что при увеличении исходного прогиба заготовки требуется все большая величина относительного обжатия для достижения допустимой остаточной кривизны ($\lambda \leq 0,5$ мм/м), что отражает повышенное сопротивление изгибу при больших начальных деформациях. В работе [20] установлено рациональное значение

относительного обжатия в процессе упрочнения, величина которого находится в диапазоне 1,3 – 1,5 %, что соответствует значению исходного прогиба заготовки $f_{исх} \leq 2$ мм (рис. 7). При чрезмерной величине обжатия возможно возникновение перенапряжения, которое сопровождается увеличением внутренних напряжений и риском локальных повреждений поверхности детали. Поэтому для оценки эффективности правки и упрочнения необходимо учитывать напряженно-деформированное состояние в процессе и после разгрузки в зависимости от величины относительного обжатия при разных геометрических формах цилиндрической заготовки.

Для оценки напряженно-деформированного состояния в разных точках цилиндрического образца после правки и упрочнения на клиновых плитах определены интенсивность временных и остаточных напряжений σ_i , интенсивность относительной пластической деформации ε_i с учетом главных компонент тензора напряжений и деформаций по осям координат.

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_\varphi)^2 + (\sigma_\varphi - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2}, \quad (10)$$

где σ_z , σ_φ , σ_r – осевые, тангенциальные и радиальные главные напряжения по осям координат, МПа.

По аналогии определяется интенсивность относительной пластической деформации ε_i по формуле

$$\varepsilon_i = \sqrt{\frac{2}{9}(\varepsilon_z - \varepsilon_\varphi)^2 + (\varepsilon_\varphi - \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_z)^2}, \quad (11)$$

где ε_z , ε_φ , ε_r – компоненты осевых, тангенциальных и радиальных относительных деформаций, мм/мм.

По результатам моделирования построена зависимость интенсивности максимальных временных и остаточных напряжений от степени относительного обжатия Q (рис. 8).

Из рис. 8 следует, что увеличение степени относительного обжатия соответствует росту максимальной

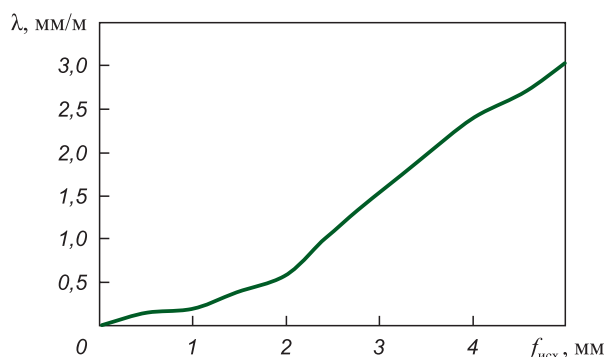


Рис. 6. Зависимость остаточной кривизны λ от исходного прогиба цилиндрической заготовки $f_{исх}$

Fig. 6. Dependence of residual curvature λ on the initial deflection of cylindrical billet $f_{исх}$

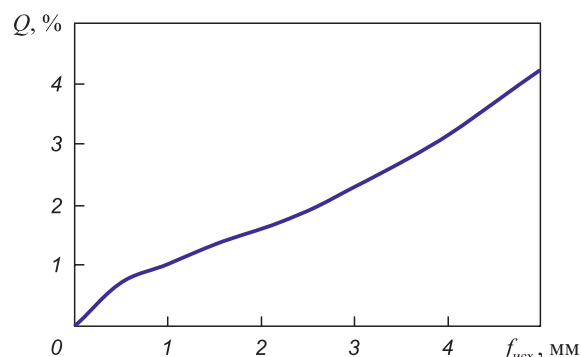


Рис. 7. Зависимость величины относительного обжатия Q от исходного прогиба заготовки $f_{исх}$

Fig. 7. Dependence of relative compression value Q on the initial deflection of the billet $f_{исх}$

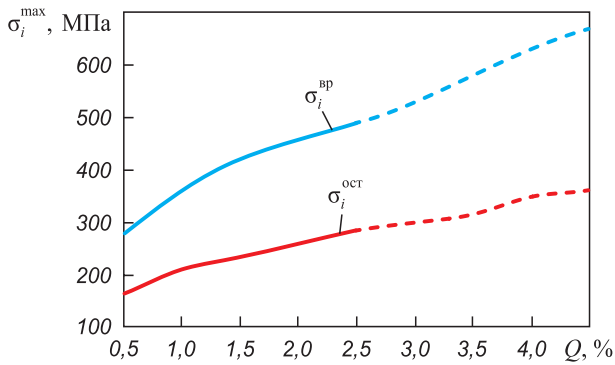


Рис. 8. Зависимость интенсивности максимальных временных и остаточных напряжений от степени относительного обжатия Q

Fig. 8. Dependence of intensity of maximum temporary and residual stresses on degree of relative compression Q

интенсивности временных и остаточных напряжений. При большом обжатии ($Q > 2,5\%$) максимальное временное напряжение превышает предел прочности материала ($\sigma_B = 490$ МПа), а остаточное напряжение превышает предел текучести ($\sigma_T = 255$ МПа) на 25 %, что характеризуется возможным повреждением поверхностного слоя. Такие режимы для механической обработки не рекомендуется. Сопоставляя результаты исследования на рис. 7 и 8, можно сделать вывод о том, что для обеспечения прямолинейности оси заготовки без повреждения ее поверхности значение исходного прогиба не должно превышать 3,5 мм.

На рис. 9 представлено распределение по радиусу поперечного сечения заготовки интенсивности остаточных напряжений и компонент тензора остаточных напряжений при разной степени относительного обжатия Q .

Как и для других схем упрочнения цилиндрических заготовок ППД, при упрочнении деталей плоскими клиновыми плитами необходимо исследовать остаточные напряжения в поверхностной зоне цилиндрической заготовки, так как при больших пластических деформациях они могут достигать величин предела пластичности материала. Максимальные значения интенсивности остаточных напряжений находятся на глубине 0,5 мм от поверхности цилиндра, и чем больше степень относительного обжатия, тем больше интенсивность остаточных напряжений. При большом обжатии ($Q = 2,5\%$) максимальная величина интенсивности напряжений превышает предел текучести материала на 25 %, что можно привести к повреждению детали (рис. 9, а). Компоненты тензора остаточных напряжений по радиусу цилиндра распределяются со знакопеременным характером. Радиальные остаточные напряжения являются растягивающими по всему сечению образца, имеют максимальное значение в центре цилиндра и снижаются в направлении поверхностного слоя. В зоне подповерхностного слоя радиальные остаточные напряжения довольно низкие, а на поверхности детали они равны нулю, что незначительно сказывается на величине интенсивности остаточных напряжений

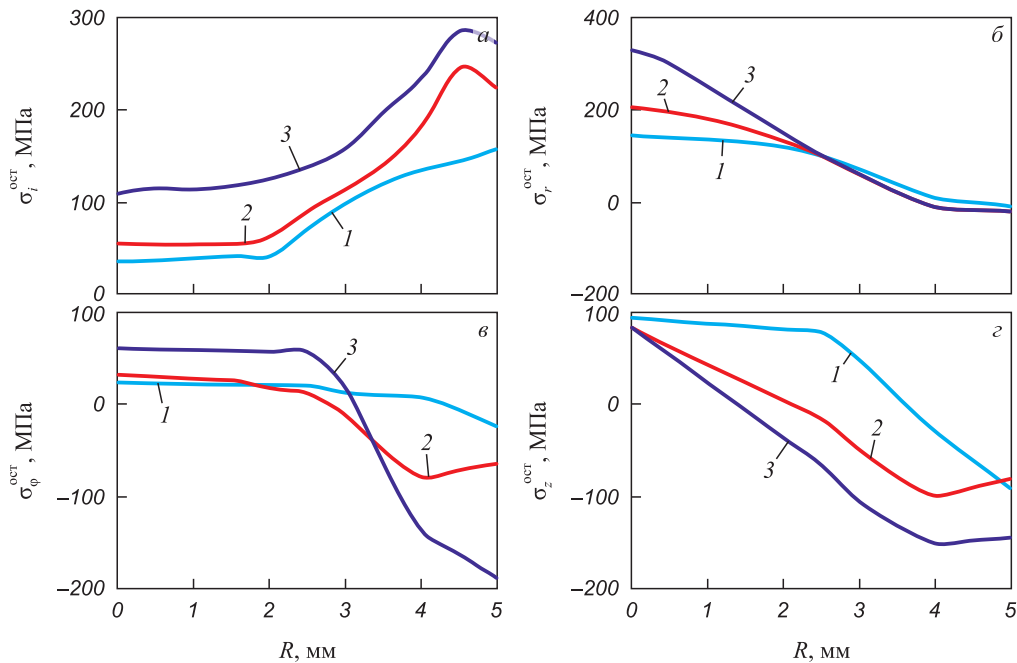


Рис. 9. Распределение по радиусу заготовки интенсивности остаточных напряжений $\sigma_i^{\text{ост}}$ (а), компонент тензора радиальных напряжений σ_r (б), тангенциальные σ_ϕ (в) и осевые σ_z (г) напряжения при разных степенях относительного обжатия Q : 1 – 0,5 %; 2 – 1,5 %; 3 – 2,5 %

Fig. 9. Distribution of residual stress intensity $\sigma_i^{\text{ост}}$ (a) and tensor components of radial σ_r (б), tangential σ_ϕ (в) and axial σ_z (г) over the billet radius at different degrees of relative compression Q : 1 – 0.5 %; 2 – 1.5 %; 3 – 2.5 %

(рис. 9, б). На поверхности деталей формируются сжимающие остаточные тангенциальные и осевые напряжения и переходят в растягивающие к центру поперечного сечения заготовки. При этом максимальная величина сжимающих остаточных напряжений находится в прямой зависимости от степени относительного обжатия.

На рис. 10 представлено распределение интенсивности остаточных напряжений по длине цилиндрических заготовок после обработки при разных степенях относительного обжатия Q .

Из рис. 10 видно, что при малой степени относительного обжатия ($Q = 0,5\%$) значения остаточных напряжений относительно низкие и распределяются они практически равномерно по длине детали, однако их уровень недостаточен для эффективного упрочнения. При средней величине обжатия ($Q = 1,5\%$) формируется устойчивое и достаточно равномерное остаточное напряженное состояние, разность значений остаточных напряжений составляет 15–20 МПа (7–8% от среднего значения напряжения), что соответствует оптимальному режиму правки. При высокой величине степени относительного обжатия ($Q = 2,5\%$) наблюдаются значительные колебания интенсивности остаточных напряжений по длине детали, что может быть связано с тем, что большая величина относительного обжатия приводит к усилению напряженного состояния в зоне деформации и, как следствие, к неравномерным остаточным напряжениям по длине детали. Равномерность распределения интенсивности остаточных напряжений вдоль длины детали оказывает решающее влияние на качество как правки, так и упрочнения. Однородное напряжённое состояние обеспечивает стабильную геометрию после разгрузки, исключает появление остаточного прогиба и формирует равномерно упрочнённый поверхностный слой. В противном случае наличие неравномерности и зон сниженной интенсивности напряжений может указывать на нестабильность технологического процесса, что снижает надежность деталей при эксплуатации [10; 24].

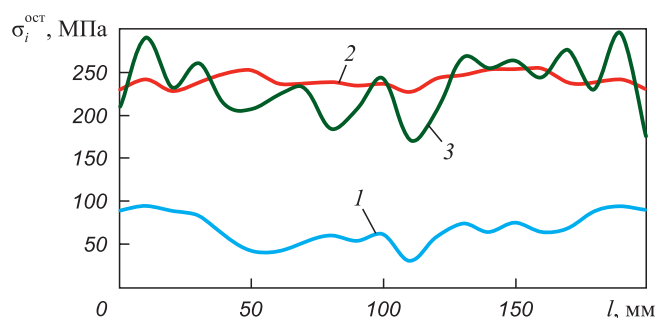


Рис. 10. Распределение интенсивности остаточных напряжений по длине детали при разных степенях относительного обжатия Q : 1 – 0,5%; 2 – 1,5%; 3 – 2,5%

Fig. 10. Distribution of residual stress intensity along the part length at different degrees of relative compression Q : 1 – 0.5%; 2 – 1.5%; 3 – 2.5%

На рис. 11 показаны изополосы распределения интенсивности остаточных напряжений по поперечному сечению и длине детали при средней степени относительного обжатия ($Q = 1,5\%$). Видно, что напряжение распределено достаточно равномерно как по длине, так и по поперечному сечению заготовки. При этом максимальное значение интенсивности остаточных напряжений (191 МПа) на 25% меньше предела текучести материала, что является убедительным доказательством эффективности процесса правки и упрочнения цилиндрических деталей.

Полученные результаты исследования распределения напряжений дают возможность более глубоко понять механизм и характер формирования остаточных напряжений в материале детали. Однако для комплексного анализа и полноценной оценки качества процесса упрочнения необходимо учитывать также и деформационные характеристики материала. Именно деформация непосредственно отражает степень изменения геометрии детали и позволяет оценить, в какой мере возникающие напряжения влияют на конечную форму и эксплуатационные свойства деталей. На рис. 12 показано распределение интенсивности относительных пластических деформаций по радиусу и длине деталей после обработки при разных степенях относительного обжатия Q .

Из рис. 12, а видно, что при $Q = 2,5\%$ формируется выраженная зона пластической деформации в поверхностных слоях, что соответствует эффективному упрочнению. При среднем обжатии ($Q = 1,5\%$) зона

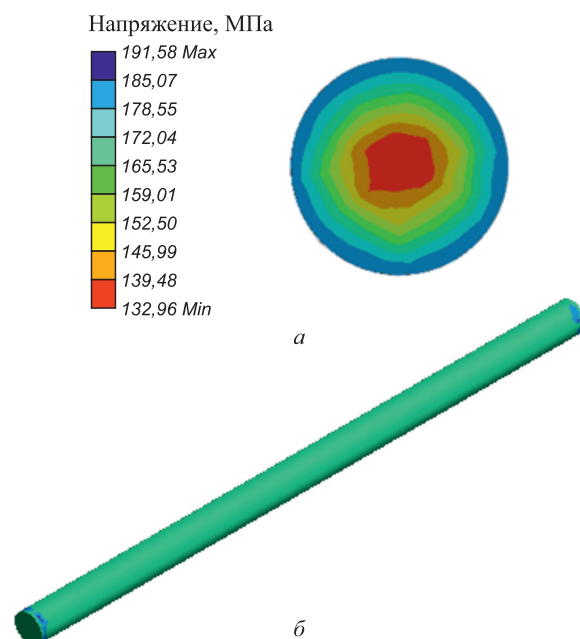


Рис. 11. Изополосы распределения интенсивности остаточных напряжений по поперечному сечению (а) и длине (б) детали при $Q = 1,5\%$

Fig. 11. Isobands of intensity distribution of residual stresses across the cross-section (a) and along the length (b) of the part at $Q = 1.5\%$

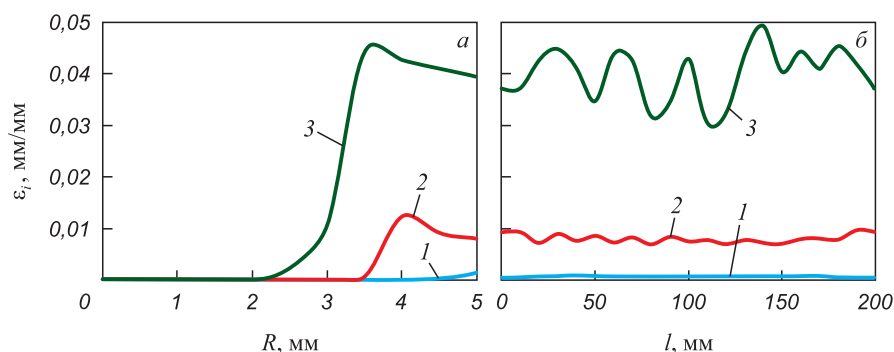


Рис. 12. Распределение интенсивности пластической деформации по сечению (а) и длине (б) детали при разных степенях относительного обжатия Q :
1 – 0,5 %; 2 – 1,5 %; 3 – 2,5 %

Fig. 12. Distribution of plastic deformation intensity across the section (а) and along the length (б) of the part at different degrees of relative compression Q :
1 – 0.5 %; 2 – 1.5 %; 3 – 2.5 %

упрочнения менее глубокая, но достаточно стабильная. При $Q = 0,5\%$ пластическая деформация практически отсутствует, что подтверждает низкую эффективность обработки. По длине заготовки (рис. 12, б) наилучшая равномерность относительной пластической деформации наблюдается при $Q = 1,5\%$, а при $Q = 2,5\%$ возникают колебания, указывающие на возможную неравномерность упрочнения. Таким образом, при степени относительного обжатия в пределах $Q = 1,5\%$ достигается компромисс между глубиной упрочнения и равномерностью распределения остаточных напряжений в заготовке, обеспечивая рациональный режим совмещения правки и упрочнения цилиндрических заготовок.

Выводы

В настоящей работе рассмотрен комбинированный процесс правки и поверхностного пластического деформирования цилиндрических заготовок, обладающих начальными отклонениями от прямолинейности.

По результатам теоретического анализа условий вращения искривленной заготовки между клиновыми плитами установлено максимальное значение исходного прогиба заготовки $f_{исх}$, которое не должно превышать 4 мм на длине 200 мм. При превышении этого значения вместо вращения заготовки между плитами будет происходить проскальзывание, которое исключает реализацию процесса правки и упрочнения.

На основе конечно-элементного моделирования процесса правки и упрочнения в среде ANSYS Workbench определены значения остаточной кривизны заготовки λ . Установлены зависимости остаточной кривизны λ от исходного прогиба $f_{исх}$, а также степени относительного обжатия. Результаты моделирования показали, что максимальная величина исходного прогиба для эффективности правки и упрочнения составляет 3,5 мм на длине 200 мм.

Определена рациональная величина степени относительного обжатия $Q = 1,5\%$, которая обеспечивает равномерность распределения остаточных напряжений и пластической деформации, а также качественное выправление искривленной детали без повреждения поверхностного слоя.

Исследование подтвердило перспективность совмещенного процесса правки и упрочнения ППД для устранения начальных прогибов и повышения прочности цилиндрических деталей. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологий упрочняющей правки в машиностроении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Antimonov A.M., Pushkareva N.B., Reshetnikov E.G. Cylindrical shell edges bending process technological features. In: *Proceedings of the 4th Int. Conf. on Industrial Engineering. ICIE 2018*. Springer; 2019:811–817. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_84
2. Мураткин Г.В., Сарафанова В.А. Правка валов поверхностным пластическим деформированием с упругим изгибом заготовки в процессе обработки. *Вестник машиностроения*. 2020;(5):62–66. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2020-5-62-66>
Muratkin G.V., Sarafanova V.A. Straightening of shafts by surface plastic deformation with elastic flexure of the workpiece. *Russian Engineering Research*. 2020;40(8):637–641. <https://doi.org/10.3103/S1068798X20080183>
3. Swic A., Gola A., Sobaszek L., Smidova N. A thermo-mechanical machining method for improving the accuracy and stability of the geometric shape of long low-rigidity shafts. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2021;32: 1939–1951. <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01733-4>
4. Xing S. Analytical modeling for mechanical straightening process of case-hardened circular shaft. *Applied Mechanics*. 2023;4(2):715–728. <https://doi.org/10.3390/applmech4020036>
5. Lu H., Zang Y., Zhang X., Zhang Y., Li L. A general stroke-based model for the straightening process of D-type

- shaft. *Processes*. 2020;8(5):528.
<https://doi.org/10.3390/pr8050528>
6. Димов Ю.В. Формирование остаточных напряжений при виброабразивной обработке деталей. *Вестник машиностроения*. 2024;103(10):821–828.
<https://doi.org/10.36652/0042-4633-2024-103-10-821-828>
Dimov Yu.V. Formation of residual stresses during vibroabrasive machining of parts. *Vestnik mashinostroeniya*. 2024;103(10):821–828. (In Russ.).
<https://doi.org/10.36652/0042-4633-2024-103-10-821-828>
 7. Li S., Wei C., Long Y. Deformation analysis of engineering reinforcement straightening based on Bauschinger effect. *International Journal of Steel Structures*. 2020;20:1–12.
<https://doi.org/10.1007/s13296-019-00264-w>
 8. Hwang Y.M., Lin Y.Q., Cheng G. Roller plunge schedule and roller design in straightening of metal H-beams. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025;136:2245–2262.
<https://doi.org/10.1007/s00170-024-14942-5>
 9. Суслов А.Г. и др. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений. Москва: Машиностроение; 2006:448.
 10. Мураткин Г.В., Сарафанова В.А., Суворов М.О. Повышение релаксационной стойкости материала поверхностным пластическим деформированием. *Технология металлов*. 2017;(7):19–26.
Muratkin G.V., Sarafanova V.A., Suvorov M.O. Improving on relaxation resistance of material by surface plastic straining methods. *Tekhnologiya metallov*. 2017;(7):19–26. (In Russ.).
 11. Liu C., Dong Z., Ma L., Hou X., Qiao N. Research on optimization of basic rail top bending prediction model. *Scientific Reports*. 2024;14:9844.
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-60583-9>
 12. Шинкин В.Н. Расчет сил и моментов семироликовой правильной машины при предварительной правке стального листа. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2016;59(12):870–874.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-12-870-874>
Shinkin V.N. Calculation of steel sheet's curvature under preliminary flattening on the seven-roller straightening machine. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016;59(12):870–874. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-12-870-874>
 13. Безязычный В.Ф. Влияние технологических условий обработки на глубину наклепа в поверхностном слое детали при обработке лезвийным инструментом. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2019;15(8(176)):348–354.
Bezazychnyi V.F. Effect of technological processing conditions on cold-work hardening depth in surface layer of part at machining by blade tool. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2019;15(8(176)):348–354. (In Russ.).
 14. Lammi C.J., Lados D.A. Effects of residual stresses on fatigue crack growth behavior of structural materials: Analytical corrections. *International Journal of Fatigue*. 2008;33(7): 858–867. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2011.01.019>
 15. Пат. № 2827624 С1 РФ. Способ правки и упрочнения цилиндрических деталей / С.А. Зайдес, М.З. Буй; заявлено 15.03.2024; опубликовано 30.09.2024.
 16. Зайдес С.А., Буй М.З. Влияние геометрических параметров цилиндрической заготовки на напряженно-деформированное состояние при выправлении локального участка гладкими плитами. *Технология металлов*. 2025;(3):28–38.
<https://doi.org/10.31044/1684-2499-2025-0-3-28-38>
Zaides S.A., Bui M.Z. Effect of geometrical parameters of cylindrical workpiece on stress-strain state when straightening of local area with flat plates. *Tekhnologiya metallov*. 2025;(3):28–38. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31044/1684-2499-2025-0-3-28-38>
 17. Sun J., Li K., Sun M., Lu X., Peng Y. Longitudinal profiled plate straightening process based on curvature integral method. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2021;28:291–302.
<https://doi.org/10.1007/s42243-020-00538-2>
 18. Зайдес С.А., Буй М.З., Пономарев Б.Б. Правка локального участка цилиндрических деталей перед обкаткой гладкими плитами. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2024;22(3):71–80.
<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-71-80>
Zaides S.A., Bui M.Z., Ponomarev B.B. Straightening of a local section of cylindrical parts before rolling with smooth plates. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2024;22(3):71–80. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-71-80>
 19. Meng Q., Zhai R., Fu P., Zhang Y., Zhao J. Springback analysis of rotary bending considering strain paths. *Journal of Materials Processing Technology*. 2023;315:117930.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.117930>
 20. Зайдес С.А., Буй М.З. Определение напряженного состояния в очаге деформации при обкатке заготовки из углеродистой стали на локальном участке. *Черные металлы*. 2025;(4):41–47. <https://doi.org/10.17580/chm.2025.04.07>
Zaides S.A., Bui M.Z. Determination of the stress state in the deformation zone when rolling rotation of a carbon steel workpiece at a local site. *Chernye Metally*. 2025;(4):41–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/chm.2025.04.07>
 21. Shin J.H., Kim S.W., Yoon H.S. A stroke model for straightening partially heat-treated ball screws with complex mechanical properties. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2024;25:1875–1884.
<https://doi.org/10.1007/s12541-024-01012-9>
 22. Мураткин Г.В., Котова И.В. Критерии изгибной жесткости стержневых деталей. *Ремонт, восстановление, модернизация*. 2006;(2):42–45.
Muratkin G.V., Kotova I.V. Criteria for bending rigidity of rod parts. *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiya*. 2006;(2):42–45. (In Russ.).
 23. Yi G., Wang Y., Liu X., Wang Ch. Multi-roll levelling for wave defects of metal sheets based on the beam-membrane method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;105:4783–4795.
<https://doi.org/10.1007/s00170-019-04615-z>
 24. Niu T., Luo Y., Chen F., Baddour N., Li Ch., Peng B. Investigation of rotary straightening process for the rollers of planetary roller screw. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2025;47:116.
<https://doi.org/10.1007/s40430-025-05434-y>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Семен Азикович Зайдес, д.т.н., профессор кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий, Иркутский национальный исследовательский технический университет

ORCID: 0000-0001-9416-7749

E-mail: zsa@istu.edu

Мань Зунг Буй, аспирант кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет

ORCID: 0009-0003-6390-105X

E-mail: manhdungbuik52@gmail.com

Semen A. Zaides, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Materials Science, Welding and Additive Technologies, Irkutsk National Research Technical University

ORCID: 0000-0001-9416-7749

E-mail: zsa@istu.edu

Manh Dung Bui, Postgraduate of the Chair of Technology and Equipment for Mechanical Engineering Production, Irkutsk National Research Technical University

ORCID: 0009-0003-6390-105X

E-mail: manhdungbuik52@gmail.com

Поступила в редакцию 29.12.2025

После доработки 15.01.2026

Принята к публикации 03.04.2026

Received 29.12.2025

Revised 15.01.2026

Accepted 03.04.2026



УДК 669.04

DOI 10.17073/0368-0797-2026-3-305-307



Краткое сообщение

Short report

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРИЛЕГАЮЩЕМ К СВОДУ ПРОСТРАНСТВЕ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ ПРИ РАБОТЕ ПЛОСКОПЛАМЕННОЙ ГОРЕЛКИ

Е. В. Лалетина , И. А. Левицкий, К. С. Шатохин

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

laletina1992@mail.ru

Аннотация. Качество выпускаемого металлургической промышленностью листового проката зависит от правильного выбора и соблюдения технологических режимов. Нагрев металла перед прокаткой обычно осуществляют в методических печах. В процессе нагрева в рабочем пространстве печи происходят сложные явления, для моделирования которых необходимо использовать средства CFD. Характер горения топлива и движения продуктов сгорания, определяющие подачу теплоты к поверхности нагреваемого металла, определяются конструкциями используемых горелок. В печах с плоским сводом применяют плоскопламенные горелки. В работе с помощью Ansys Fluent моделируются процессы, происходящие во фрагменте рабочего пространства нагревательной печи, оснащенной плоскопламенными горелками.

Ключевые слова: плоскопламенная горелка, температурное поле, рециркуляционные зоны, ANSYS Fluent, RNG $k-\epsilon$ модель турбулентности, теплообмен, горение природного газа, закрученный поток

Для цитирования: Лалетина Е.В., Левицкий И.А., Шатохин К.С. Распределение температуры в прилегающем к своду пространстве методической печи при работе плоскопламенной горелки. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2026;69(3):305–307.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-305-307>

TEMPERATURE DISTRIBUTION IN ROOF-ADJACENT SPACE OF REHEATING FURNACE WITH A FLAT-FLAME BURNER

E. V. Laletina , I. A. Levitskii, K. S. Shatokhin

National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

laletina1992@mail.ru

Abstract. The quality of sheet metal products produced in the metallurgical industry depends on the correct selection and adherence to process conditions. Metal heating before rolling is typically performed in continuous furnaces. During the heating process, complex phenomena occur in the furnace working space, requiring the use of CFD systems to simulate these processes. The specialties of fuel combustion and the movement of combustion products, which stipulate the heat transfer to the surface of the heated metal, are determined by the design of the burners used. Flat-roof furnaces use flat-flame burners. The Ansys Fluent simulates the processes occurring in a portion of the working space of a heating furnace equipped with flat-flame burners.

Keywords: flat-flame burner, temperature field, recirculation zones, ANSYS Fluent, RNG $k-\epsilon$ turbulence model, heat transfer, natural gas combustion, swirling flow

For citation: Laletina E.V., Levitskii I.A., Shatokhin K.S. Temperature distribution in roof-adjacent space of reheating furnace with a flat-flame burner. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2026;69(3):305–307. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-305-307>

Принцип работы плоскопламенных горелок основан на создании закрученного потока, который благодаря эффекту Коанда безотрывно растекается по поверхности свода, формируя плоский факел, обес-

печивающий интенсивный конвективный нагрев кладки свода. Нагрев металла в таких печах происходит в значительной степени излучением от раскаленного свода.

В горелках типа ГР [1] осуществляются подача газообразного топлива вдоль оси горелки и тангенциальная подача окислителя (воздуха), в результате чего происходит их активное перемешивание в закрученном потоке, способствующее началу горения на поверхности горелочного камня, оказывающего каталитическое воздействие на этот процесс.

Растекающийся по поверхности свода поток частично состоит из продуктов сгорания, а частично – из перемешанных, но еще не сгоревших реагентов. В области рабочего пространства под горелками возникает эффект разрежения, приводящий к возникновению внутренних зон рециркуляции [2], в которых активные химические компоненты возвращаются к корню факела и активно перемешиваются с более горячими продуктами сгорания, где вступают в реакцию, увеличивая стабилизацию пламени в областях с относительно низкими скоростями [3; 4].

Совместное решение задач газодинамики, конвективной диффузии, горения топлива и теплообмена в пространстве, примыкающем к промышленной плоскопламенной горелке, является актуальным, поскольку правильность выбора конструктивных и режимных параметров обеспечивает возникновение

разомкнутого факела, безотрывно растекающегося по поверхности свода, обеспечивающего его конвективный нагрев и последующую интенсивную передачу теплоты металлу радиационными механизмами. Сложность и взаимозависимость решаемых задач обусловили необходимость использования CFD-комплекса ANSYS Fluent.

Для исследования вопроса была построена 3D-модель фрагмента печи и плоскопламенной горелки. Для описания турбулентного течения применена $k-\epsilon$ модель турбулентности (RNG), для описания конвективной диффузии – модель Species Transport, взаимодействие химии и турбулентности учитывали с помощью подмодели Eddy Dissipation, параметры одноступенчатой реакции горения метана взяли из базы данных ANSYS Fluent.

Параметры моделируемой горелки соответствуют плоскопламенной горелке с тангенциальным подводом воздуха¹ со следующими геометрическими характеристиками: диаметр горелочного камня – 250 мм, диаметр входного патрубка для воздуха – 150 мм, диаметр газового сопла – 60 мм, общая длина горелочного камня – 450 мм.

На рис. 1 показан разрез температурного поля фрагмента печи с установленной горелкой для расчета с расходом природного газа – 60 нм³/ч, воздуха – 600 нм³/ч (коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,05$) при температуре воздуха и газа 20 °С. Свод и под печи приняты адиабатными.

Из представленных данных видно, что при выбранных параметрах происходит требуемое формирование плоского факела – выходящий из горелки поток прижимается к своду и растекается вдоль него, что соответствует принципу работы таких горелок. Изменение температуры печной среды вдоль оси горелки, представленное на рис. 2, показывает, что ядро горения с температурой в диапазоне 1850 – 2050 К локализовано в подсводовом слое толщиной около 75 мм. Наличие

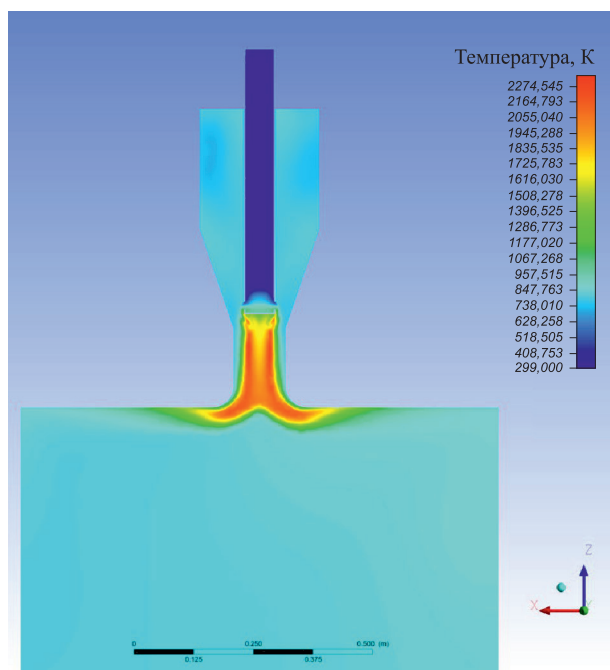


Рис. 1. Разрез температурного поля печной среды внутри фрагмента нагревательной печи с плоскопламенной горелкой

Fig. 1. Section of temperature field of the furnace environment inside the furnace heating section with a flat flame burner

¹ Промышленная Инжиниринговая Группа. Горелки радиационные типа «ГР»-П. URL: <http://kaluga.p-irgroup.ru/katalog/gorelki/metallurgicheskie-pechi-stendy-kovshi-podogreva/promyshlennye-gazovye-gorelki/radiatsionnye-gorelki/gorelki-radiatsionnye-tipa-gr-p.html> (дата обращения: 20.04.2026).

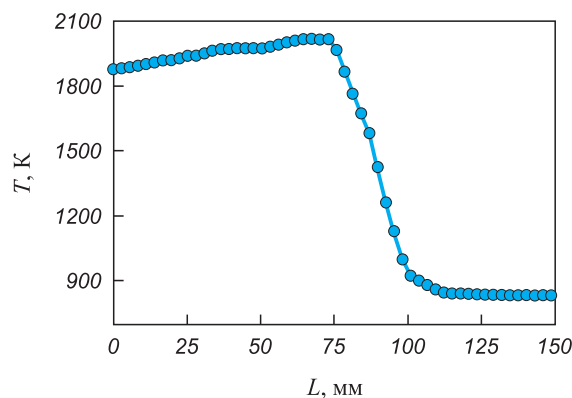


Рис. 2. Изменение температуры печной среды вдоль оси плоскопламенной горелки

Fig. 2. Change in temperature of the furnace environment along the axis of a flat flame burner

максимума температуры 2050 К в точке, отстоящей от плоскости поверхности свода на расстоянии $L = 75$ мм, обусловлено, видимо, тем, что в поток продуктов сгорания, смешанных с непрореагировавшими компонентами (температура смеси около 1850 К), подмешивается, вследствие разрежения под горелкой, часть печной среды того же состава. Это сопровождается дожиганием непрогоревшего топлива в зоне рециркуляции. При дальнейшем удалении от свода температура печной среды плавно снижается, достигая 800 – 900 К на расстоянии 100 – 150 мм от кладки.

Оптимизация конструкций и режимных параметров горелок для промышленных печей обусловлена необходимостью повышения энергоэффективности [5], а методы CFD позволяют улучшить процессы горения.

Выводы

Разработанная модель газодинамики, конвективной диффузии, горения топлива и теплообмена во фрагменте нагревательной печи с плоскопламенной горелкой адекватно отражает процессы, происходящие в рабочем пространстве печи, и может быть использована для определения рациональных режимных параметров работы горелки и (при дополнении моделью радиационного

теплообмена) соответствующих им тепловых условий на поверхности нагреваемого металла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Винтовкин А.А., Ладыгичев М.Г., Гусовский В.Л., Лифшиц А.Е. Современные горелочные устройства (конструкции и технические характеристики): Справочное издание. Москва: Машиностроение-1; 2001:496.
2. Baej H. Swirl Flows. Effects of geometry and gas composition on swirling flow: PhD Thesis, Chapter 2. 2015:35–41.
3. Ermolaev A.N., Khaustova O.V., Yakovets A.P. Finite element analysis of a thermally insulated infrared radiant emitter. *MATEC Web of Conferences*. 2018;194:01016. <http://doi.org/10.1051/mateconf/201819401016>
4. Li N., Bykov V., Moroshkina A., Sereshchenko E., Gubernov V. Two dimensional flame structure of oscillating burner-stabilized methane-air flames. *Combustion and Flame*. 2025;276:114115. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2025.114115>
5. Strogonov K., Popov A., Zdarov A., Kornilova L. For calculation of perforated hearth burner equipment to the bubble-type furnaces. In: *Proceedings of the Int. Symp. on Sustainable Energy and Power Engineering 2021. SUSE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore; 2022:143–151. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9376-2_14

Сведения об авторах

Information about the Authors

Екатерина Витальевна Лалетина, ассистент кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

E-mail: laletina1992@mail.ru

Игорь Анисимович Левицкий, к.т.н., доцент кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

ORCID: 0000-0002-9345-3628

E-mail: lewwwis@mail.ru

Константин Станиславович Шатохин, к.т.н., доцент кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

E-mail: temp@misis.ru

Ekaterina V. Laletina, Assistant of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, National University of Science and Technology “MISIS”

E-mail: laletina1992@mail.ru

Igor’ A. Levitskii, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, National University of Science and Technology “MISIS”

ORCID: 0000-0002-9345-3628

E-mail: lewwwis@mail.ru

Konstantin S. Shatokhin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, National University of Science and Technology “MISIS”

E-mail: temp@misis.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

Е. В. Лалетина – формирование концепции, проведение расчетов в ANSYS Fluent, подготовка текста, формирование выводов, анализ результатов.

И. А. Левицкий – проведение расчетов в Ansys Fluent, анализ результатов.

К. С. Шатохин – научное руководство, анализ результатов, доработка текста, корректировка выводов.

E. V. Laletina – conceptualization, performing calculations in ANSYS Fluent, writing the text, formation of conclusions, analysis of results.

I. A. Levitskii – performing calculations in Ansys Fluent, analysis of results.

K. S. Shatokhin – scientific guidance, analysis of results, revision of the text, correction of conclusions.

Поступила в редакцию 27.03.2026

После доработки 30.03.2026

Принята к публикации 03.04.2026

Received 27.03.2026

Revised 30.03.2026

Accepted 03.04.2026



УДК 669.162.212.9:669.162.211.1

DOI 10.17073/0368-0797-2026-3-308-315



Оригинальная статья

Original article

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАПОЛНЕНИЯ ГОРНА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

А. Н. Дмитриев¹, Д. А. Витькин², М. О. Золотых¹, Г. Ю. Витькина¹

¹ Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

² АО «Калугин» (Россия, 620078, Екатеринбург, ул. Мира, 33)

20procents@mail.ru

Аннотация. В статье представлена математическая модель для оценки наполнения и опорожнения горна доменной печи жидкими продуктами плавки – чугуном и шлаком. Разработанный алгоритм основан на интеграции данных материального баланса, химического состава шихтовых материалов и истории выпусков, что обеспечивает высокую точность расчетов как в реальном времени, так и при анализе исторических данных. Модель применена к доменной печи полезным объемом 2000 м³ с учётом геометрических параметров горна. Учтены физические свойства материалов, включая плотность чугуна и кажущуюся плотность вспененного шлака, а также порозность коксовой насадки. Алгоритм включает в себя несколько этапов: запрос данных о последних шести выпусках, обработку пропущенных значений методом импутации средними, валидацию временных интервалов и расчёт динамики наполнения и опорожнения горна. Расчёт выполняется с шагом дискретизации 5 мин с использованием одномерной модели, учитывающей поступление железа с рудой и золой кокса, а также объёмы выпущенных продуктов. Особое внимание уделено коррекции результатов с учётом допустимых уровней наполнения и временной задержки начала выпуска шлака. Модель позволяет прогнозировать уровни чугуна и шлака в любой заданный момент времени, что делает её полезным инструментом для технологов. Результаты визуализируются в виде 3D-профилей заполнения горна. Разработанная система способствует повышению безопасности, стабильности и эффективности доменного процесса, предотвращая переполнение горна и оптимизируя режим выпусков. Модель может быть интегрирована в цифровые двойники доменных печей.

Ключевые слова: доменная печь, горн, математическое моделирование, наполнение, опорожнение, контроль, объем расплава, высота чугуна и шлака

Благодарности: Работа выполнена в рамках реализации Государственного задания ИМЕТ УрО РАН.

Для цитирования: Дмитриев А.Н., Витькин Д.А., Золотых М.О., Витькина Г.Ю. Математическая модель наполнения горна доменной печи. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2026;69(3):308–315. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-308-315>

MATHEMATICAL MODEL OF BLAST FURNACE HEARTH FILLING

A. N. Dmitriev¹, D. A. Vit'kin², M. O. Zolotykh¹, G. Yu. Vit'kina¹

¹ Vatolin Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (101 Amundsena Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)

² JSC Kalugin (33 Mira Str., Yekaterinburg 620078, Russian Federation)

20procents@mail.ru

Abstract. The article presents a mathematical model for estimating the filling and emptying of a blast furnace hearth with liquid smelting products, namely iron and slag. The developed algorithm is based on integration of material balance data, chemical composition of charge materials, and history of discharges. This ensures high accuracy of calculations both in real time and when analyzing historical data. The model is applied to a blast furnace with a volume of 2000 m³, with the hearth geometric parameters being taken into account. In this study, physical properties of the materials in question are considered, incorporating such metrics as hot iron density, apparent density of foamed slag, and porosity of coke charge. The algorithm comprises multiple stages, including the request of data on the last six discharges, the processing of missing values by means of imputation with averages, validation of time intervals, and calculation of the dynamics of furnace filling and emptying. The calculation was performed with a 5-minute sampling interval using a one-dimensional model that takes into account the supply of iron with ore and coke ash, as well as the volumes of products tapped. It is imperative to emphasize the meticulous attention devoted to the results rectification with consideration for the stipulated filling limits and the temporal allowance prior to the initiation of slag discharge. The model enables the calculation of the levels of hot iron and slag at any given moment in time, thus constituting a useful tool for technologists. The results are presented

as three-dimensional profiles illustrating the furnace filling process. The developed system contributes to improving the safety, stability, and efficiency of the blast furnace process by preventing furnace overflow and optimizing the tapping mode. The model can be integrated into digital twins of blast furnaces.

Keywords: blast furnace, furnace, mathematical modeling, filling, emptying, control, melt volume, height of hot iron and slag

Acknowledgements: The work was performed within the framework of the State assignment of the Vatolin Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Dmitriev A.N., Vit'kin D.A., Zolotykh M.O., Vit'kina G.Yu. Mathematical model of blast furnace hearth filling. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2026;69(3):308–315. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-308-315>

ВВЕДЕНИЕ

Современные подходы к управлению процессом наполнения и опорожнения горна доменной печи продуктами плавки строятся на интеграции различных методов. Ключевыми направлениями являются разработка динамических балансовых математических моделей, создание цифровых двойников, применение методов контроля – от терморпар до тензодатчиков и акустических систем.

Одним из наиболее распространенных подходов к оценке уровня жидких продуктов в горне доменной печи является использование моделей, основанных на материальном балансе [1]. Для повышения точности прогнозов в таких моделях используются сложные алгоритмы, в частности, расширенный фильтр Калмана, который позволяет интегрировать данные измерений в динамику системы, описываемой нелинейными уравнениями, учитывая влияние тотермана [2 – 4].

Тотерман представляет собой непрореагировавшие и нерасплавившиеся куски шихты и кокса, накапливающиеся в нижней части доменной печи. Его пористость, плотность и состояние («плавающее» или стационарное) оказывают значительное влияние на поведение жидких продуктов плавки. Авторы работы [5] создали модель, которая описывает работу горна с различными состояниями тотермана и учетом действующих на него сил, что позволило рассчитать профиль тотермана и, соответственно, объем и форму пространств, заполненных чугуном и шлаком.

Особую популярность приобрели комбинированные численные методы, такие как CFD-DEM (*Computational Fluid Dynamics – Discrete Element Method*) для более детального изучения взаимодействия между тотерманом и жидкими продуктами плавки. Эти модели позволяют отслеживать движение отдельных частиц кокса и визуализировать потоки жидкостей [6].

В существующие онлайн-модели [7; 8] интегрируются реальные данные о выходе чугуна и шлака, времени выпуска для непрерывной оценки уровня расплава с учётом производительности доменной печи. Для предотвращения накопления ошибок применяется процедура коррекции, обеспечивающая стабильность модели за счёт привязки к технологически допустимым пределам уровней в заданные моменты времени.

В работе [9] предложена система уравнений, позволяющая рассчитать оптимальные параметры выпуска чугуна и шлака (баланс объемов продуктов плавки в период наполнения и выпуска). Практическое применение этой модели на доменной печи ОАО «Енакиевский металлургический завод» показало, что переход к большему количеству выпусков с уменьшением длительности наполнения и выпуска позволяет избежать переполнения горна и улучшить стабильность процесса [9].

Автоматизированные системы для моделирования движения шихтовых материалов и накопления расплава в горне доменной печи позволяют определять и визуализировать конфигурацию слоев железорудных материалов и кокса по высоте рабочего пространства с учетом заданной рудной нагрузки в равноплощадных кольцевых зонах доменной печи [10].

В настоящее время большинство металлургических комбинатов перешли или находятся на пути к созданию цифровых двойников доменных печей, позволяющих обрабатывать большие объемы информации (*Big Data* [11]), визуализировать процесс и вести интеллектуальное управление процессом. Цифровой двойник получает данные о качестве шихты и параметрах процесса в реальном времени, прогнозирует показатели эффективности печи и рекомендует установки для управляемых переменных и их оптимизации [12 – 16].

Инновационным подходом к контролю уровня расплава в горне доменной печи является использование тензометрических датчиков, которые измеряют деформацию кожуха печи. Этот метод реализован в системе, разработанной компанией TMT (*Tapping Measuring Technology*) и установленной на доменной печи № 5 компании ROGESA [17 – 18]. Наряду с этим, в научной литературе упоминаются и другие подходы к контролю наполнения горна, включая акустические и радиолокационные [19].

Внедрение этих технологий на металлургических предприятиях как в России, так и за рубежом демонстрирует значительный потенциал для повышения эффективности, безопасности и экономичности доменного производства.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В настоящей работе предложен алгоритм и разработана комплексная модель для определения уровней

Таблица 1. Основные параметры профиля доменной печи

Table 1. The main parameters of the blast furnace profile

Наименование параметра	Значение параметра
Полезный объём, м ³	2000
Диаметр горна, мм	9750
Высота горна, мм	3600
Объём горна, м ³	269

чугуна и шлака в доменной печи на основе исторических данных (база) и математического моделирования на примере доменной печи полезным объемом 2000 м³ (табл. 1).

Для расчета использована база данных работы доменной печи, включая основные показатели плавки, химические составы железорудных материалов (ЖРС), кокса, флюсов, добавок, режимы загрузки и т. д. Для прогноза наполнения горна продуктами плавки учитывается каждый скип по отдельности и сколько с ним вносится железа (как с ЖРС, так и с золой кокса). Происходит расчет массы железа, вносимого в печь, и пересчет массы получаемого чугуна. С учетом того, что плотность чугуна известна и имеет узкий диапазон 6,9 – 7,2 т/м³, имеем объем, занимаемый чугуном в горне (соответственно, высоту). Пусть статистически (при обработке базы данных доменной печи) установлено, что в доменной печи в полном горне чугун занимает около 40 %, шлак – 60 % от объема горна. Толщина слоя чугуна в данном случае при полном наполнении горна будет равна 1,4 м, толщина слоя шлака – 2,2 м.

Вычисление объема горна, который занимает шлак, долгое время было осложнено отсутствием данных о его кажущейся плотности во вспененном состоянии, а также значений порозности горнового кокса.

Порозность коксовой насадки изменяется в широких пределах и зависит от механического и химического разрушения кокса в доменной печи. Порозность кокса в горне доменной печи колеблется в пределах 0,30 – 0,45 в зависимости от условий работы агрегата [20].

Определение плотности шлака затруднено в связи с его вспениванием в горне доменной печи и известное значение 2,60 – 2,76 т/м³, которое было определено после дегазирования, не подходит для определения объема расплава в металлоприемнике. По результатам исследования [21] средняя кажущаяся плотность составила 1205 кг/м³.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА НАПОЛНЕНИЯ ГОРНА

Блок-схема основных шагов алгоритма служит для общего понимания логики работы алгоритма, не вдаваясь в детали каждого шага, и представлена на рис. 1. Алгоритм расчета наполнения горна доменной печи представляет собой процедуру, включающую запрос

данных, их валидацию (проверку на адекватность) и многокомпонентный расчет. Он начинается с пользовательского запроса на определенную дату и время, после чего из базы данных извлекаются данные о последних шести выпусках.

После получения таблицы выпусков из базы данных алгоритм переходит к обработке пропущенных значений. В реальных условиях эксплуатации данные о выпусках могут содержать пропуски, например, из-за сбоев в системе сбора данных. Для обеспечения непрерывности расчетов, алгоритм заполняет все пропущенные значения наполнения чугуном и шлаком средними значениями по соответствующим столбцам в полученной таблице. Этот метод импутации позволяет сохранить общую структуру данных и избежать ошибок, которые могли бы возникнуть при работе с неполными данными. Хотя использование средних значений является упрощением, оно позволяет продолжить расчет и получить результат, который будет достаточно точным для большинства практических применений, особенно если количество пропущенных значений невелико.

Эти данные проходят строгую проверку на корректность. Затем выполняется основной расчет, который



Рис. 1. Основная блок-схема алгоритма расчета наполнения горна доменной печи

Fig. 1. The main block diagram of the blast furnace hearth filling calculation algorithm

Таблица 2. Набор констант для последующего расчета

Table 2. A set of constants for subsequent calculation

Константа	Значение	Описание
max_interval	300 мин	Максимально допустимый интервал между выпусками
num_of_release	6	Количество предыдущих выпусков для анализа
calc_step	5 мин	Шаг дискретизации для расчета наполнения
SH_release_delay	10 мин	Задержка начала выпуска шлака
CH_max	1,4	Максимальный уровень наполнения чугуном
SH_max	2,2	Максимальный уровень наполнения шлаком
CH_A	0,001718	Коэффициент для расчета высоты выпущенного чугуна
SH_A	0,0067	Коэффициент для расчета высоты выпущенного шлака
CH_B	0,00013	Коэффициент для расчета наполнения чугуном
SH_B	0,000000626	Коэффициент для расчета наполнения шлаком

моделирует как опорожнение горна по данным предыдущих выпусков, так и его наполнение между ними с использованием одномерной математической модели. Результатом являются рассчитанные уровни чугуна и шлака в заданный момент времени.

Начало расчета

Этот этап включает в себя два подэтапа: получение пользовательского запроса и установку констант, которые будут использоваться на протяжении всего процесса расчета. Пользовательский запрос задает конкретную дату и время, для которого необходимо рассчитать наполнение горна, что делает алгоритм гибким и применимым к различным моментам времени. Установка констант, таких как максимальный интервал между выпусками, количество выпусков для анализа и другие параметры, обеспечивает стабильность и предсказуемость поведения алгоритма (табл. 2).

Подготовка данных

Производится запрос из базы данных необходимых показателей и их предварительная обработка для обеспечения полноты и корректности. На этом этапе алгоритм обращается к хранилищу данных, чтобы получить информацию о выпусках, которая будет использоваться для проверки и расчета. Важно, что запрос данных охватывает достаточно широкий временной интервал, чтобы учесть все предыдущие и последующие выпуски относительно заданного момента времени t . После получения данных производится их очистка и восстановление пропущенных значений.

Выбор и валидация выпусков

Алгоритм должен выбрать из полученной таблицы выпусков два набора данных: *before* и *after*. Набор

before включает в себя *num_of_release* (6) последних выпусков, завершившихся до момента времени t . Выбор именно последних шести выпусков обусловлен необходимостью анализа недавней истории работы печи для более точного прогнозирования текущего состояния. Набор *after* содержит один выпуск, который начался до или в момент t и еще не завершился. Далее алгоритм выполняет ряд проверок на корректность. Эти проверки включают контроль количества выбранных выпусков, интервалов между ними и временных рамок. Если какая-либо из проверок не проходит, алгоритм выдает ошибку и прекращает выполнение.

ОСНОВНОЙ РАСЧЕТ

Выполнение расчета наполнения

После успешного прохождения всех этапов валидации данных, алгоритм переходит к основному расчету уровней наполнения горна чугуном (*level_CH*) и шлаком (*level_SH*). Расчет включает в себя несколько этапов:

– *инициализация уровней*: уровни *level_CH* и *level_SH* инициализируются максимальными значениями *CH_max* и *SH_max* соответственно;

– *расчет опорожнения*: для каждого из шести выпусков из таблицы *before* рассчитывается объем выпущенного чугуна и шлака ($\Delta h_{CH} = V_{\text{вып}} \times CH_A$; $\Delta h_{SH} = V_{\text{вып}} \times SH_A$), эти объемы вычитаются из текущих уровней *level_CH* и *level_SH*;

– *корректировка на частичный выпуск*: если был найден выпуск после времени t (таблица *after*), то рассчитывается объем чугуна и шлака, выпущенный от начала этого выпуска до момента t , который также вычитается из уровней наполнения;

– *расчет наполнения*: для каждого интервала времени между выпусками (а также между последним выпуском и моментом t) рассчитывается прирост уров-

ней чугуна и шлака с шагом $calc_step$ (5 мин) на основе одномерной модели, использующей данные о дутье, загрузке и химическом составе материалов

$$(\Delta h_{CH} = (O[Fe'] / I[CH_{Fe}']) \times CH_B \times calc_step;$$

$$\Delta h_{SH} = O[P_Vsh'] \times (O[Fe'] / I[CH_{Fe}']) \times SH_B \times calc_step);$$

– *финальная проверка*: после завершения всех расчетов финальные значения $level_{CH}$ и $level_{SH}$ проверяются на попадание в допустимые диапазоны $[0, CH_max]$ и $[0, SH_max]$. Если значения выходят за пределы этих диапазонов, они принудительно устанавливаются на ближайшую границу.

Завершение расчета

Алгоритм возвращает рассчитанные значения уровней наполнения горна чугуном и шлаком в заданный пользователем момент времени t . Эти данные могут быть использованы для мониторинга состояния печи, прогнозирования времени следующего выпуска, а также для анализа эффективности работы печи.

После возврата результата выполнение алгоритма завершается. На этом этапе происходит освобождение всех использованных ресурсов, таких как память, выделенная для хранения данных из базы. Завершение алгоритма означает, что процесс расчета наполнения горна для заданного момента времени t полностью завершен.

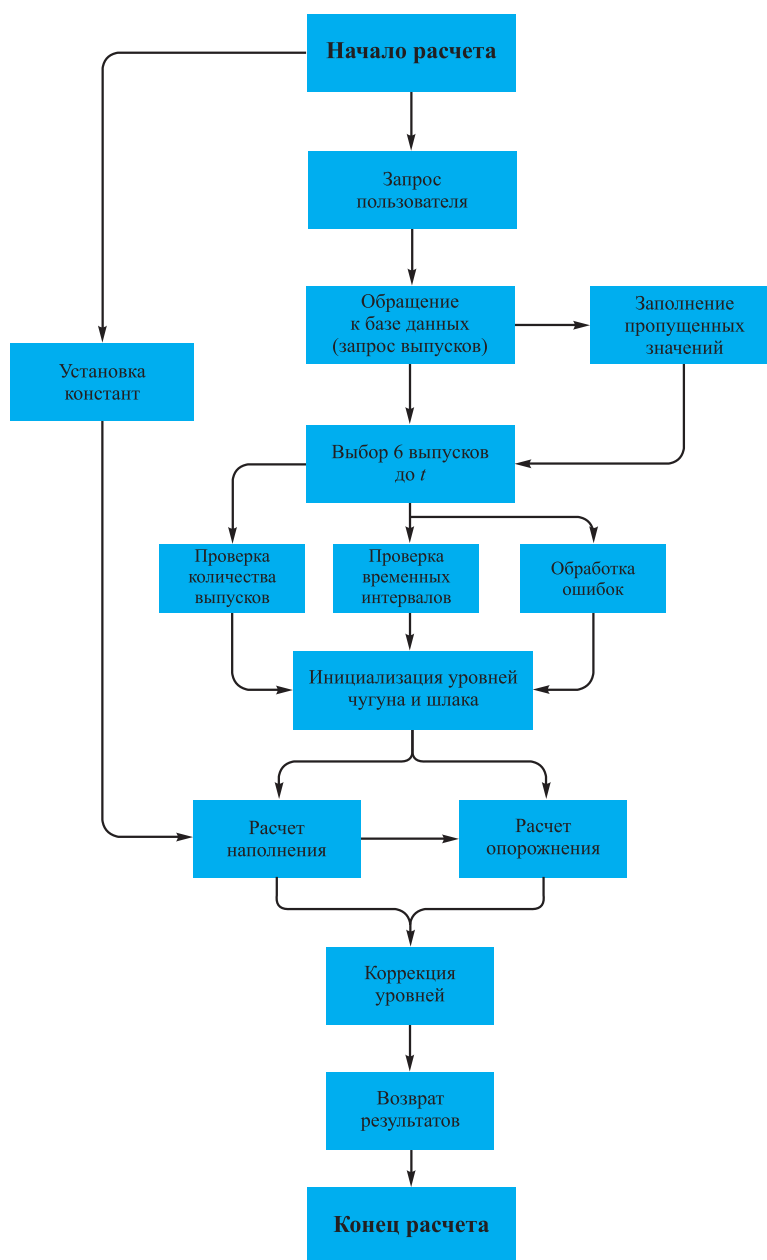


Рис. 2. Детальная блок-схема алгоритма наполнения и опорожнения горна доменной печи

Fig. 2. Detailed block diagram of the blast furnace hearth filling and emptying algorithm

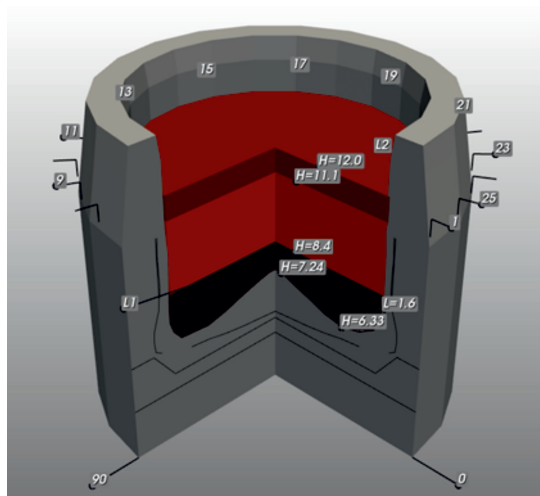


Рис. 3. Трехмерное представление заполнения горна в доменной печи

Fig. 3. Three-dimensional representation of the furnace hearth filling

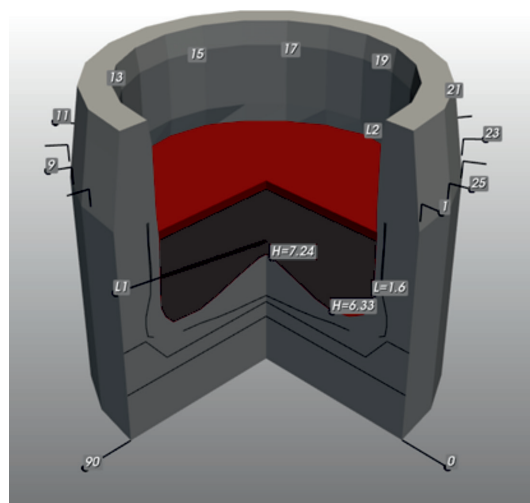


Рис. 4. Трехмерное представление остатков расплава в горне доменной печи

Fig. 4. Three-dimensional representation of melt residues in the blast furnace hearth

Система готова к приему нового пользовательского запроса.

Детальная блок-схема алгоритма представлена на рис. 2. Для расчета онлайн в модели присутствует ограничение в отсутствии данных о выпуске не более 300 мин. Поскольку данные о выпусках приходят в базу с некоторым опозданием, при расчете онлайн они корректируются со сдвигом.

Алгоритм обеспечивает высокую точность моделирования благодаря использованию реальных данных за сутки, многократной валидации (проверке) входных данных, корректировке результатов (учет допустимых диапазонов), учету химического состава шихтовых материалов.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ

Пример визуализации заполнения горна продуктами плавки приведен на рис. 3, а остаточного расплава – на рис. 4. Для создания профиля горна использована математическая модель состояния горна [22].

Выводы

Разработана математическая модель наполнения горна доменной печи. Гибкость алгоритма обеспечивается возможностью обработки запросов для любого заданного момента времени, что позволяет использовать его как для анализа исторических данных, так и для прогнозирования состояния горна в будущем. Разработанная модель послужит эффективным инструментом для технологов доменного производства, обеспечивая настройку режимов плавки и прогнозирование её хода в реальном времени даже при значительных отклонениях от стационарного режима.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Brännbacka J., Saxen H. Novel model for estimation of liquid levels in the blast furnace hearth. *Chemical Engineering Science*. 2004;59(16):3423–3432. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.05.007>
2. Saxen H. Model of draining of the blast furnace hearth with an impermeable zone. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2014;46:421–4321. <https://doi.org/10.1007/s11663-014-0172-2>
3. Olsen J.E., Reynolds Q.G. Mathematical modeling of furnace drainage while tapping slag and metal through a single tap-hole. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2020;51:1750–1759. <https://doi.org/10.1007/s11663-020-01873-1>
4. Jiang Z., Dong J., Pan D., Wang T., Gui W. A novel intelligent monitoring method for the closing time of the taphole of blast furnace based on two-stage classification. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023;120:105849. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.105849>
5. Brännbacka J., Saxen H. Model analysis of the operation of the blast furnace hearth with a sitting and floating dead man. *ISIJ International*. 2003;43(10):1519–1527. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.1519>
6. Nijssen T.M.J., Hoeks I., Manjunath V., Kuipers H.A.M., van der Stel J., Adema A.T., Buist K.A. Experiments and simulations on a cold-flow blast furnace hearth model. *Chemical Engineering Science: X*. 2022;13:100120. <https://doi.org/10.1016/j.cesx.2022.100120>
7. Roche M., Helle M., van der Stel J., Louwerse G., Shao L., Saxén H. On-line estimation of liquid levels in the blast furnace hearth. *Steel Research International*. 2018;90(3):1800420. <https://doi.org/10.1002/srin.201800420>
8. Nishoka K., Maeda T., Shimizu M. Effect of various in-furnace conditions on blast furnace hearth drainage. *ISIJ International*. 2005;45(10):1496–1505. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.45.1496>

9. Новохатский А.М. Совершенствование режима выпуска продуктов плавки из горна доменной печи. *Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2008;(18):19–22.
Novokhatskii A.M. Improving the mode of melting products tapping from the blast furnace. *Bulletin of the Priazovsky State Technical University. Series: Technical Sciences*. 2008;(18):19–22. (In Russ.).
10. Spirin N.A., Gurin I.A., Lavrov V.V., Fedotov G.A. Automated system for modeling the movement of charge materials and accumulation of molten metal in a blast furnace hearth. *Advances in Automation VI. Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer; 2024;1324:3–15.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-82494-4_1
11. Fei J., Jiang X., Yang H., Fan K., Che Y., Sun B., Guo T. Research and development of a big data application platform for intelligent blast furnace intensive management and control. *ACS Omega*. 2024;9(23):24674–24684.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.4c01162>
12. Nistala S.H., Kumar R., Parihar M.S., Runkana V. META-FUR: Digital twin system of a blast furnace. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2024;77:4383–4393.
<https://doi.org/10.1007/s12666-024-03374-0>
12. Lei Y., Karimi H.R. A digital twin model of three-dimensional shading for simulation of the ironmaking process. *Machines*. 2022;10(12):1122.
<https://doi.org/10.3390/machines10121122>
13. Roza A., Cameron I., Bolen J., Sukhran M., Zhang Y. Industrial perspective of digital twin development and applications for iron and steel processes. *AISTech2020 Proceedings of the Iron and Steel Technology Conference*. 2020;3:34–43.
<https://doi.org/10.33313/380/213>
14. Дмитриев А.Н., Золотых М.О., Витькина Г.Ю. Совершенствование доменного производства с использованием цифровых технологий. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2023;79(6):455–464.
<https://doi.org/10.32339/0135-5910-2023-6-455-464>
Dmitriev A.N., Zolotykh M.O., Vit'kina G.Yu. Improvement of blast furnace production using digital technology. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2023;79(6):455–464. (In Russ.).
<https://doi.org/10.32339/0135-5910-2023-6-455-464>
15. Ito M., Yamamoto H., Isei Y. Smarter manufacturing: Digital twin of steel-making process control in Nippon steel corporation. *Nippon Steel Technical Report*. 2024;131:8–17.
16. Спиринов Н.А., Лавров В.В., Рыболовлев В.Ю., Шнайдер Д.А., Краснобаев А.В., Гуринов И.А. Цифровая трансформация пирометаллургических технологий: состояние, научные проблемы и перспективы развития. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021;64(8):588–598.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-588-598>
Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Schneider D.A., Krasnobaev A.V., Gurin I.A. Digital transformation of pyrometallurgical technologies: State, scientific problems and prospects of development. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021;64(8):588–598. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-588-598>
17. Штумпер Дж.-Ф., Манчини Р., Лин Р. Измерение уровня расплава в доменной печи с помощью тензометрических датчиков. *Черные металлы*. 2018;(11):50–53.
Stumper J.-F., Mancini R., Lin R. Measurement of the melt level in a blast furnace using strain gauges. *Chernye metally*. 2018;(11):50–53. (In Russ.).
18. Пат. 2678549 RU. Способ и устройство измерения уровней чугуна и шлака в доменной печи / Оджеда Арройо К., Дюрье Ф., Эссер Э.; заявлено 09.07.2013; опубликовано 10.09.2016.
19. Золотых М.О. Разработка и совершенствование системы контроля состояния огнеупорной футеровки горна доменной печи. Диссертация ... кандидата технических наук. Екатеринбург; 2015:160.
20. Бобров А.Ю., Новохатский А.М. Выбор режима выпусков на основании объемного баланса продуктов плавки в горне доменной печи. *Сборник докладов V Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Металлургия XXI столетия глазами молодых», 22 мая, 2019*. Донецк: Донецкий национальный технический университет; 2019:29–31.
21. Новохатский А.М., Блинов А.М., Бобров А.Ю. Физические свойства материалов в горне доменной печи. *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета*. Алчевск; 2018;(52):75–79.
22. Дмитриев А.Н., Витькин Д.А., Золотых М.О., Витькина Г.Ю. Математическая модель состояния горна доменной печи на основе показаний термопар, находящихся в поясах холодильников. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2025;68(3):316–323.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-3-316-323>
Dmitriev A.N., Vit'kin D.A., Zolotykh M.O., Vit'kina G.Yu. Mathematical model of blast furnace hearth condition based on data from thermocouples in refrigerator belts. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(3):316–323.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-3-316-323>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Андрей Николаевич Дмитриев, д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории пирометаллургии восстановительных процессов, Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН
ORCID: 0000-0001-6446-0215
E-mail: andrey.dmitriev@mail.ru

Дмитрий Александрович Витькин, инженер-конструктор, АО «Калугин»
ORCID: 0009-0004-7023-5734
E-mail: dimantg85@rambler.ru

Andrei N. Dmitriev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Laboratory of Pyrometallurgy of Reduction Processes, Vatolin Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0001-6446-0215
E-mail: andrey.dmitriev@mail.ru

Dmitrii A. Vit'kin, Design Engineer, JSC Kalugin
ORCID: 0009-0004-7023-5734
E-mail: dimantg85@rambler.ru

Максим Олегович Золотых, к.т.н., ведущий инженер лаборатории пирометаллургии восстановительных процессов, Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН

ORCID: 0000-0002-8923-9872

E-mail: max@zolotykh.su

Галина Юрьевна Витькина, к.т.н., ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией пирометаллургии восстановительных процессов, Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН

ORCID: 0000-0002-1076-2709

E-mail: 20procents@mail.ru

Maksim O. Zolotykh, Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer of the Laboratory of Pyrometallurgy of Reduction Processes, Vatin Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0002-8923-9872

E-mail: max@zolotykh.su

Galina Yu. Vit'kina, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Head of the Laboratory of Pyrometallurgy of Reduction Processes, Vatin Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0002-1076-2709

E-mail: 20procents@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

А. Н. Дмитриев – концептуализация, научное руководство, разработка методологии исследования, редактирование рукописи.

Д. А. Витькин – проведение расчетов, анализ, обработка данных и их обсуждение, визуализация результатов.

М. О. Золотых – написание алгоритма расчета, программирование, визуализация 2D и 3D результатов.

Г. Ю. Витькина – концептуализация, подготовка обзора и редактирование текста, анализ и обработка данных, написание окончательного варианта рукописи.

A. N. Dmitriev – conceptualization, scientific guidance, development of the research methodology, editing the text.

D. A. Vit'kin – performing calculations, analysis, data processing and discussion, visualizing the results.

M. O. Zolotykh – writing the calculation algorithm, programming, visualizing 2D and 3D results.

G. Yu. Vit'kina – conceptualization, editing the text, data analysis and processing, writing the final manuscript.

Поступила в редакцию 02.10.2025

После доработки 14.10.2025

Принята к публикации 03.04.2026

Received 02.10.2025

Revised 14.10.2025

Accepted 03.04.2026



Редакционная статья
Editorial article

ИЛЬЕ ВАЛЕРЬЕВИЧУ ЧУМАНОВУ – 55 ЛЕТ!



16 июля 2026 года исполняется 55 лет известному специалисту в области электрометаллургии, яркому представителю уральской металлургической школы, доктору технических наук, профессору Южно-Уральского государственного университета Илье Валерьевичу Чуманову.

Свою трудовую деятельность Илья Валерьевич начал на Златоустовском металлургическом заводе подручным сталевара дуговых электропечей. В 1993 г. с отличием окончил Челябинский государственный технический университет по специальности «металлургия черных металлов». И с этого времени вся его деятельность связана с родным вузом и кафедрой «Общая металлургия», где он прошел путь от инженера до проректора по учебной работе. Уже более 20 лет он заведующий кафедрой «Техника и технологии производства материалов» (бывшая кафедра «Общая метал-

лургия»). Являясь учеником и продолжателем научных идей профессоров Н.Р. Фраге, Ю.Г. Гуревича, В.Е. Рощина, Г.П. Вяткина, Илья Валерьевич в 1997 г. защитил кандидатскую, а в 2002 г. докторскую диссертацию; в 2006 им получено звание профессора.

Чуманов Илья Валерьевич – признанный высококвалифицированный специалист в области металлургических технологий, в том числе связанных с развитием теории и практики процессов электрошлакового переплава (ЭШП). Научная проблематика: поиск решений повышения производительности, снижения энергетических затрат при сохранении высокого качества сталей и сплавов. На основе комплексного изучения физико-химических и теплофизических процессов, сопровождающих ЭШП, а также понимания механизма рафинирования переплавляемого металла, были разработаны эффективные технологии производства слитков и заготовок (полого и переменного сечения) на переменном и постоянном токе. Глубокие и обстоятельные исследования ученого и сформированной им научной школы в области специальной электрометаллургии снискали ему заслуженное признание и высокий научный авторитет.

Еще одно направление, находящееся в поле зрения И.В. Чуманова, связано с обеспечением заданных свойств металлопродукции путем введения в кристаллизующийся матричный металлический расплав твердых тугоплавких полидисперсных частиц. Неотъемлемой частью проводимых работ по данному направлению является исследование поверхностных высокотемпературных взаимодействий, протекающих между частицами и расплавом. Установленные зависимости позволяют разрабатывать технологии создания материалов с прогнозируемыми функциональными, в том числе градиентными свойствами. В последние годы вектор интересов профессора Чуманова связан с разработкой новых марочных композиций (сталей) для решения вопросов импортозамещения.

Илья Валерьевич является автором более 450 научных публикаций, 70 патентов и свидетельств на объекты интеллектуальной собственности, 40 учебно-методических работ, из которых 9 с грифом УМО (ФУМО) по образованию в области металлургии. Он ведет

активную научно-преподавательскую деятельность как в ВУЗе, так и за его пределами: более 30 лет работает и в Златоустовском филиале университета. Все эти годы он связан с Златоустовским металлургическим заводом, решает научно-технологические проблемы, осуществляет подготовку высококвалифицированных кадров по программам, согласованным с заводом.

Возглавляемая им кафедра за последние 30 лет подготовила более 600 специалистов, бакалавров и магистров по направлению металлургия. Непосредственно под руководством Чуманова успешно защищено более 80 выпускных квалификационных работ различного уровня.

И.В. Чуманов ведет большую общественную работу. Он является Председателем диссертационного совета при ФГАОУ ВО ЮУрГУ (г. Челябинск) и членом диссертационных советов при МГТУ им. Г.И. Носова (г. Магнитогорск) и Уральском федеральном университете (г. Екатеринбург). Илья Валерьевич активно сотрудничает с различными научными издательствами, являясь членом редколлегии высокорейтинговых металлургических журналов *Черные металлы*, *Электрометаллургия*, *Известия вузов. Черная металлургия*, *Russian Metallurgy (Metally)*, а также заместителем главного редактора журналов *Черная металлургия. Бюллетень научной, технической и экономической информации*, *Вестник ЮУрГУ. Серия Металлургия*. С 2008 года он является членом учебно-методического объединения по образованию в области металлургии (сейчас Федеральное учебно-методическое объединение по УГСН 22.00.00 Технологии материалов). На протяжении десяти лет работал в составе Экспертного совета ВАК.

Чуманов – член научного Совета РАН «Металлургия и металловедение» по секции Проблемы черной металлургии»; эксперт РАН, РФ ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ; член программных и оргкомитетов международных научных конференций: «Современные проблемы электрометаллургии стали» (Россия), Менделеевский съезд (Россия), Международный Конгресс сталеплавыльщиков и производителей металла (Россия), Международной научной конференции «Физико-химические основы металлургических процессов» им. академика А.М. Самарина (Россия), «Современные инновации в области науки, технологий и интеграции знаний» (Казахстан), «International Scientific Conference. New Technologies and Achievements in Metallurgy, Material Engineering and Production Engineering» (Польша) и др.

Его научная, управленческая и общественная деятельность высоко оценена Почетной грамотой Министерства образования и науки РФ; Благодарностью Председателя Совета Федерации Федерального Собрания РФ В.И. Матвиенко, Почетной грамотой Министерства промышленности и торговли РФ, званиями «Почетный работник сферы образования РФ» и «Почетный металлург РФ».

Свое 55-летие профессор И.В. Чуманов встречает полным творческих сил и смелых научных замыслов.

Сотрудники Южно-уральского государственного университета, редакция и редколлегия журнала «Известия ВУЗов. Черная Металлургия», коллеги и друзья сердечно поздравляют Илью Валерьевича с 55-летием, желают ему крепкого здоровья и новых успехов в его научной и преподавательской деятельности!

Над номером работали:

Л.И. Леонтьев, главный редактор

Е.В. Протопопов, заместитель главного редактора

Е.А. Ивани, ответственный секретарь

Л.П. Бащенко, заместитель ответственного секретаря

Е.Ю. Потапова, заместитель главного редактора по развитию

О.А. Долицкая, научный редактор

В.В. Расенец, верстка, иллюстрации

Подписано в печать 22.06.2026. Формат 60×90 ¼. Бум. офсетная № 1.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 13. Заказ 25101. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского Дома МИСИС.
119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1.
Тел./факс: +7 (499) 236-76-17

Current state of chromium production and application in ferrous metallurgy. Part 1. Raw materials

Contribution of the Kuznetsk Metallurgical Plant to the USSR defense complex in 1941 – 1945:

Analysis of development and modernization

Effect of the defects occurring during WAAM process on fatigue strength of 08CrMoV and 30CrMnSi steels

Microstructure and mechanical properties of heat-treated Inconel 625 alloy obtained by wire electron-beam additive manufacturing

Metallographic studies of the alloy of Co – Cr – Fe – Mn – Ni system

Strength and failure mechanism of gray cast iron under various loading conditions. Part 1. Static crack resistance, tensile and torsional strength of the samples

Improvement of the method for calculating hot rolling force taking into account the effect of temperature on elastic properties of alloyed construction steel strips

Evaluation of energy-power parameters of billet helical piercing in accordance with metal forming peculiarities of in deformation zone

Preconditions of adapting simulation modeling based on the Takagi-Sugeno binary algorithm to improve the effectiveness of corporate quality management system

Evaluation of the stress-strain state in the combined process of straightening and strengthening of non-rigid cylindrical parts

Temperature distribution in roof-adjacent space of reheating furnace with a flat-flame burner

Mathematical model of blast furnace hearth filling

To the 55th Anniversary of Il'ya Valer'evich Chumanov

**Зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-35456.**

Подписной индекс 70383.