

# ПРОБЛЕМЫ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

СОДЕРЖАНИЕ

4 • 2021

## *Теоретические основы металлургии*

**В. В. Виноградов, А. Г. Шакуров, Е. П. Виноградова**

Решение тепловой задачи с несопряженными краевыми условиями для шаровой системы в установке по переработке металлургического шлака .....5

**П. А. Николайчук**

Термодинамическая оценка коррозионно-электрохимического поведения кремнистых бронз .....9

## *Сырьевая база черной металлургии*

**А. Н. Смирнов, С. А. Крылова, Д. И. Алексеев, В. И. Сысоев, А. И. Волков**

Разработка основ технологии комплексной переработки высокомагнезиального железорудного сырья .....30

## *Технологические процессы металлургии*

**К. А. Антипов, В. Е. Филиппов**

Использование технологий искусственного интеллекта при решении практических задач металлургии .....38

**А. А. Холодный, Ю. И. Матросов, Я. С. Кузнеченко, М. В. Ильичев, Д. И. Юсупов**

Влияние химического состава и режимов охлаждения после контролируемой прокатки на микроструктуру и механические свойства листов из трубных сталей с пониженным содержанием марганца .....42

## *Материаловедение и новые материалы*

**Н. О. Ливанова, Б. К. Каскин, А. В. Куклев, Е. Ю. Нарусова, Г. А. Филиппов**

Особенности структурного состояния металла шейки дифференцированно закаленных рельсов .....54

**Д. В. Кудашов, Л. И. Эфрон, Е. А. Волкова, А. В. Частухин, А. В. Червонный, А. А. Хлыбов**

Формирование структуры и свойств трубной стали со сверхнизким содержанием марганца .....63

**Е. А. Голи-Оглу**

Свариваемость конструкционных сталей S355MLO и S420MLO толщиной 82 мм, произведенных методом ТМО+УО и применяемых для морских ветрогенераторов нового поколения .....76

**Ю. И. Матросов, А. А. Холодный, Я. С. Кузнеченко, А. С. Тюфтяев, Д. И. Юсупов**

Влияние условий нагружения и прочностных свойств на сопротивляемость трубных сталей сульфидному растрескиванию под напряжением при одноосном растяжении .....86

## *Информация*

Авторский указатель за 2021 год .....94

# PROBLEMS OF FERROUS METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

CONTENTS

4 • 2021

## *Fundamentals of metallurgy.*

**V. V. Vinogradov, A. G. Shakurov, E. P. Vinogradova**

Solving of the heat problem with non-conjugate boundary conditions for a ball system in a metallurgical slag processing plant.....5

**P. A. Nikolaychuk**

Thermodynamic evaluation of the corrosion-electrochemical behaviour of silicon bronzes.....9

## *Raw materials for ferrous metallurgy*

**A. N. Smirnov, S. A. Krylova, D. I. Alekseev, V. I. Sysoyev, A. I. Volkov**

Development of the fundamentals of the technology of complex processing of high-magnesium iron ore raw materials .....30

## *Production processes in metallurgy*

**K. A. Antipov, V. Filippov**

The use of artificial intelligence technologies in solving practical problems of metallurgy .....38

**A. A. Kholodnyi, Yu. I. Matrosov, Ya. S. Kuznechenko, M. V. Ilyichev, D. I. Yusupov**

Effect of chemical composition and cooling modes after controlled rolling on the microstructure and mechanical properties of rolled plates from pipe steels with reduced manganese content .....42

## *Materials science and new materials.*

**N. O. Livanova, B. K. Kaskin, A.V. Kuklev, E. Yu. Narusova, G. A. Filippov**

Features of structural heterogeneity and determination of the optimal self-discharge temperature of high-carbon steel .....54

**D. V. Kudashov, L. I. Efron, E. A. Volkova, A. V. Chastuhin., A. V. Chervonnyj, A. A. Hlybov**

Formation of the structure and properties of pipe steel with an ultra-low manganese content .....63

**E. A. Goli-Oglu**

Weldability of offshore structural steel grades S355MLO and S420MLO, produced by TMCP with accelerated cooling and used for offshore wind turbines of new generation .....76

**Yu. I. Matrosov, A. A. Kholodnyi, Ya. S. Kuznechenko, A. S. Tyuftyaev, D. I. Yusupov**

Effect of loading conditions and strength properties on the resistance of pipe steels to sulfide stress cracking under uniaxial tension.....86

## *Information*

Authors Index 2021 .....94

УДК 536.2: 548.4: 539.219.6: 669.054.82

## **Решение тепловой задачи с несопряженными краевыми условиями для шаровой системы в установке по переработке металлургического шлака**

**В. В. Виноградов<sup>1</sup>, А. Г. Шакуров<sup>2</sup>,  
Е. П. Виноградова<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> ФГУП “ЦНИИчермет им. И.П.Бардина”, Москва, E-mail: vvvinogradov@mtu-net.ru

<sup>2</sup> ООО “Экошлак-рециклинг”, E-mail: main@ecoslag.ru

<sup>3</sup> ФГБУ “ИПУ РАН им. В.А.Трапезникова”, Москва, E-mail: vep4545@mail.ru

Получено аналитическое решение уравнения теплопроводности для сферических тел при несопряженных краевых условиях. Проведены расчеты и проанализирована кинетика распределения температур в сферических телах на примере работы установки барабанного типа по переработке металлургического шлака в товарную продукцию.

Ключевые слова: уравнение теплопроводности, несопряженные краевые условия, шар, переработка металлургического шлакового расплава.

---

An analytical solution of the heat conduction equation for spherical bodies under non-conjugate boundary conditions is obtained. The kinetics of temperature distribution in spherical bodies was calculated and analyzed using the example of a drum-type plant for processing waste metallurgical slag into marketable products.

Keywords: heat conduction equation, non-conjugate boundary conditions, ball, processing of metallurgical slag melt.

DOI: 10.54826/19979258\_2021\_4\_5

УДК 541.1:620.193.01:669.14

## Термодинамическая оценка коррозионно-электрохимического поведения кремнистых бронз

**П. А. Николайчук**

*Кафедра аналитической химии и химии окружающей среды, Институт биохимии, Грайфсвальдский университет, Германия. E-mail: пра@csu.ru*

Рассчитаны термодинамические активности компонентов кремнистых бронз БрКН1-3, БрКМц3-1 и С70250. Построены диаграммы потенциал – рН вышеуказанных кремнистых бронз при 25 °С, общем давлении воздуха 1 бар и активностях ионов в растворе  $10^{-4}$  М. Анализируются термодинамические особенности химической и электрохимической стойкости кремнистых бронз.

Ключевые слова: кремнистая бронза БрКН1-3, кремнистая бронза БрКМц3-1, кремнистая бронза С70250, термодинамический анализ, фазовые равновесия, химическая устойчивость, коррозионно-электрохимическое поведение, диаграммы потенциал – рН.

---

The thermodynamic activities of the components of the silicon bronzes C65500, C70320 and C70250 were calculated. The potential – pH diagrams for the aforementioned bronzes at 25 °C, total air pressure of 1 bar and the activities of ions in solution equal to  $10^{-4}$  M were plotted. The thermodynamic features of the chemical and electrochemical stability of silicon bronzes were analysed.

Keywords: silicon bronze C65500, silicon bronze C70320, silicon bronze C70250, thermodynamic assessment, phase equilibria, chemical stability, corrosion-electrochemical behaviour, potential – pH diagrams.

DOI: 10.54826/19979258\_2021\_4\_9

УДК 622.772

## **Разработка основ технологии комплексной переработки высокомагнезильного железорудного сырья**

**А. Н. Смирнов<sup>1</sup>, С. А. Крылова<sup>1</sup>, Д. И. Алексеев<sup>1</sup>,  
В. И. Сысоев<sup>1</sup>, А. И. Волков<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, E-mail: sman@magtu.ru, svkryl@mail.ru, alekseev41047@mail.ru*

<sup>2</sup> *Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина, Москва*

В статье рассмотрены физико-химические основы комплексной переработки высокомагнезильного железорудного сырья, реализация которых позволяет эффективно удалять как вмещающую породу, так и селективно извлекать оксид магния. Сочетание термомеханического обогащения и выщелачивания позволяет повысить содержание железа в концентрате, относительно применяемой технологии, на 7 % и получать до 100–120 кг на 1 т концентрата высокоактивной магнезии с содержанием не менее 98 % оксида магния. Кроме того, получаемый продукт может быть использован в качестве дешевой контактной массы для ряда каталитических реакций.

Ключевые слова: комплексная переработка природных высокомагнезильных сидеритов, железорудный концентрат, магнезия, термомеханическое обогащение, диоксид, оксид углерода, выщелачивание, бикарбонат магния.

---

The article discusses the physical and chemical foundations of the complex processing of high-magnesia iron ore raw materials, the implementation of which makes it possible to effectively remove both the enclosing rock and selectively extract magnesium oxide. Combination of thermomechanical beneficiation and leaching makes it possible to increase iron content in concentrate by 7 %, to obtain up to 100–120 kg per ton of concentrate of highly active magnesia containing no less than 98 % of magnesium oxide as well as to vary the structure, phase and chemical composition of roasting product which opens the possibility of using it as a ready-to-use catalyst.

Keywords: complex processing of natural high-magnesia siderites, iron ore concentrate, magnesia, thermomechanical beneficiation, dioxide, carbon oxide, leaching, magnesium bicarbonate.

**DOI: 10.54826/19979258\_2021\_4\_30**

УДК 004.89 : 004.67 : 669.1 : 519.25

## **Использование технологий искусственного интеллекта при решении практических задач металлургии**

**К. А. Антипов, В. Е. Филиппов**

*ООО “Промпрогноз”, г. Москва*

*E-mail: info@promprognoz.ru*

В статье рассматриваются примеры применения цифровых технологий в металлургии. Показано, какие задачи можно эффективно решать методами машинного обучения, в частности, в черной металлургии в сталеплавильном производстве. Приводятся цифры потенциальной экономии ферросплавов, увеличения производительности процессов. Описанные модели позволяют прогнозировать различные параметры плавки в помощь мастерам электросталеплавильного цеха.

Ключевые слова: машинное обучение, искусственный интеллект, оптимизация расхода ферросплавов, неметаллические включения, прогнозирование в производстве, цифровая модель.

The article discusses examples of the use of digital technologies in metallurgy. It is shown which tasks can be effectively solved by machine learning methods, in particular, in ferrous metallurgy in steelmaking. The figures of potential savings of ferroalloys, increasing the productivity of processes are given. The described models make it possible to predict various melting parameters to help the masters of the electric steelmaking workshop.

Keywords: machine learning (ML), artificial intelligence (AI), saving the consumption of ferroalloys, non-metallic inclusions, prediction in production, digital model.

**DOI: 10.54826/19979258\_2021\_4\_38**

УДК 669.15-194.2

# **Влияние химического состава и режимов охлаждения после контролируемой прокатки на микроструктуру и механические свойства листов из трубных сталей с пониженным содержанием марганца**

**А. А. Холодный<sup>1</sup>, Ю. И. Матросов<sup>1</sup>,  
Я. С. Кузнеченко<sup>1</sup>, М. В. Ильичев<sup>2</sup>, Д. И. Юсупов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ГНЦ ФГУП “ЦНИИчермет им. И.П. Бардина”. Россия, Москва.

*E-mail: kholodnyi.aa@gmail.com*

<sup>2</sup> ФГБУН ОИВТ РАН. Россия, Москва

Установлено влияние химического состава и температурно-скоростных режимов охлаждения после контролируемой прокатки на микроструктуру, прочностные свойства и низкотемпературную ударную вязкость листов категорий прочности от В ( $\sigma_T = 245 - 450$  Н/мм<sup>2</sup>;  $\sigma_B = 415 - 655$  Н/мм<sup>2</sup>) до Х70 ( $\sigma_T = 485 - 635$  Н/мм<sup>2</sup>;  $\sigma_B = 570 - 760$  Н/мм<sup>2</sup>) из низкоуглеродистых сталей различных вариантов легирования (Cr, Ni, Cu, Mo) с пониженным содержанием Mn (0,55–1,15 %), характерным для H<sub>2</sub>S-стойких труб.

Ключевые слова: низколегированная трубная сталь, химический состав, листовой прокат, контролируемая прокатка, ускоренное охлаждение, микроструктура, предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение, твердость, ударная вязкость.

The effect of chemical composition and temperature-speed cooling modes after controlled rolling on the microstructure, strength properties and low-temperature impact strength of rolled plates grades from В ( $\sigma_T = 245 - 450$  N/mm<sup>2</sup>;  $\sigma_B = 415 - 655$  N/mm<sup>2</sup>) to Х70 ( $\sigma_T = 485 - 635$  N/mm<sup>2</sup>;  $\sigma_B = 570 - 760$  N/mm<sup>2</sup>) of low-carbon steels with different alloying variation (Cr, Ni, Cu, Mo) and reduced content of Mn (0.55–1.15 %) typical for H<sub>2</sub>S-resistant pipes was determined.

Keywords: low-alloy pipe steel, chemical composition, rolled plate, controlled rolling, accelerated cooling, microstructure, yield strength, tensile strength, elongation, hardness, impact strength.

DOI: 10.54826/19979258\_2021\_4\_42

УДК 669-157.96

## **Особенности структурного состояния металла шейки дифференцированно закаленных рельсов**

**Н. О. Ливанова<sup>1</sup>, Б. К. Каскин<sup>2</sup>, А. В. Куклев<sup>1</sup>,  
Е. Ю. Нарусова<sup>3</sup>, Г. А. Филиппов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ФГУП “ЦНИИчермет им. И.П. Бардина”, г. Москва, [iqs12@yandex.ru](mailto:iqs12@yandex.ru)

<sup>2</sup> ТОО “АРБЗ”, г. Актобе (Казахстан),

<sup>3</sup> Московский университет транспорта РУТ (МИИТ), г. Москва

В работе исследовали участки структурной неоднородности в шейке рельсов из стали Э76Ф. Определена температура самоотпуска высокоуглеродистой рельсовой стали в области структурной неоднородности шейки рельса, изготовленного из НЛЗ. Показано, что низкий отпуск недостаточен для релаксации остаточных микронапряжений в высокоуглеродистой стали.

Ключевые слова: мартенсит, высокоуглеродистая сталь, отпуск, термическая обработка.

The article is devoted to the study of the structural heterogeneity in the neck of the rails of the type P65 made of steel E76F. A laboratory experiment was conducted to determine the optimal self-starting temperature of high-carbon rail steel.

Keywords: martensite, high-carbon steel, tempering, heat treatment.

DOI: [10.54826/19979258\\_2021\\_4\\_54](https://doi.org/10.54826/19979258_2021_4_54)



УДК 620.186; 539.551; 621.77.04

## Формирование структуры и свойств трубной стали со сверхнизким содержанием марганца

Д. В. Кудашов<sup>1,2</sup>, Л. И. Эфрон<sup>1</sup>, Е. А. Волкова<sup>2</sup>,  
А. В. Частухин<sup>1</sup>, А. В. Червонный<sup>1</sup>, А. А. Хлыбов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> АО «Выксунский металлургический завод», Россия, г. Выкса, E-mail: kudashov\_dv@vsw.ru, LEfron@omk.ru, chastuhin\_av@vsw.ru, chervonnyj\_av@vsw.ru

<sup>2</sup> Выксунский филиал НИТУ «МИСУ», Россия, г. Выкса, E-mail: eavolk@yandex.ru

<sup>3</sup> НГТУ имени Р. Алексеева, Россия, г. Нижний Новгород, E-mail: hlybov\_52@mail.ru

Изучено влияние технологических параметров (промышленных и лабораторных) прокатки на формирование структуры и свойств различных сталей, стойких к водородному растрескиванию. Сталь со сверхнизким содержанием марганца и высоким содержанием ниобия отличается пониженной склонностью к росту аустенитного зерна. Кроме того, равномерная мелкозернистая микроструктура в этой стали сохраняется при нагреве до более высоких температур и при выдержке при этих температурах. Новая марка стали показала замедленную рекристаллизацию горячедеформированного аустенита в сравнении с традиционными сталями для работы в кислых средах. Установлено, что эта сталь имеет более узкий интервал технологических параметров при прокатке в промышленных условиях, с точки зрения формирования структуры и комплекса механических свойств. В исследованном интервале параметров лабораторной и промышленной прокатки влияния микроструктуры на стойкость к сероводородному растрескиванию не выявлено.

Ключевые слова: сверхнизкое содержание марганца, ниобий, нагрев под прокатку, кинетика статической рекристаллизации, термокинетические диаграммы превращения горячедеформированного аустенита, микроструктура стали, контролируемая прокатка с ускоренным охлаждением, листовой прокат, механические свойства, стойкость к водородному растрескиванию.

The influence of technological parameters (industrial and laboratory) of hot rolling/deformation on the formation of the structure and properties of various steels resistant to hydrogen cracking is studied. Steel with an ultra-low manganese content and a high niobium content is characterized by a reduced tendency to the growth of austenite grains. In addition, the uniform fine-grained microstructure in this steel is preserved when heated to higher temperatures and when kept at these temperatures. The new steel showed a delayed recrystallization of hot-deformed austenite in comparison with traditional steel grade for sour application. It was found that this steel has a narrower range of technological parameters when rolling under industrial conditions, from the point of view of the formation of the structure and complex of mechanical properties. In the investigated range of laboratory and industrial rolling parameters, the influence of the microstructure on the resistance to hydrogen sulfide cracking was not revealed.

Keywords: ultra-low manganese content, niobium, heating for rolling, kinetics of static recrystallization, thermokinetic diagrams of transformation of hot-deformed austenite, microstructure of steel, controlled rolling with accelerated cooling, sheet metal, mechanical properties, resistance to hydrogen cracking.

DOI: 10.54826/19979258\_2021\_4\_63

УДК 669.14.018.41

# **Свариваемость конструкционных сталей S355MLO и S420MLO толщиной 82 мм, произведенных методом ТМО+УО и применяемых для морских ветрогенераторов нового поколения**

**Е. А. Голи-Оглу**

*NLMK DanSteel A/S, г. Фредериксверк, Дания, E-mail: EGoli-Oglu@yandex.ru*

Отмечен рост сегмента морской ветроэнергетики в следующие два десятилетия. Приведено описание основных частей и размеров морских башен, используемых для ветрогенераторов мощностью 8 – 15 МВт, включая прогноз развития до 2030 г. Исследована свариваемость используемых для морских башен низкоуглеродистых микролегированных толстолистовых сталей категорий качества S355MLO и S420MLO, производимых по стандарту EN 10225-1:2019, регламентирующему технические условия производства и сертификации толстолистового проката из свариваемой конструкционной стали для фиксированных морских конструкций. На примере промышленных партий сварных соединений проката толщиной 82 мм, произведенного по технологии термомеханической обработки с ускоренным охлаждением, исследован уровень прочности, низкотемпературной ударной вязкости, сопротивления усталостным разрушениям (CTOD). Отмечен высокий уровень свойств сварного соединения исследуемой стали после сварки с погонной энергией  $50 \pm 2$  кДж/см методом многопроходной погружной дуговой сварки (SAW). Результаты исследования использованы при успешной сертификации проката толщиной до 82 мм категорий качества S355MLO и S420MLO по стандартам EN 10225-1:2019 и NORSOK M-120 с приемкой от морского классификационного общества DNV (DNV-GL).

Ключевые слова: ветроэнергетика, низкоуглеродистая сталь, толстолистовой прокат, термомеханическая обработка, свариваемость, зона термического влияния, механические свойства, ТМО, NORSOK, DNV.

A description of the main parts and dimensions of offshore towers and foundation used for wind turbines with a capacity of 8 – 15 MW, including a development forecast for 2030 is given. The weldability of low-carbon microalloyed heavy plate steels grades S355MLO and S420MLO, used for offshore towers has been studied. The level of strength, low-temperature impact toughness, and fatigue resistance (CTOD test) was investigated on the example of industrial batches of welded joints of heavy plates with a thickness of 82 mm, produced by the technology of thermomechanical processing with accelerated cooling. A high level of properties of the welded joint of the studied steel after welding with a heat input of  $50 \pm 2$  kJ/cm using multi-pass submersible arc welding (SAW) is noted. Results of a study are used for successful certification heavy plate steels grades S355MLO and S420MLO with thickness up to 82 in accordance with EN 10225-1: 2019 and NORSOK M-120 standards with verification from the marine classification society DNV.

Key words: wind energy, low carbon steel, offshore steel, heavy plate, thermomechanical treatment, weldability, heat affected zone, mechanical properties, TMCP, NORSOK, DNV.

**DOI: 10.54826/19979258\_2021\_4\_76**

УДК 669.15-194.2

# **Влияние условий нагружения и прочностных свойств на сопротивляемость трубных сталей сульфидному растрескиванию под напряжением при одноосном растяжении**

**Ю. И. Матросов<sup>1</sup>, А. А. Холодный<sup>1</sup>,  
Я. С. Кузнеченко<sup>1</sup>, А. С. Тюфтяев<sup>2</sup>, Д. И. Юсупов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина». Россия, Москва.

*E-mail: kholodnyi.aa@gmail.com*

<sup>2</sup> ФГБУН ОИВТ РАН. Россия, Москва

Установлены зависимости длительной стойкости против SSC ( $\tau_{SSC}$ ) при испытании на сульфидное растрескивание под напряжением при одноосном растяжении от величины коэффициента нагрузки ( $k = 0,6 - 1,0$ ) и механических свойств листов из трубных сталей промышленного производства. Определен запас прочностных свойств (величина предела текучести и временного сопротивления), обеспечивающий длительную стойкость  $\tau_{SSC}$  сталей категорий прочности от В до Х70 в течение не менее 720 ч.

Ключевые слова: низколегированная трубная сталь, термомеханическая обработка, толстолистовой прокат, микроструктура, механические свойства, сульфидное растрескивание под напряжением.

Dependences of long-term resistance to SSC ( $\tau_{SSC}$ ) during testing on sulfide stress cracking under uniaxial tension on the value of the load factor ( $k = 0.6 - 1.0$ ) and mechanical properties of plates from industrial pipe steels are established. The margin of strength properties (the value of the yield strength and tensile strength), providing long-term resistance  $\tau_{SSC}$  of steels grades from B to X70 for  $\geq 720$  hours, has been determined.

Keywords: low-alloy pipe steel, thermomechanical treatment, rolled plate, microstructure, mechanical properties, sulfide stress cracking.

DOI: 10.54826/19979258\_2021\_4\_86