

# ПРОБЛЕМЫ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

ISSN 1997-9258

**Журнал входит в перечень ведущих периодических изданий,  
рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертаций  
на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук**

## **Главный редактор:**

Семенов В.В., канд. экон. наук

## **Заместители главного редактора:**

Леонтьев Л.И., академик РАН  
Глезер А.М., д-р физ.-мат. наук  
Могутнов Б.М., д-р хим. наук  
Волков А.И., канд. хим. наук

## **Члены редколлегии:**

Алымов М.И., член-корр. РАН  
Бабул Т., профессор (Польша)  
Бродов А.А., канд. экон. наук  
Григорович К.В., академик РАН  
Денисов С.Н., д-р экон. наук  
Дуб А.В., д-р техн. наук  
Еремин Г.Н., канд. техн. наук  
Зайцев А.И., д-р физ.-мат. наук  
Иевлев В.М., академик РАН  
Комлев В.С., член-корр. РАН  
Куклев А.В., д-р техн. наук  
Левашов Е.А., д-р техн. наук  
Морозов Ю.Д., канд. техн. наук  
Москвина Т.П., канд. техн. наук  
Никулин А.Н., д-р техн. наук  
Орыщенко А.С., член-корр. РАН  
Петрова Л.Г., д-р техн. наук  
Рубаник В.В., член-корр. НАНБ (Беларусь)  
Рудской А.И., академик РАН  
Родионова И.Г., д-р техн. наук  
Скачков О.А.  
Смирнов Л.А., академик РАН  
Сомерс М.А.Дж., профессор (Дания)  
Тихонов А.К., д-р техн. наук  
Филиппов Г.А., д-р техн. наук  
Филонов М.Р., д-р техн. наук  
Флюге В., профессор (Германия)

С требованиями к публикациям в журнале «ПРОБЛЕМЫ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ» и правилами оформления статей можно ознакомиться на сайте ЦНИИчермет им. И.П. Бардина – [www.chemet.net](http://www.chemet.net)

## **Подписной индекс 58999**

в объединенном каталоге «Пресса России» на сайте [www.pressa-rf.ru](http://www.pressa-rf.ru) и «Пресса по подписке» <https://www.akc.ru>

**Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.**

**Свидетельство ПИ № ФС77-60022**

Выпуск подготовлен  
Информационно-издательским центром  
ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»:

<b>Руководитель ИИЦ</b>	Е.Х. Иванова
<b>Редактор</b>	И.Я. Паршина
<b>Верстка</b>	М.Л. Красильникова

## **Адрес редакции:**

105005 Москва, ул. Радио, дом 23/9, стр. 2  
ЦНИИчермет им. И.П. Бардина,  
тел. 777 93 02, 777 95 13, факс 777 93 00,  
E-mail: [a.glezer@mail.ru](mailto:a.glezer@mail.ru), [ntphm@yandex.ru](mailto:ntphm@yandex.ru),  
[rhenium@list.ru](mailto:rhenium@list.ru)

# ПРОБЛЕМЫ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

## СОДЕРЖАНИЕ

2 • 2022

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ МЕТАЛЛУРГИИ

- Леонов А.В., Чередниченко И.В., Вознесенская Н.М., Тоньшева О.А.  
Взаимосвязь механических, магнитных свойств, удельного электросопротивления  
и микроструктуры пружинного сплава марки 97НЛ-ВИ . . . . . 3
- Еремин Г.Н., Ливанова Н.О., Никулин А.Н., Филиппов Г.А.  
Связь масштабного фактора очага деформации с деформационным воздействием валков  
на заготовку при производстве металлопроката. . . . . 11
- Дорофеев В.В., Головатенко А.В., Добрянский А.В., Первушин Д.Э.  
Технология прокатки рельсов с двойными уклонами внутренних граней фланцев подошвы  
в универсальных клетях на современных рельсопрокатных станах . . . . . 24
- Третьяков В.А., Бокачев Ю.А., Филатов А.Н., Голи-Оглу Е.А.  
Разработка цифрового двойника процесса контролируемой прокатки толстого листа  
из низколегированных высокопрочных сталей. Сообщение 1. Моделирование нагрева сляба  
в методической печи с прогнозом роста зерна аустенита перед прокаткой . . . . . 30

### ПЕРЕРАБОТКА ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

- Кологрива У.А., Волков А.И., Пупышев В.С., Стулов П.Е., Краснянская И.А.  
Исследование обжиг-магнитного обогащения отходов гидрометаллургической переработки  
ванадиевого конвертерного шлака . . . . . 41

### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Багмет О.А., Степанов П.П., Жарков С.В., Эфрон Л.И., Частухин А.В.  
Особенности формирования структуры сварного соединения, выполненного  
автоматической сваркой под флюсом . . . . . 52
- Дагман А.И., Зайцев А.И., Калмыков К.Б., Арутюнян Н.А., Дунаев С.Ф., Родионова И.Г.  
Исследование закономерностей образования и эволюции неметаллических включений  
при производстве IF, IF-NS-сталей для снижения отсортировки проката по сталеплавильным дефектам . . . 66

### НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

- Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Ефимов М.О., Осинцев К.А., Шлярова Ю.А., Гостевская А.Н.  
Структура и свойства покрытий из высокоэнтропийных сплавов FeCoCrNiMn и FeCoNiCrAl . . . . . 88
- Столяров А.Ю., Зайцева М.В., Токарева Н.В., Ясюкевич Н.С., Зайцев А.И.,  
Степанов А.Б., Колдаев А.В., Арутюнян Н.А.  
Исследование закономерностей формирования структуры и свойств стали 42CrMo4  
при сфероидизирующем отжиге . . . . . 98

### ИНФОРМАЦИЯ

- Александрю Ивановичу ЗАЙЦЕВУ – 65 лет . . . . . 115
- Леониду Николаевичу ШЕВЕЛЁВУ – 85 лет . . . . . 116

# PROBLEMS OF FERROUS METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

## CONTENTS

2 • 2022

### PRODUCTION PROCESSES IN METALLURGY

- Leonov A.V., Cherednichenko I.V., Voznesenskaya N.M., Tonysheva O.A.*  
The relationship of mechanical, magnetic properties, electrical resistivity and microstructure of 97NL-VI alloy strip ..... 3
- Eremin G.E., Livanova N.O., Nikulin A.N., Filippov G.A.*  
The relationship of the scale factor of the deformation focus with the deformation effect of rolls on the billet in the production of rolled metal. .... 11
- Dorofeev V.V., Golovatenko A.V., Dobryanskij A.V., Pervushin D.E.*  
The technology of rolling rails with double slopes of the inner faces of the flanges of the sole in universal stands on modern rail rolling mills. .... 24
- Tret'yakov B.A., Bochkarev Yu.A., Filatov A.N., Goli-Oglu E.A.*  
Development of a digital twin of the process of controlled rolling of thick plate from high-strength low-alloy steels. Message 1. Simulation of slab reheating in continuous furnace with a prediction of austenite grain size before rolling ..... 30

### RECYCLING OF TECHNOGENIC RAW MATERIALS

- Kologrieva U.A., Volkov A.I., Pupyshv V.S., Stulov P.E., Krasnyanskaya I.A.*  
Investigation of roasting-magnetic beneficiation of waste from hydrometallurgical processing of vanadium converter slag ..... 41

### MATERIALS SCIENCE AND NEW MATERIALS

- Bagmet O.A., Stepanov P.P., Zharkov S.V., Efron L.I., Chastukhin A.V.*  
Features of the formation of the structure of a welded joint made by automatic submerged arc welding ..... 52
- Dagman A.I., Zaitsev A.I., Kalmykov K.B., Arutyunyan N.A., Dunaev S.F., Rodionova I.G.*  
Patterns of formation and evolution of non-metallic inclusions during the production of IF, IF-HS-steels to reduce the rejection of rolled products by steelmaking defects ..... 66

### NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES

- Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Efimov M.O., Osintsev K.A., Shlyarova Yu.A., Gostevskaya A.N.*  
Structure and properties of coatings from high-entropy alloys FeCoCrNiMn and FeCoNiCrAl ..... 88
- Stolyarov A.Yu., Zaitseva M.V., Tokareva N.V., Yasyukevich N.S., Zaitsev A.I., Stepanov A.B., Koldaev A.V., Arutyunyan N.A.*  
Investigation of patterns in the formation of the structure and properties of 42CrMo4 steel during spheroidizing annealing. .... 98

### INFORMATION

- A.I. Zaitsev celebrates his 65th birthday. .... 115
- L.N. Shevelev celebrates his 85th birthday. .... 116

DOI: 10.54826/19979258\_2022\_2\_3  
УДК 669.017.165

## **Взаимосвязь механических, магнитных свойств, удельного электросопротивления и микроструктуры пружинного сплава марки 97НЛ-ВИ**

© **Леонов Александр Владимирович; Чередниченко Игорь Валерьевич**, канд. техн. наук; **Вознесенская Наталья Михайловна**, канд. техн. наук; **Тонышева Ольга Александровна**, канд. техн. наук

*ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия. E-mail: alexndr\_leonov@mail.ru; chered82@yandex.ru; yeliseyeva@viam.ru; olton81@mail.ru*

Исследованы режимы промежуточной и окончательной термообработки холоднокатаной ленты из пружинного сплава на никелевой основе с 2 % Ве марки 97НЛ-ВИ.

Определены прочностные (временное сопротивление, предел текучести и относительное удлинение) и магнитные (намагниченность насыщения, коэрцитивная сила, остаточная индукция и магнитная проницаемость) свойства и значения удельного электросопротивления холоднокатаной ленты после нагартовки, закалки и старения.

Установлена взаимосвязь механических свойств и микроструктуры с магнитными свойствами ленты и удельным электросопротивлением.

Ключевые слова: никель-бериллиевый сплав, термообработка, закалка, дисперсионное твердение, магнитные свойства, удельное электросопротивление.

The regimes of intermediate and final heat treatment of a cold-rolled strip made of a nickel-based 97NL-VI alloy with 2 % Be have been studied.

The strength (tensile strength, yield strength and elongation) and magnetic (saturation magnetization, coercitive force, residual induction and magnetic permeability) properties and electrical resistivity values of cold-rolled strip after work hardening, quenching and precipitation hardening are determined.

The interrelation of mechanical properties and microstructure with the magnetic properties of the strip and electrical resistivity is established.

Keywords: nickel-beryllium alloy, heat treatment, quenching, precipitation hardening, magnetic properties, electrical resistivity.

## Связь масштабного фактора очага деформации с деформационным воздействием валков на заготовку при производстве металлопроката

© **Еремин Геннадий Николаевич**, канд. техн. наук; **Ливанова Надежда Олеговна**; **Никулин Анатолий Николаевич**, д-р техн. наук; **Филиппов Георгий Анатольевич**, д-р техн. наук

ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», Москва, Россия. E-mail: iqs12@yandex.ru

Выполнены аналитические исследования по влиянию масштабного фактора очага деформации при прокатке заготовок размерами 360×360 мм в валках диам. 1200–1000–800 мм на величину удельной работы пластической деформации, которую оценивали функцией диссипации энергии. Из этих валков оптимальным масштабным фактором очага деформации  $m_3 = 0,258$  обладали валки диам. 800 мм, величина которого соответствовала отношению  $m = S_3/S_b$ , где  $S_3$  и  $S_b$  – площади поперечных сечений заготовки и валка соответственно. По уровню деформационного воздействия на металл при прокатке заготовок в условиях оптимального масштабного фактора очага деформации достигается максимальная величина удельной работы пластической деформации. Установлено, что при оптимальном масштабном факторе очага деформации достигается максимальное развитие сдвиговых смещений металла при прокатке заготовок, что в реальном процессе будет обеспечивать высокий уровень механических свойств металлопродукции.

Ключевые слова: масштабный фактор, очаг деформации, сдвиговые процессы, скорость деформации, диссипация энергии, кривизна бочки валка, механические свойства проката.

Analytical studies were carried out on the influence of the scale factor of the deformation focus when rolling billets with a size of 360×360 mm in rolls with a diameter of 1200–1000–800 mm on the value of the specific work of plastic deformation, which was estimated by the function of energy dissipation.

Of these rolls, the optimal scale factor of the deformation focus was rolls with a diameter of 800 mm. In terms of the level of deformation effect on the metal during billet rolling under conditions of the optimal scale factor of the deformation zone, the maximum value of the specific work of plastic deformation is achieved. It has been established that with the optimal scale factor of the deformation zone, the maximum development of metal shear displacements during billet rolling is achieved, which in a real process will ensure a high level of mechanical properties of metal products.

Keywords: scale factor, deformation focus, shear processes, deformation rate, energy dissipation, curvature of the roll barrel, mechanical properties of rolled products.

## **Технология прокатки рельсов с двойными уклонами внутренних граней фланцев подошвы в универсальных клетях на современных рельсопрокатных станах**

© **Дорофеев Владимир Викторович**, д-р техн. наук; **Головатенко Алексей Валерьевич**, канд. техн. наук; **Добрянский Андрей Владимирович**; **Первушин Дмитрий Эдуардович**

*АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат», г. Новокузнецк, Кемеровская область, Россия. E-mail: Vladimir.Dorofeev@evraz.com; Aleksey.Golovatenko@evraz.com; Andrey.Dobryanskij@evraz.com; Dmitry.Pervushin@evraz.com*

Представлен разработанный способ прокатки железнодорожных рельсов с двойными уклонами внутренних граней фланцев подошвы на универсальных рельсобалочных станах, оснащенных непрерывно-реверсивной группой клетей и чистовой трехвалковой универсальной клетью. Приведена зависимость для расчета расстояния по вертикали от поверхности шейки до точки пересечения внутренних граней фланца подошвы в калибрах непрерывно-реверсивной группы клетей в зависимости от уширения шейки в чистовом калибре, величины углов наклона внутренних граней фланцев подошвы рельса и принимаемого зазора между внутренней гранью фланца раската, примыкающего к торцу рельса, и горизонтальным валком чистовой клетки в момент захвата металла валками. Показано влияние разработанного способа прокатки на улучшение качества геометрии профиля, уменьшение поверхностных дефектов рельсов и выработку горизонтальных валков чистовой универсальной клетки.

**Ключевые слова:** схема прокатки, железнодорожные рельсы с двойными уклонами внутренних граней фланцев подошвы, рельсопрокатный стан, универсальная клеть, трехвалковая непрерывно-реверсивная группа клетей, рельсовые универсальные калибры, дуо-реверсивная клеть.

The developed method of rolling railway rails with double slopes of the inner faces of the sole flanges on universal rail-rolling mills equipped with a continuously reversible group of crates and a finishing three-roll universal crate is discussed. The dependence is given for calculating the vertical distance from the neck surface to the intersection point of the inner faces of the sole flange in the calibers of a continuously reversible group of stands, depending on the widening of the neck in the finishing caliber, the magnitude of the angles of inclination of the inner faces of the flanges of the sole of the rail and the accepted gap between the inner face of the roll flange adjacent to the end of the rail and the horizontal roll of the finishing stand at the moment of metal capture by rolls. The influence of the developed rolling method on improving the quality of the profile geometry, the reduction of surface defects of rails and the production of horizontal rolls of the finishing universal stand is shown.

**Keywords:** rolling scheme, railway rails with double slopes of the inner faces of the flanges of the sole, rail rolling mill, universal crate, three-roll continuously reversible group of crates, rail universal calibers, duo-reversible crate

## Разработка цифрового двойника процесса контролируемой прокатки толстого листа из низколегированных высокопрочных сталей. Сообщение 1. Моделирование нагрева сляба в методической печи с прогнозом роста зерна аустенита перед прокаткой

© Третьяков Владимир Аркадьевич<sup>1</sup>, д-р техн. наук;  
Бокачев Юрий Алексеевич<sup>2</sup>; Филатов Андрей Николаевич<sup>2</sup>;  
Голи-Оглу Евгений Александрович<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> *Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия.*

*E-mail: tva@stu.lipetsk.ru*

<sup>2</sup> *Металлургический завод NLMK DanSteel, г. Фредериксверк, Дания. E-mail: afi@nlmk.com*

В работе рассмотрены этапы построения «цифрового двойника» процесса контролируемой горячей прокатки толстых листов из низколегированных высокопрочных сталей – предварительного нагрева сляба в методической печи с прогнозом среднего диаметра зерна аустенита в заданных сечениях сляба. Разработанная цифровая модель нагрева сляба, основанная на решении трехмерного уравнения теплопроводности методом конечных элементов, адаптирована по результатам непрерывных измерений температур в сечениях сляба по толщине и ширине с применением «черного ящика» – блока термодатчиков, перемещаемого вместе со слябом в процессе нагрева в промышленной печи. На основе лабораторного исследования кинетики роста зерна аустенита при нагреве и изотермической выдержке образцов из низколегированных высокопрочных сталей получено уравнение для расчета среднего диаметра аустенитного зерна. Полученное уравнение использовано для прогноза роста зерна аустенита при непрерывном нагреве с применением кусочно-линейной аппроксимации кривой нарастания температуры малыми отрезками изотермической выдержки. Выполнено численное моделирование процесса промышленного нагрева сляба с расчетным определением трехмерного поля распределения температур, а также непрерывного роста среднего диаметра зерна аустенита в сечениях сляба по толщине для последующего моделирования термомеханической прокатки.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, нагрев сляба, термомеханическая прокатка, толстый лист, низкоуглеродистые высокопрочные стали, зерно аустенита, уравнение теплопроводности, метод конечных элементов.

The paper considers the stages of constructing a «digital twin» of the process of hot controlled rolling of heavy plates of high strength low-alloy steels – preheating slabs in a reheating furnace with a forecast of the average diameter of austenite grains in given sections of slab. The developed digital model of slab heating, based on the solution of the 3-dimensional thermal conductivity equation by the finite element method, is adapted based on the results of continuous measurements of temperatures in slab sections in thickness and width using a «black box» – a block of thermocouples moved together with the slab during heating in an industrial furnace. Based on a laboratory study of the kinetics of austenite grain growth during heating and isothermal exposure of samples from low-alloy high-strength steels, an equation for calculating the average diameter of an austenitic grain is obtained. This equation is used to predict the growth of austenite grains under continuous heating using piecewise linear approximation of the temperature rise curve by small segments of isothermal exposure. Numerical modeling of the process of industrial heating of the slab with the calculated determination of the 3-dimensional temperature distribution field, as well as the continuous growth of the average austenite grain diameter in the slab sections along the thickness for subsequent modeling of thermomechanical rolling is carried out.

**Keywords:** digital twin, slab reheating, controlled rolling, heavy plate, high strength low carbon steels, austenite grain, heat equation, finite element method.

DOI: 10.54826/19979258\_2022\_2\_41  
УДК 669.054.83

## **Исследование обжиг-магнитного обогащения отходов гидрометаллургической переработки ванадиевого конвертерного шлака**

© **Кологриева Ульяна Александровна; Волков Антон Иванович**, канд. хим. наук; **Пупышев Валерий Сергеевич; Стулов Павел Евгеньевич; Краснянская Ирина Алексеевна**, канд. техн. наук

*ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», Россия, Москва. E-mail: ufowka@mail.ru; rhenium@list.ru; Valera-pupyshev@rambler.ru; pavel1411@rambler.ru; iakrsn@gmail.com*

Проведены исследования по обжиг-магнитному обогащению ванадийсодержащих шламов с последующей мокрой магнитной сепарацией с целью получения железного концентрата, пригодного для дальнейшей металлургической переработки. Испытания проводили в двух направлениях с целью перевода гематита, являющегося основной железосодержащей фазой, в магнетит (восстановительный обжиг при температуре 700–950 °С) и железо металлическое (восстановительный обжиг при температурах выше 1000 °С).

Ключевые слова: шлам, ванадий, железо, гематит, восстановление, обжиг-магнитное обогащение, металлизация, магнитный сепаратор.

Studies have been carried out on the roasting-magnetic beneficiation of vanadium-containing sludges with subsequent wet magnetic separation in order to obtain an iron concentrate suitable for further metallurgical processing. The tests were carried out in two directions in order to convert hematite, which is the main iron-containing phase, into magnetite (reduction roasting at a temperature of 700–950 °C) and metallic iron (reduction roasting at temperatures above 1000 °C).

Keywords: sludge; vanadium; iron; hematite; reduction; roasting-magnetic beneficiation; metallization; magnetic separator.



DOI: 10.54826/19979258\_2022\_2\_52  
УДК 669.15-194.2:669.17:621.791.051

## **Особенности формирования структуры сварного соединения, выполненного автоматической сваркой под флюсом**

© **Багмет Олег Александрович**, канд. техн. наук; **Степанов Павел Петрович**, канд. техн. наук; **Жарков Сергей Владимирович**; **Эфрон Леонид Иосифович**, д-р техн. наук; **Частухин Андрей Владимирович**, канд. техн. наук

*АО «Выксунский металлургический завод», г. Выкса, Нижегородская обл., Россия.*

*E-mail: bagmet\_oa@vsw.ru; ZHARKOV\_SV@vsw.ru; Lefron@omk.ru; chastuhin\_av@vsw.ru*

Цель работы – установление связи между вязкостными свойствами и формирующейся в сварном соединении труб большого диаметра из стали типа 05ХГ2НДБ микроструктурой при автоматической сварке под флюсом.

Установлено, что в исходном состоянии (после сварки) плотность границ зерен аустенита в металле шва несколько ниже (в среднем примерно на 20 %), чем в металле ОШЗ. Плотность высокоугловых границ (ВУГ)  $\alpha$ -фазы в ОШЗ примерно в 4 раза ниже, чем в шве. Степень измельчения зерна при  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращении в металле сварного шва при формировании игольчатого феррита составляет 11–15 раз, в то время как в ОШЗ степень измельчения зерна при превращении не превышает 1,5–2,5 раза. Это обусловлено внутризеренным характером зарождения игольчатого феррита (ИФ) в сравнении с зарождением на границах аустенитных зерен в случае бейнита.

При более высокой средней плотности ВУГ  $\alpha$ -фазы металла шва в сравнении с ОШЗ структура сварного шва состоит из матрицы ИФ, разделенной крупными вытянутыми вдоль границ бывших зерен аустенита кристаллитами зернограничного феррита (ЗГФ), часто одной кристаллографической ориентировки и неблагоприятно ориентированными по направлению к поверхности разрушения ударного образца, что снижает вязкость.

Термическая обработка сварного соединения не привела к заметному измельчению зерна аустенита металла шва, в то время как в металле ОШЗ плотность границ  $\gamma$ -фазы возросла более, чем в три раза. При этом после термической обработки плотность высокоугловых границ  $\alpha$ -фазы в металле шва несколько снизилась, а в ОШЗ выросла.

**Ключевые слова:** трубы большого диаметра, сварка, сварной шов, зона термического влияния, микроструктура, ударная вязкость, хладостойкость.

The aim of the work was to establish a connection between the toughness and the microstructure formed in the welded joint of large-diameter pipes made of steel type 0,05%C-1,6%Mn-Cr-Ni-Cu-Nb automatic submerged welding. It was found that in the initial state (after welding), the density of austenite grain boundaries in the weld metal is slightly lower (on average by about 20 %) than in the HAZ. The density of the high-angle boundaries (HAB) of the  $\alpha$ -phase in the HAZ is about 4 times lower than in the seam. The degree of grain grinding during  $\gamma \rightarrow \alpha$ -transformation in the weld metal during the formation of needle ferrite is 11–15 times, while in the HAZ the degree of grain grinding during transformation does not exceed 1.5–2.5 times. This is due to the intragrain nature of the nucleation of acicular ferrite (AF) in comparison with the nucleation at the boundaries of austenitic grains in the case of bainite.

With a higher average density of the HAB of the  $\alpha$ -phase of the weld metal in comparison with the HAZ, the structure of the weld consists of an AF matrix separated by large grain-boundary ferrite (GBF) crystallites elongated along the boundaries of the former austenite grains, often of the same crystallographic orientation and unfavorably oriented towards the fracture surface of the impact sample. Fractographic studies have shown that the brittle fracture site in the fracture of impact samples with an incision made in the center of the seam corresponds to the boundaries of former austenite grains with GBF crystallites.

The heat treatment of the welded joint did not lead to a noticeable grinding of the austenite grain of the weld metal, while the density of the  $\gamma$ -phase boundaries in the HAZ metal increased more than three times. At the same time, after heat treatment, the density of HAB  $\alpha$ -phases in the weld metal decreased slightly, and in the HAZ – increased.

**Keywords:** large diameter pipes, welding, weld, heat affected zone, microstructure, impact toughness, cold resistance.

## Исследование закономерностей образования и эволюции неметаллических включений при производстве IF, IF-HS-сталей для снижения отсортировки проката по сталеплавильным дефектам

© **Дагман Алексей Игоревич**<sup>1</sup>, канд. техн. наук; **Зайцев Александр Иванович**<sup>2</sup>, д-р физ.-мат. наук; **Калмыков Константин Борисович**<sup>3</sup>, канд. хим. наук; **Арутюнян Наталья Анриевна**<sup>2,3</sup>, канд. физ.-мат. наук; **Дунаев Сергей Федорович**<sup>3</sup>, д-р хим. наук; **Родионова Ирина Гавриловна**<sup>2</sup>, д-р техн. наук

<sup>1</sup> ПАО «НЛМК», г. Липецк, Россия. E-mail: dagman\_ai@nlmk.com

<sup>2</sup> ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», Москва, Россия. E-mail: aizaitsev1@yandex.ru; igrodi@mail.ru

<sup>3</sup> Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия. E-mail: dunaev@general.chem.msu.ru; kbkalmykov@mail.ru; naarutyunyan@gmail.com

На массиве данных о более чем 200 плавках текущего производства стали 01ЮТ выполнен статистический анализ влияния на вероятность возникновения дефекта холоднокатаного проката «плена» технологических параметров выплавки и обработки стали. Проведено исследование проб металла, отобранных на ключевых стадиях обработки четырех плавок жидкой стали 01ЮТ, а также от непрерывнолитой заготовки, горячекатаного и холоднокатаного проката. На основе полученных данных установлены закономерности формирования и эволюции характеристик неметаллических включений, а также предложены эффективные приемы предупреждения возникновения отсортировки холоднокатаного проката по дефектам сталеплавильного производства.

Ключевые слова: сверхнизкоуглеродистые IF, IF-HS-стали, сталеплавильные дефекты, холоднокатаный прокат, технология сталеплавильного производства.

A statistical analysis of the effect of the technological parameters of steel smelting and processing on the probability of a «sliver» defect occurrence in cold-rolled steel was performed based on the data of more than 200 melts of the current production of 01YuT steel. A study was carried out for metal samples taken at the key stages of processing liquid 01YuT steel of 4 melts, as well as from a continuously cast billet, hot-rolled and cold-rolled steel. On the basis of the data obtained, the patterns of formation and evolution of the characteristics of non-metallic inclusions were established, and effective methods were proposed to prevent the rejection of cold-rolled steel because of steelmaking defects.

Keywords: ultra-low carbon IF, IF-HS-steels, defects, steelmaking defects, cold-rolled steel, steelmaking technology.

DOI: 10.54826/19979258\_2022\_2\_88  
УДК 536.425:539.25:539.351

## **Структура и свойства покрытий из высокоэнтропийных сплавов FeCoCrNiMn и FeCoNiCrAl**

© **Громов Виктор Евгеньевич**<sup>1</sup>, д-р физ.-мат. наук; **Коновалов Сергей Валерьевич**<sup>1</sup>, д-р тех. наук; **Иванов Юрий Федорович**<sup>2</sup>, д-р физ.-мат. наук; **Ефимов Михаил Олегович**<sup>1</sup>; **Осинцев Кирилл Александрович**<sup>3</sup>; **Шлярова Юлия Андреевна**<sup>1</sup>; **Гостевская Анастасия Николаевна**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru*

<sup>2</sup> *Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия. E-mail: yufi55@mail.ru*

<sup>3</sup> *Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, г. Самара, Россия. E-mail: kirilloss@yandex.ru*

Используя технологию проволоочно-дугового аддитивного производства (WAAM) на подложке из сплава 5083, было сформировано покрытие высокоэнтропийными сплавами Кантора FeCoCrNiMn и FeCoNiCrAl неэквивалентных составов. Методами современного физического материаловедения проведен анализ структуры, элементного состава, микротвердости, износостойкости систем «покрытие-подложка». Установлено, что нанесение покрытий ВЭС FeCoCrNiMn и FeCoNiCrAl на поверхность сплава 5083 сопровождается формированием градиентов микротвердости и элементного состава. На границе раздела покрытия и подложки формируется переходный слой толщиной до 450 мкм. Выполнен анализ градиента элементного состава переходного слоя и отмечен высокий уровень химической однородности покрытия. Установлен факт легирования покрытия элементами подложки.

Ключевые слова: высокоэнтропийные сплавы Кантора FeCoCrNiMn и FeCoNiCrAl, покрытие, подложка, сплав 5083, механические, трибологические свойства, структура.

Using the technology of wire-arc additive manufacturing (WAAM), a coating of high-entropy Cantor alloys FeCoCrNiMn and FeCoNiCrAl of non-equiatom compositions was formed on a 5083 alloy substrate. Using the methods of modern physical materials science, an analysis of the structure, elemental composition, microhardness, and wear resistance of the «coating-substrate» system was carried out. It has been established that the deposition of the FeCoCrNiMn and FeCoNiCrAl HEA coating on the surface of the 5083 alloy is accompanied by the formation of microhardness and elemental composition gradients. A transition layer up to 450 μm thick is formed at the interface between the coating and the substrate. The elemental composition gradient of the transition layer was analyzed and a high level of chemical homogeneity of the coating was noted. The fact of coating doping with substrate elements was established.

Keywords: high-entropy Cantor alloys FeCoCrNiMn and FeCoNiCrAl, coating, substrate, alloy 5083, mechanical, tribological properties, structure.

## Исследование закономерностей формирования структуры и свойств стали 42CrMo4 при сфероидизирующем отжиге

© **Столяров Алексей Юрьевич**<sup>1</sup>, канд. техн. наук; **Зайцева Мария Владимировна**<sup>1</sup>; **Токарева Наталья Владимировна**<sup>1</sup>; **Ясюкевич Наталья Сергеевна**<sup>1</sup>; **Зайцев Александр Иванович**<sup>2,3</sup>, д-р физ.-мат. наук; **Степанов Алексей Борисович**<sup>2</sup>; **Колдаев Антон Викторович**<sup>2</sup>, канд. техн. наук; **Арутюнян Наталия Анриевна**<sup>2,3</sup>, канд. физ.-мат. наук

<sup>1</sup> **ОАО «ММК-МЕТИЗ», г. Магнитогорск, Россия.** E-mail: stolyarov.ay@mmk-metiz.ru; zaytseva.mv@mmk-metiz.ru; tokareva.nv@mmk-metiz.ru; yasukevich.ns@mmk-metiz.ru

<sup>2</sup> **ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», Москва, Россия.** E-mail: alxstp07@gmail.com; koldaevanton@gmail.com

<sup>3</sup> **Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия.** E-mail: aizaitsev1@yandex.ru; naarutyunyan@rambler.ru

Для производства высокопрочных крепежных изделий используется сортовой прокат, который должен выдерживать значительную холодную пластическую деформацию и, поэтому, его подвергают специальной термической обработке – сфероидизирующему отжигу. В настоящей работе установлены зависимости показателей микроструктуры и механических свойств круглого проката диаметрами 18 мм и 22 мм из стали 42CrMo4 от режимов термической обработки. При проведении исследования использовали методы световой и сканирующей электронной микроскопии, испытания механических свойств. Установлены зависимости степени сфероидизации перлита (цементита) и изменения механических свойств от режима сфероидизирующего отжига. Показано, что получение исходной бейнитной структуры горячекатаного проката не оказывает существенного влияния на процесс сфероидизации перлита и механические свойства.

**Ключевые слова:** сталь 42CrMo4, круглый прокат, сфероидизирующий отжиг, микроструктура, глобулярный цементит, механические свойства, металлургическое качество.

For the production of high-strength fasteners, round bars are used, which must withstand significant cold plastic deformation and, therefore, are subjected to a special heat treatment – spheroidizing annealing. In this work, the dependences of the microstructure and mechanical properties on heat treatment modes are established for round bars with diameters of 18 mm and 22 mm from 42CrMo4 steel. The methods of optical and scanning electron microscopy, and testing of mechanical properties were used. The dependences of the degree of pearlite (cementite) spheroidization and changes in mechanical properties on the spheroidizing annealing regime are established. It is shown that obtaining the initial bainitic structure of hot rolled products does not significantly affect the process of pearlite spheroidization and mechanical properties.

**Keywords:** 42CrMo4 steel, round bars, spheroidizing annealing, microstructure, globular cementite, mechanical properties, metallurgical quality.



## Александр Ивановичу ЗАЙЦЕВУ – 65 лет

В апреле 2022 г. исполнилось 65 лет **Александру Ивановичу Зайцеву** – известному учёному в области металлургии и физической химии, доктору физико-математических наук, профессору, академику РАЕН, директору научного центра Центрального научно-исследовательского института чёрной металлургии им. И.П. Бардина, профессору кафедры общей химии химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

А.И. Зайцев в 1979 г. с отличием закончил химический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Затем там же учился в аспирантуре. В 1983 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование испарения лантаноидов, берклия и калифорния из интерметаллических соединений с платиной и палладием» по специальности «Радиохимия». С 1983 г. по настоящее время Александр Иванович работает в ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, где прошёл трудовой путь от младшего научного сотрудника до директора научного центра. В 1997 г. защитил докторскую диссертацию по специальностям «Физическая химия» и «Физика твёрдого тела» на тему «Термодинамика систем с интенсивным межчастичным взаимодействием». В настоящее время А.И. Зайцев возглавляет Научный центр физико-химических основ и технологий металлургии. С 2002 г. по совместительству работает профессором кафедры общей химии химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Сфера научных интересов Александра Ивановича необычайно широка и включает

как фундаментальные, так и прикладные вопросы. Среди них аморфное состояние металлических сплавов, строение и физико-химическое поведение жидких смесей неорганических соединений и металлургических шлаков, разработка принципов создания новых сталей различных типов: сверхнизкоуглеродистых, низколегированных низкоуглеродистых, горячештампующих и других.

На базе экспериментального исследования большого числа металлических систем различной степени сложности (более 30) А.И. Зайцевым выявлены природа, условия получения и стабильности новых состояний металлических сплавов, таких как аморфное, квазикристаллическое. Созданы основы построения количественной теории стеклообразования в металлических сплавах, развития методов прогнозирования состава, физико-химических и механических свойств твердых аморфных материалов. Он впервые определил абсолютную и конфигурационную энтропию аморфных металлических сплавов от 0 К до температур кристаллизации и показал, что к ним применим Третий закон термодинамики.

Александр Иванович является автором новой концепции строения и физико-химического поведения жидких смесей неорганических соединений, силикатов, металлургических флюсов, шлаков, шлаковых смесей, рассматривающей их как ассоциированные жидкости, структурные единицы которых лишь частично диссоциированы на ионы. Это впервые позволило количественно описать реакционную способность многокомпонентных расплавов различной природы в полном концентрационном интервале и трактовать с единых позиций их термодинамическое поведение, строение, характер химического взаимодействия компонентов и важнейшие физико-химические свойства, такие как вязкость, поверхностное натяжение, плотность, теплопроводность, электропроводность и т.п.

В результате многолетней научно-исследовательской работы, отвечающей нуждам отечественных металлургических заводов, А.И. Зайцевым разработаны принципы создания новых сталей различных типов и классов прочности с улучшенным и стабильным комплексом трудно сочетаемых показателей прочности, пластичности, штампующести, усталостной и коррозионной стойкости, хладостойкости, свариваемости для изделий транспортной, грузоподъемной, строительной и других видов техники с увеличенным ресурсом эксплуатации при общем снижении затрат и металлоемкости. Уникальный комплекс свойств достигается благодаря использованию методов физико-химического модели-

рования и управления структурным состоянием, в том числе типом, количеством, размером и морфологией неметаллических включений, форм присутствия примесей и фазовых выделений.

Результаты научных исследований А.И. Зайцева обобщены в пяти монографиях:

– Физическая химия металлургических шлаков, 2008 г.;

– Коррозионно-стойкие биметаллы с прочным сцеплением слоёв для нефтехимической промышленности и других отраслей, 2011 г.;

– Аморфизация металлических расплавов, 2011 г.;

– Современные подходы к повышению коррозионной стойкости и эксплуатационной надёжности сталей для нефтепромысловых трубопроводов, 2012 г.;

– Комплексные неметаллические включения и свойства стали, 2015 г.

Александр Иванович Зайцев – автор более 330 научных трудов и более 30 патентов и авторских свидетельств.

За плодотворную научно-исследовательскую работу в области прогрессивных металлургических технологий производства высококачественных автолистовых, трубных сталей со стабильными высокими показателями служебных свойств и минимальным уровнем отсортировки металлопродукции А.И. Зайцеву с соавторами

присуждена Премия Правительства Российской Федерации 2010 г. в области науки и техники. Он неоднократно был награжден золотыми и серебряными медалями международной промышленной выставки «Металл-Экспо», выставки «Антикор и гальваносервис», дипломами Московского Международного салона изобретений и инновационных технологий «АРХИМЕД».

Александр Иванович Зайцев является членом редакционных коллегий научных журналов «Металлург» и «Проблемы чёрной металлургии и материаловедения», он член диссертационного совета в ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, ведёт большую педагогическую работу. Под его руководством подготовлены и успешно защищены 7 кандидатских диссертаций. Им разработаны курсы обучения по направлениям, связанным с химией функциональных и композиционных материалов, коррозионных и электрохимических процессов, методами исследования фазовых равновесий.

*Коллектив ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» и редакционная коллегия нашего журнала сердечно поздравляют Александра Ивановича Зайцева с юбилеем, желают ему крепкого здоровья, семейного благополучия, успеха в научно-исследовательской деятельности!*



## Леониду Николаевичу ШЕВЕЛЁВУ – 85 лет

РАЕН, главному научному сотруднику Центрального научно-исследовательского института чёрной металлургии им. И.П. Бардина.

В мае 2022 г. исполнилось 85 лет **Леониду Николаевичу Шевелёву** – известному учёному в области экономических исследований, энергоэффективности и снижения выбросов парниковых газов в чёрной металлургии, доктору экономических наук, профессору, действительному члену

А.Н. Шевелёв в 1959 г. закончил экономический факультет Ленинградского политехнического института им. М.И. Калинина по специальности «инженер-экономист». Начиная с этого же года и по 1975 г. работал на Череповецком металлургическом комбинате (Северсталь), где прошёл трудовой путь от экономиста до начальника лаборатории экономических исследований. С 1975 по 1987 гг., а затем с 2005 г. по настоящее время работает в ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, где занимал должности заведующего лабораторией, отделом, заместителя директора Института экономики, научного консультанта, ведущего научного сотрудника, а с 2010 г. по настоящее время – главный научный сотрудник Управления анализа и мониторинга металлургической отрасли. В 1978 г. защитил кандидатскую, а в 1994 г. – докторскую диссертации. С 1987

по 2004 г. Леонид Николаевич работал в федеральных органах исполнительной власти: 1987–1988 гг. – заместитель начальника Главного планово-экономического управления Министерства чёрной металлургии СССР; 1988–1991 гг. – заместитель начальника Экономического отдела Министерства металлургии СССР; в 1992 г. – начальник экономического отдела – заместитель директора департамента металлургии Министерства промышленности РФ; 1992–1996 гг. – заместитель Председателя комитета РФ по металлургии (на правах заместителя Министра, Статс-секретарь); 1996–1997 гг. – директор Департамента металлургии Министерства промышленности РФ; 1997–2000 гг. – начальник отдела инвестиционных и инновационных проектов и программ в металлургии Министерства экономического развития и торговли РФ; 2000–2004 гг. – начальник отдела инноваций, инвестиций и взаимодействия с международными организациями в металлургии Министерства промышленности, науки и технологий РФ; 2004–2005 гг. – заместитель Председателя Правления НП «Союз экспортеров металлопродукции России».

Сферой научных интересов и производственной деятельности Леонида Николаевича является повышение экономической эффективности предприятий чёрной металлургии. На Череповецком металлургическом комбинате Л.Н. Шевелёв обеспечил рентабельность работы предприятия с внедрением новых методов планирования хозяйственной деятельности, меры снижения себестоимости продукции, разработал методы эффективного производства стали в двухванных печах. Принимал участие в строительстве и вводе в эксплуатацию иранского завода Esfhan Steel. Создал новый квалиметрический метод оценки качества стали в зависимости от её химического состава. Разработанные формулы для расчёта коэффициентов качества внедрены в мировую статистику ООН. Л.Н. Шевелёвым разработаны методы формирования внебюджетных фондов для финансирования инвестиций и НИОКР, методы ресурсно-целевого кредитования пополнения оборотных средств по «технологическим цепочкам», а также методы формирования «валютного коридора» для экспорта металлопродукции. Благодаря им предприятия чёрной металлургии смогли адаптироваться к рыночным условиям, реструктурировать неэффективные мощности, привлечь финанси-

рование для технического перевооружения. Л.Н. Шевелёв разработал методику оценки избыточных мощностей металлургических предприятий. В последнее время активно занимается работами, связанными с энергосбережением, повышением энергоэффективности и снижением выбросов парниковых газов в чёрной металлургии.

Л.Н. Шевелёв возглавлял, участвовал в работе и создании многочисленных комитетов, объединений, комиссий и т.д., являлся представителем России в международных организациях. Среди них: НП «Лига экономистов и бухгалтеров металлургов», НП «Центр экспертизы и поддержки научных исследований и инновационных проектов в металлургии», Подкомитет по стали, углю и горно-сырьевым ресурсам Комитета сотрудничества Россия — ЕС (в рамках СПС); Комитет по чёрной металлургии ЕЭК ООН; Межведомственная Комиссия «Трубы–Нефть–Газ»; Межведомственная Комиссия по поставкам угля и металла «Шихта»; Межведомственная комиссия по совершенствованию налогового законодательства; Межведомственная Комиссия РФ по ценообразованию на продукцию базовых отраслей промышленности; «Международное евразийское объединение угля и металла СНГ»; ОАО «Российская металлургия» и другие.

Леонид Николаевич – автор около 130 научных трудов, в т.ч. шести монографий и четырех брошюр. За плодотворную научно-исследовательскую и общественную работу Л.Н. Шевелёв имеет 6 правительственных и 12 общественных наград, в том числе два почётных международных звания доктора наук: Нью-Йоркской академии естественных наук и Кембриджского университета (Великобритания). Среди правительственных наград: Знак «За заслуги в стандартизации», Знак «300 лет Уральской металлургии», Медаль «За заслуги в развитии науки и экономики», почетное звание «Почетный металлург», медаль ордена «За заслуги перед Отечеством» 2 степени.

Л.Н. Шевелёв являлся членом редакционных коллегий журналов «Сталь» и «Электрометаллургия», главным редактором журнала «Чёрная металлургия: бюллетень научно-технической информации». Леонид Николаевич проводил большую педагогическую работу, являлся членом диссертационных советов в ЦНИИчермет им. И.П. Бардина и МИСиС, яв-

лялся председателем ГАК по оценке дипломных проектов в МВМИ и МИСиС.

Л.Н. Шевелёв активно участвует в общественной работе и организациях. Его избирали руководителем международных и национальных организаций чёрной металлургии (ЕЭК ООН, ОЭСР, МЕАОУМ, ОАО «Российская металлургия» и др.), он является членом оргкомитетов Ассоциаций доменщиков, Ассоциации сталепла

вильщиков, международного союза экономистов, международной выставки «Металл-Экспо».

*Коллектив ЦНИИчермет им. И.П. Бардина и редакционная коллегия нашего журнала сердечно поздравляют Леонида Николаевича Шевелёва с юбилеем, желают ему крепкого здоровья, семейного благополучия и продолжения плодотворной научной деятельности.*



### **ВНИМАНИЕ! ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА на журнал**

## **«ПРОБЛЕМЫ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ»**

**Подписной индекс – 58999**

*Подписку на журнал вы можете оформить:*

- на сайте «Объединенного каталога «Пресса России» [www.pressa-rf.ru](http://www.pressa-rf.ru),
- подписаться через интернет-магазин «Пресса по подписке» можно на сайте <https://www.akc.ru>
- подписка через редакцию
- подписка на электронную версию в редакции

На электронную версию журнала можно также подписаться на сайте Научной Электронной Библиотеки (НЭБ) <http://www.elibrary.ru>



Приобрести журналы за безналичный расчет можно в ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина». Для оформления подписки на журнал по безналичному расчету необходимо прислать заявку с указанием номера журнала и количества экземпляров, адрес и банковские реквизиты.

**Всю информацию следует отправить по электронной почте либо по факсу:**

**E-mail: [ntphm@yandex.ru](mailto:ntphm@yandex.ru), [a.glezer@mail.ru](mailto:a.glezer@mail.ru)**

**Факс: (495)777-94-98, (495)777-93-00**

**Тел. редакции: (495)777-94-98; (495)777-93-02; (495)777-95-13**