

# ПРОБЛЕМЫ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

СОДЕРЖАНИЕ

3 • 2018

## *Теоретические основы металлургии*

**И. Н. Гаврилин**

Использование гибридной модели на базе нелинейной авторегрессии искусственной нейронной сети глубокого обучения и метода спектрально-сингулярного анализа для моделирования поведения и прогнозирования основных компонентов и показателей газового анализа по ходу кислородно-конвертерной плавки .....5

## *Технологические процессы металлургии*

**Е. М. Васенина, А. С. Гриншпон, А. И. Седышев,**

**В. В. Кислица, Л. А. Баева, Г. А. Филиппов**

Разработка технологии термической обработки железнодорожных колес, обеспечивающей получение однородной структуры в ободе .....10

## *Материаловедение и новые материалы*

**И. Г. Родионова, А. В. Амежнов, С. И. Ябуров, А. И. Зайцев, Н. И. Эндель**

О влиянии циркония на коррозионную стойкость углеродистой и низколегированной трубных сталей .....16

**А. А. Холодный, Ю. И. Матросов, Я. С. Кузнеценко**

Влияние отпуска после термомеханической обработки на механические свойства и стойкость против водородного растрескивания листов из трубных сталей .....26

**Р. А. Назипов, Ю. М. Выжимов, Э. А. Арсланов**

Влияние "слабого" магнитного поля на мёссбауэровский спектр сплава 5БДСР .....33

**А. И. Зайцев, А. В. Колдаев, Б. М. Могутнов, Н. А. Арутюнян**

Принципы создания сталей для изготовления эффективных высокопрочных изделий методами горячей штамповки .....40

**Г. С. Белоусов, А. В. Белоусов, М. Е. Гетманова, Г. А. Филиппов**

Исследование структуры и свойств подшипниковых сталей для тел качения, легированных азотом методом газотермобарической обработки .....49

**М. Ю. Семенов, В. С. Крапошин, А. Л. Талис, А. Ю. Жиляков, И. П. Королев**

Расчет энергетического порога полиморфного превращения в системе Fe – Cr методом атомистического моделирования .....54

**А. И. Зайцев, А. В. Колдаев, Б. М. Могутнов, Н. А. Арутюнян, С. Ф. Дунаев**

Исследование роли молибдена в системе микролегирования высокопрочных ферритных автолистовых сталей .....64

**Э. А. Елисеев, Г. С. Севальнёв, А. В. Леонов, О. В. Седов**

Исследование химического состава зернограницных областей азотированного слоя в низкоуглеродистой стали мартенситного класса .....72

**А. В. Амежнов, И. Г. Родионова, А. И. Зайцев, Б. М. Могутнов, О. Н. Бакланова**

Влияние химического состава неметаллических включений на коррозионную стойкость углеродистых и низколегированных сталей в водных средах, характерных для условий эксплуатации нефтепромысловых трубопроводов .....81

## *Контроль металлургического производства и металлопродукции*

**Н. Н. Рацук, И. А. Сафонов, Е. Ф. Лежнева, И. Л. Харина**

Разработка методики исследования коррозионной стойкости многослойных металлических материалов с внутренним протектором для повышения долговечности и надёжности металлоёмких конструкций .....91

**С. С. Шумкин, М. Ю. Семёнов**

Определение химического состава металлических постоянных магнитов, содержащих редкоземельные металлы, обеспечивающего оптимальные магнитные свойства .....96

**И. И. Франтов, И. Ю. Уткин, А. С. Кириченко**

Методика и оборудование для исследования кинетики фазовых превращений аустенита ..... 101

# ПРОБЛЕМЫ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

---

## **Главный редактор**

канд. техн. наук В.А.Углов

## **Заместители главного редактора:**

акад. РАН, докт. техн. наук проф. О.А.Баннных;  
акад. РАН, докт. техн. наук проф. Л.И.Леонтьев;  
докт. хим. наук проф. Б.М.Могутнов;  
акад. РАН, докт. техн. наук проф. Ю.В.Цветков

## **Редакционная коллегия:**

чл.-корр РАН, докт. техн. наук проф. М.И.Алымов;  
канд. эконом. наук А.А.Бродов; докт. физ.-мат. наук В.В.Виноградов;  
докт. физ.-мат. наук проф. А.М.Глезер;  
канд. эконом. наук С.А.Гурова; канд. техн. наук Анд.Д.Дейнеко;  
Г.Н.Еремин; докт. физ.-мат. наук проф. А.И.Зайцев;  
докт. техн. наук проф. А.Б.Коростелев; докт. техн. наук проф. Л.В.Коваленко;  
докт. техн. наук проф. К.Л.Косырев; докт. техн. наук А.В. Куклев;  
докт. техн. наук проф. Е.А.Левашов;  
канд. техн. наук В.В.Мальцев; докт. техн. наук проф. Б.В.Молотилов;  
канд. техн. наук Ю.Д.Морозов; канд. техн. наук Т.П.Москвина;  
канд. техн. наук В.М.Некрасов; докт. техн. наук А.Н.Никулин;  
канд. техн. наук О.Г.Оспенникова; канд. техн. наук А.В.Пинчук;  
докт. техн. наук И.Г.Родионова; канд. техн. наук Б.А.Сарычев;  
докт. техн. наук проф. А.Е.Сёмин; канд. техн. наук проф. Б.А.Сивак; О.А.Скачков;  
акад. РАН, докт. техн. наук проф. Л.А.Смирнов; А.С.Ушаков;  
докт. техн. наук, проф. Г.А.Филиппов; докт. техн. наук И.П.Шабалов.

## **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: bmogutnov@mail.ru, NTPHM@yandex.ru, bmogutnov@mtu-net.ru

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

**ISSN 1997-9258**

Журнал зарегистрирован в агентстве "РОСПЕЧАТЬ" 23.01.2008 г.  
Регистрационный индекс 58999.

© ЦНИИчермет им. И.П. Бардина 2018

# PROBLEMS OF FERROUS METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

CONTENTS

3 • 2018

## *Fundamentals of metallurgy*

**I. N. Gavrilin**

Use of a hybrid model based on nonlinear autoregression of an artificial neural network of deep learning and singular spectrum analysis for modelling the behavior and forecasting the main components and indicators of waste gas analysis during LD process .....5

## *Production processes in metallurgy*

**E. M. Vasenina, A. S. Grinshpon, A. I. Sedyshev, V. V. Kislitsa, L. A. Baeva, G. A. Filippov**

Development of technology for heat treatment of railway wheels, which provides homogeneous structure of the rim.....10

## *Materials science and new materials*

**I. G. Rodionova, A. V. Amezhnov, S. I. Yaburov, A. I. Zaitsev, N. I. Endel**

About the influence of zirconium on the corrosion resistance of carbon and low-alloy pipe steels.....16

**A. A. Kholodnyy, Yu. I. Matrosov, Ya. S. Kuznechenko**

The effect of tempering after thermomechanical treatment on the mechanical properties and resistance to hydrogen-induced cracking of pipe steel plates .....26

**R. A. Nazipov, Yu. M. Vyzhimov, E. A. Arslanov**

The effect of a weak magnetic field on Mössbauer spectrum of the 5NbCuSiB alloy .....33

**A. I. Zaitsev, A. V. Koldaev, B. M. Mogutnov, N. A. Arutyunyan**

Principles of developing steels for manufacturing effective high-strength articles by hot die forming technique ...40

**G. S. Belousov, A. V. Belousov, M. E. Getmanova, G. A. Filippov**

Research into structure and properties of bearing steels for rolling bodies alloyed by nitrogen in the course of gas-thermobaric treatment.....49

**M. Yu. Semenov, V. S. Kraposhin, A. L. Talis, A. Yu. Zhilyakov, I. P. Korolev**

Calculation of the energy threshold for polymorphic transformation in the Fe – Cr system by atomistic modeling.....54

**A. I. Zaitsev, A. V. Koldaev, B. M. Mogutnov, N. A. Arutyunyan, S. F. Dunaev**

Study on the role of molybdenum in the system of microalloying high-strength ferritic autosheet steels .....64

**E. A. Eliseev, G. S. Seval'nev, A. V. Leonov, O. V. Sedov**

Investigation on the chemical composition of grain boundary regions in nitrated case of a low-carbon martensitic steel.....72

**A. V. Amezhnov, I. G. Rodionova, A. I. Zaitsev, B. M. Mogutnov, O. N. Baklanova**

Influence of the chemical composition of non-metallic inclusions on corrosion resistance of carbon and low-alloy steels in aqueous media typical for service conditions of oil-field pipelines .....81

## *Control of metallurgical manufacture and metal products*

**N. N. Ratsuk, I. A. Safonov, E. F. Lezhneva, I. L. Kharina**

Development of a technique for research of corrosion resistance of multilayer metallic materials with an internal protector for increasing durability and reliability of metal-consuming constructions .....91

**S. S. Shumkin, M. Yu. Semenov**

Determination of chemical composition of metallic permanent magnets containing rare-earth elements that provides optimal magnetic properties.....96

**I. I. Frantov, I. Yu. Utkin, A. S. Kirichenko**

Methods and equipment for research of kinetics of austenite phase transformations ..... 101

УДК 669.184

# **Использование гибридной модели на базе нелинейной авторегрессии искусственной нейронной сети глубокого обучения и метода спектрально-сингулярного анализа для моделирования поведения и прогнозирования основных компонентов и показателей газового анализа по ходу кислородно-конвертерной плавки**

**И. Н. Гаврилин**

*115553, г.Москва, Нагатинская наб., д.10, кв.51. E-mail: ilya-gavrilin@mail.ru*

Представлено описание, методика создания и результаты использования гибридной модели NAR MSSA. Модель была создана путем применения для нелинейной авторегрессионной модели искусственной нейронной сети глубокого обучения (NAR ANN) перед этапом предпроцессирования расширенной фильтрации исходных данных методом многомерного спектрально-сингулярного анализа (MSSA). Полученная гибридная модель (NAR MSSA) использовалась для моделирования и прогнозирования поведения основных компонентов и показателей газового анализа по ходу кислородно-конвертерной плавки.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, глубокое обучение, нелинейная авторегрессионная модель, гибридная модель, MSSA, предпроцессирование, MSE, MAPE, расширенная фильтрация, прогнозирование.

---

The description, method of realization and results of use of the NAR MSSA hybrid model are presented. The model has been developed through application for the nonlinear autoregressive artificial neural networks of deep learning (NAR ANN), before preprocessing, of extended filtering initial data by the multi-channel singular spectrum analysis (MSSA). The developed hybrid model (NAR MSSA) was used for simulation and forecasting the general behavior of basic components and indicators of waste gases analysis in the course of LD process.

Keywords: artificial neural networks, deep learning, nonlinear autoregressive model, hybrid model, MSSA, pre-processing, MSE, MAPE, extended filtering, forecasting.

УДК 669.183:669.14.018.294:539.219.1

## **Разработка технологии термической обработки железнодорожных колес, обеспечивающей получение однородной структуры в ободе**

**Е. М. Васенина<sup>1</sup>, А. С. Гриншпон<sup>1</sup>, А. И. Седышев<sup>1</sup>,  
В. В. Кислица<sup>1</sup>, Л. А. Баева<sup>2</sup>, Г. А. Филиппов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>АО «Выксунский металлургический завод», г. Выкса, Нижегородская обл.  
E-mail: sedyshev\_ai@vsw.ru.

<sup>2</sup>ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П.Бардина», г. Москва. E-mail: iqs12@yandex.ru

Применение новой схемы и алгоритма охлаждения при закалке железнодорожных колёс в условиях колёсопрокатного производства АО «Выксунский металлургический завод» привело к значительному улучшению макро- и микроструктуры ободьев колёс диаметром 957 мм из стали марки «Т» по ГОСТ 10791-2011 и колёс диаметром 914 по стандарту AAR M-107/M-208 при сохранении физико-механических свойств на уровне колёс текущего производства. Предлагаемые изменения позволят значительно повысить эксплуатационные характеристики колёс за счет более однородной структуры по всему сечению обода колеса. Применение новой технологии охлаждения при термическом упрочнении железнодорожных колёс позволяет выполнять ужесточённые требования к микроструктуре обода колеса различных зарубежных стандартов на производство железнодорожных колес.

Ключевые слова: железнодорожные колеса, термообработка, структура, механические свойства.

The application of the new scheme and algorithm of cooling for hardening of railway wheels in the conditions of wheel rolling production of OJSC «Vyksa metallurgical plant» has led to significant improving macro- and microstructure of rims of wheels of 957 mm in diameter from the «T» steel (GOST 10791-2011) and wheels of 914 mm in diameter according to the AAR M-107/M-208 standard, while physical and mechanical properties remain at the level of wheels of the current production. The proposed changes will significantly enhance the wheels operational characteristics through a more uniform structure throughout the cross section of the wheels rim. The use of the new cooling technology for thermal hardening of railway wheels allows following the stringent requirements to the wheels rim microstructure of various foreign standards for railway wheels production.

Keywords: railway wheels, heat treatment, structure, mechanical properties.

669.14.018.8

## **О влиянии циркония на коррозионную стойкость углеродистой и низколегированной трубных сталей**

**И. Г. Родионова, А. В. Амежнов, С. И. Ябуров,  
А. И. Зайцев, Н. И. Эндель**

*ФГУП “ЦНИИчермет им. И.П. Бардина”, г. Москва. E-mail: amejnov@mail.ru,  
igrodi@mail.ru*

Проведены исследования влияния микролегирования цирконием на коррозионную стойкость углеродистых и низколегированных сталей, используемых для нефтепромысловых трубопроводов. Установлено, что стали, обработанные модификаторами, содержащими кальций, имеют более низкую, а стали, обработанные цирконием более высокую коррозионную стойкость, по сравнению с аналогичными сталями, произведенными без обработки модификаторами. После закалки и отпуска стали имеют более низкую коррозионную стойкость по сравнению с нормализованным состоянием. Коррозионная активность неметаллических включений в современных сталях, модифицированных по различным технологиям, зависит от их химического и фазового составов.

Ключевые слова: коррозионная стойкость, углеродистые стали, низколегированные стали, микролегирование цирконием, раскисление, коррозионно-активные неметаллические включения, нефтепромысловые трубопроводы.

---

Studies have been conducted on the influence of microalloying by zirconium on the corrosion resistance of carbon and low-alloy steels used for oil-field pipelines. It has been found that the steels processed by calcium-containing modifiers have lower, while the steels processed by zirconium have higher corrosion resistance in comparison with the analogous steels produced without processing by modifiers. After quenching and tempering the steels are characterized by lower corrosion resistance in comparison with the normalized state. Corrosion activity of nonmetallic inclusion in the modern steels, which are inoculated according different technologies, depends on theirs chemical and phase compositions.

Keywords: corrosion resistance, carbon steels, low-alloy steels, microalloying by zirconium, deoxidation, corrosion active nonmetallic inclusions, oil-field pipelines.

УДК 669.14.018.29.

## **Влияние отпуска после термомеханической обработки на механические свойства и стойкость против водородного растрескивания листов из трубных сталей**

**А. А. Холодный, Ю. И. Матросов, Я. С. Кузнеченко**

*ФГУП “ЦНИИчермет им. И.П. Бардина”, г. Москва. E-mail: kholodnyi.aa@gmail.com*

Исследовали влияние отпуска при 650 °С на механические свойства и стойкость против водородного растрескивания (НІС) листов из трубных сталей, изготовленных по различным режимам охлаждения после контролируемой прокатки. Установлено, что отпуск повышает сопротивляемость листов против НІС. Оптимальное сочетание механических свойств и стойкости против НІС обеспечивается после обработки листов по технологии контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением и дополнительным отпуском.

Ключевые слова: низколегированная трубная сталь, толстолистовой прокат, контролируемая прокатка, ускоренное охлаждение, прямая закалка, отпуск, механические свойства, водородное растрескивание.

The effect of tempering at 650 °C was investigated on the mechanical properties and resistance to hydrogen-induced cracking (HIC) of pipe steel plates produced using various cooling modes after controlled rolling. The tempering was found to increase the plates resistance to HIC. The optimum combination of mechanical properties and HIC resistance is provided by controlled rolling of plates with accelerated cooling and additional tempering technology.

Keywords: low-alloy pipe steel, rolled plate, controlled rolling, accelerated cooling, direct quenching, tempering, mechanical properties, hydrogen-induced cracking.

УДК 53.098:669.018.5

## Влияние “слабого” магнитного поля на мёссбауэровский спектр сплава 5БДСР

**Р. А. Назипов, Ю. М. Выжимов, Э. А. Арсланов**

*ФГБОУ ВО “Казанский национальный исследовательский технологический университет”,*

*г. Казань. E-mail: rusnazipov@kstu.ru, rusnazipov@mail.ru.*

В статье показано влияние внешнего “слабого” постоянного магнитного поля на мёссбауэровские спектральные параметры магнитомягкого аморфно-нанокристаллического металлического сплава 5БДСР (Finemet-типа). При мёссбауэровских исследованиях сплава в аморфном состоянии с наложением магнитного поля 0,24 Тл на распределении функции плотности вероятности по сверхтонкому полю появляются слабые неразделенные максимумы. Среднее значение сверхтонких полей уменьшается сильнее, чем величина внешнего поля.

Ключевые слова: мёссбауэровская спектроскопия, сверхтонкие взаимодействия, аморфная структура, аморфные сплавы на основе железа.

---

The paper presents the effect of an external weak stationary magnetic field on Mössbauer spectral characteristics of the magnetically soft amorphous-nanocrystalline alloy 5NbCuSiB (Finemet-type). In the course of Mössbauer experiments with the alloy in amorphous state under 0.24 T magnetic field it was found that weak inseparable peaks appeared at the distribution function of the probability density over superfine fields. The average value of the superfine fields decreased more severally than the external field.

Keywords: Mössbauer spectroscopy, hyperfine interactions, amorphous structure, Fe-based amorphous alloys



УДК 669-136

## **Принципы создания сталей для изготовления эффективных высокопрочных изделий методами горячей штамповки**

**А. И. Зайцев<sup>1,2</sup>, А. В. Колдаев<sup>1</sup>, Б. М. Могутнов<sup>1</sup>,  
Н. А. Арутюнян<sup>2</sup>**

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

E-mail: aizaitsev1@yandex.ru

<sup>2</sup> Химический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, г. Москва

На металле лабораторной и промышленной выплавки произведено исследование влияния процессов формирования объемной системы наноразмерных фазовых выделений и дисперсности структуры исходного проката на показатели свойств изделий, получаемых методами горячей штамповки. Установлена целесообразность повышения дисперсности микроструктуры исходного проката до номера 11-12 по ГОСТ 5639-82 для повышения прочностных свойств металла таких изделий. Показано, что путем управления дисперсностью структуры исходного проката и процессом формирования объемной системы наноразмерных фазовых выделений можно достичь принципиального повышения их прочностных и других служебных свойств.

Ключевые слова: сталь, горячая штамповка, аустенит, мартенсит, наноразмерные выделения, дисперсность структуры, прочность, служебные свойства.

---

The metal of laboratory and industrial smelting was used for research of the influence of processes of forming volume system of nanosized precipitated phases and dispersion of structure of starting rolled stocks on characteristics of articles produced by hot die forging. The advisability has been established of raising the microstructure dispersion of starting rolled stocks to the number 11-12 (GOST 5639-820) for increasing strength properties of the metal of this type articles. It has been shown that controlling the structure dispersion of starting rolled stocks and the process of forming volume system of nanosized precipitated phases allows fundamental increasing theirs strength and other working properties

Keywords: steel, hot die forging, austenite, martensite, nanosized precipitates, structure dispersion, strength, working properties.

УДК 621.785.532:669.018.24

## **Исследование структуры и свойств подшипниковых сталей для тел качения, легированных азотом методом газотермобарической обработки**

**Г. С. Белоусов, А. В. Белоусов, М. Е. Гетманова,  
Г. А. Филиппов**

*ФГУП “ЦНИИчермет им. И.П. Бардина”, г. Москва. E-mail: iqs12@yandex.ru.*

Показана возможность получения сверхравновесных концентраций азота в подшипниковых сталях марок 60X13-ШД и 110X18М-ШД способом газотермобарической обработки (ГТБО). Исследованы содержание азота, достигаемого в сталях после различных режимов ГТБО, и их твердость. Проведены структурные исследования металлографическим методом, электронной микроскопией, рентгеноструктурным анализом. Изучено влияние азота на контактную выносливость тел качения подшипников исследуемых сталей.

Ключевые слова: азотирование, сверхравновесная концентрация, твердость, структура, мартенсит, контактная выносливость.

---

The possibility has been shown of obtaining super-equilibrium concentrations of nitrogen in bearing steels of brands 60H13-ShD and 110H18M-ShD by gas-thermobaric processing (GTBP). The nitrogen content attained in the steels after GTBP of various regimes and their hardness were investigated. Metallographic method, electron microscopy, X-ray diffraction analysis were applied for structural studies. Influence of nitrogen was investigated on the contact endurance of rolling bodies of bearings from the studied steels.

Keywords: nitriding, super-equilibrium concentration, hardness, structure, martensite, contact endurance.

## Расчет энергетического порога полиморфного превращения в системе Fe – Cr методом атомистического моделирования

М. Ю. Семенов<sup>1</sup>, В. С. Крапошин<sup>1</sup>, А. Л. Талис<sup>2</sup>,  
А. Ю. Жилияков<sup>3</sup>, И. П. Королев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва. E-mail: [semenov.m.yu@bmstu.ru](mailto:semenov.m.yu@bmstu.ru).

<sup>2</sup> ИНЭОС РАН им. А.Н.Несмеянова, г. Москва. E-mail: [talishome@mail.ru](mailto:talishome@mail.ru).

<sup>3</sup> УРФУ им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург.  
E-mail: [a.y.zhilyakov@urfu.ru](mailto:a.y.zhilyakov@urfu.ru).

В качестве элементарного акта полиморфного превращения рассматривается переброска диагоналей в ромбе, вершины которого заселены атомами железа и/или хрома. Энергетический порог рассчитывался в рамках парного потенциала Морзе. Численные параметры аппроксимирующей потенциал функции калиброваны по экспериментальным значениям энергий сублимации и температурных зависимостей упругих констант железа и хрома. Величина энергетического барьера при 1193 К для чистых железа и хрома оказалась равной соответственно 150 и 195 кДж/моль. При размещении одного атома хрома в вершине острого угла ромба энергетический барьер равен 222 кДж/моль, а в вершине тупого угла ромба 93 кДж/моль. При заселении двумя атомами хрома двух вершин одного ребра энергетический барьер равен 181 кДж/моль. Адекватность расчета подтверждена согласием расчетных значений с экспериментальными.

Ключевые слова: полиморфное превращение, система железо-хром, парный потенциал, энергетический порог, атомистическое моделирование, упругие свойства.

The rhombus diagonals flipping was regarded as an elementary act of polymorphic transformation. Some of rhombus vertexes are occupied by atoms of Fe, some are occupied by atoms of Cr. The energy threshold was calculated using the Morse pair potential. The numeric parameters of the function approximating the potential were calibrated according to the experimental values of sublimation energies and the temperature dependencies of Fe and Cr elastic constants. The value of the energy barrier for pure iron and chromium at 1193 K are equal to 150 and 195 kJ/mol respectively. In the case of occupation of the acute rhombus vertex by chromium atom the energy threshold was equal to 222 kJ/mol. But in the case of occupation the obtuse vertex the threshold was only 93 kJ/mol. If two different vertexes are occupied the threshold is equal to 181 kJ/mol. The calculation adequacy was proved by the agreement between the results of the calculations and experiments.

Keywords: polymorphic transformation, iron-chromium system, pair potential, energy threshold, atomistic modeling, the elastic properties.

УДК 669-419.4.

## **Исследование роли молибдена в системе микролегирования высокопрочных ферритных автолистовых сталей**

**А. И. Зайцев<sup>1,2</sup>, А. В. Колдаев<sup>1</sup>, Б. М. Могутнов<sup>1</sup>,  
Н. А. Арутюнян<sup>1,2</sup>, С. Ф. Дунаев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва. E-mail: aizaitsev1@yandex.ru.

<sup>2</sup> Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва.

Выполнено исследование влияния молибдена на формирование структуры и комплекса свойств новых высокопрочных ферритных автолистовых сталей. Показано, что участие молибдена в системе микролегирования приводит к ускорению зарождения карбидных выделений титана за счет снижения энергии Гиббса поверхности их раздела с металлической матрицей и, напротив, к сдерживанию их роста благодаря замедлению диффузионных процессов. Один из ключевых механизмов получения необходимого комплекса свойств рассматриваемых сталей — формирование объемной, термически стабильной системы наноразмерных карбидных выделений в значительной степени контролируется присутствием Мо в составе металла. Содержание молибдена должно быть ограничено и находиться на оптимальном уровне, поскольку вторым условием достижения необходимого комплекса свойств является формирование однородной мелкодисперсной ферритной структуры.

Ключевые слова: высокопрочные стали, автолистовые стали, феррит, микролегирование, молибден, наноразмерные карбидные выделения, межфазные выделения, однородная дисперсная микроструктура.

---

It was studied how molybdenum influences the structure formation and the complex of properties of new high-strength ferritic autosheet steels. It has been found that the participation of molybdenum in microalloying system leads to accelerating nucleation of titanium carbide precipitates at the expense of a decrease in the Gibbs energy of the carbides-metal interface and, on the contrary, to retarding their growth because of delaying diffusion processes. One of the key mechanisms of obtaining the necessary complex of properties of the steels under consideration lies in forming a bulky, thermally stable system of nanosized precipitates of carbides that is largely controlled by the presence of Mo in the metal. The molybdenum concentration should be restricted and be at an optimum level because the second condition of attaining the necessary complex of properties is formation of homogeneous fine-grained ferritic structure.

Keywords: high-strength steels, autosheet steels, ferrite, microalloying, molybdenum, nanosized carbides precipitates, interphase precipitates, homogeneous fine-grained microstructure.

УДК: 620.162:621.785.5

## **Исследование химического состава зернограничных областей азотированного слоя в низкоуглеродистой стали мартенситного класса**

**Э. А. Елисеев, Г. С. Севальнёв, А. В. Леонов, О. В. Седов**

*ФГУП “Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов”, г. Москва. E-mail: yeliseyeva@viam.ru.*

Исследован химический состав границ зёрен в азотированном слое стали мартенситного класса ВКС-7 (16Х2Н3МФБАЮ-Ш) методом оже-электронной спектроскопии. Обнаружено существенное перераспределение хрома и никеля между границами и объёмом зёрен. Распределение азота по толщине азотированного слоя на границах зёрен связали с распределением никеля. Градиент концентрации никеля объяснили выделением на границах во время азотирования  $\gamma'$ -фазы. Существенного перераспределения других легирующих элементов между границами и объёмом зёрен в азотированном слое не обнаружено.

Ключевые слова: азотирование, высокопрочная сталь, комплексно-легирующая сталь, сталь мартенситного класса, граница зерна, объем зерна,  $\gamma'$ -фаза.

---

Auger electron spectroscopy was applied to study the chemical composition of grain boundaries in the nitrided case of the martensitic steel VKS-7 (16Cr2Ni3MoVNbNAI-Sh). Essential redistribution of chromium and nickel between grains volume and boundaries was revealed. Nitrogen distribution along the thickness of the nitrided case on grain boundary was related to nickel distribution. Concentration gradient of nickel was explained by  $\gamma'$ -phase precipitation on grain boundary in the course of nitriding. Essential redistribution of other alloying elements between grains volume and boundaries in the nitrided case was not detected.

Keywords: nitriding, high-strength steel, complex-alloyed steel, martensitic steel, grain boundary, grain volume,  $\gamma'$ -phase.

УДК 620.193

# **Влияние химического состава неметаллических включений на коррозионную стойкость углеродистых и низколегированных сталей в водных средах, характерных для условий эксплуатации нефтепромысловых трубопроводов**

**А. В. Амежнов, И. Г. Родионова, А. И. Зайцев, Б. М. Могутнов, О. Н. Бакланова**

*ФГУП “ЦНИИчермет им. И.П. Бардина”, г. Москва. E-mail: amejnov@mail.ru*

Представлены результаты исследования влияния химического состава комплексных неметаллических включений (комплексных НВ) на коррозионную стойкость углеродистых и низколегированных сталей в нейтральных водных средах, характерных для условий эксплуатации нефтепромысловых трубопроводов. Коррозионная активность НВ зависит от их химического состава, оптимизацией которого можно предупредить их отрицательное влияние на коррозионную стойкость. Помимо содержания кальция в оксидной составляющей включений на основе алюмомагниевого шпинели, способствующего переводу включения в глобулярную форму, к снижению коррозионной активности таких комплексных НВ приводит повышенная концентрация оксида магния в их оксидной составляющей. К повышению коррозионной активности комплексных НВ приводит большое количество корунда в оксидной составляющей включения. В качестве одного из критериев коррозионной активности комплексных НВ в современных сталях может служить отношение среднего содержания алюминия к среднему содержанию магния в оксидной составляющей включения  $[Al]/[Mg]$ . При значении указанного отношения менее 1,0 неметаллические включения не проявляют коррозионной активности, что позволяет обеспечить высокую коррозионную стойкость сталей для нефтепромысловых трубопроводов.

Ключевые слова: коррозионная стойкость, нейтральные водные среды, нефтепромысловые трубопроводы, комплексные неметаллические включения, электрохимическая методика.

The paper presents the results of research into the effect of the chemical composition of complex non-metallic inclusions (CNI) on the corrosion resistance of carbon and low-alloy steels in neutral aqueous media typical for service conditions of oil-field pipelines. The corrosion activity of CNI depends on their chemical composition, optimization of which can prevent their negative impact on corrosion resistance. In addition to calcium content in the oxide constituent of inclusions based on aluminomagnesium spinel, which favours inclusions transformation into the globular form, an increased concentration of magnesium oxide in the oxide constituent leads to a decrease in the corrosion activity of this type CNI. A large proportion of corundum in the inclusions oxide constituent results in increasing the CNI corrosion activity. The ratio of the average content of aluminum to the average content of magnesium,  $[Al]/[Mg]$ , in the oxide constituent of inclusions can serve as one of the criteria for the corrosion activity of CNI in modern steels. If the specified ratio is less than 1.0, the non-metallic inclusions do not exhibit corrosion activity, which allows providing high corrosion resistance of steels for oil-field pipelines.

Keywords: corrosion resistance, neutral aqueous media, oil-field pipelines, complex non-metallic inclusions, electrochemical technique.

УДК 620.193

## **Разработка методики исследования коррозионной стойкости многослойных металлических материалов с внутренним протектором для повышения долговечности и надёжности металлоёмких конструкций**

**Н. Н. Рацук<sup>1</sup>, И. А. Сафонов<sup>1,2</sup>, Е. Ф. Лежнева<sup>3</sup>,  
И. Л. Харина<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”, г. Москва. E-mail: ratsuk.n@gmail.com.*

<sup>2</sup> *АО Научно-производственное объединение “Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения”, г. Москва. E-mail: IASafonov@cniitmash.com*

<sup>3</sup> *ФГБОУ ВО “Пензенский Государственный Университет”, г. Пенза.*

Статья посвящена опыту разработки методики исследования коррозионных свойств многослойного металлического материала с внутренним протектором (МВП). В результате проведённых исследований выявлены особенности коррозионного процесса МВП, которые не позволяют проводить эксперименты в строгом соответствии с ГОСТ 9.912-89. Предложена новая методика испытаний МВП, учитывая недостатки традиционного подхода.

Ключевые слова: многослойный металлический материал, внутренний протектор, коррозия, питтинговая коррозия

---

The paper is devoted to the experience of developing a technique for research of corrosion properties of a multilayer metallic material with an inner protector (MIP). The performed studies have resulted in revealing special features of corrodibility of MIP, which do not allow conducting experiments in rigorous compliance with GOST 9.912-89. A new technique of testing MIP has been proposed that takes into account the drawbacks of the traditional approach.

Keywords: multilayer metallic material, inner protector, corrosion, pitting corrosion.

УДК 669.018.582

## **Определение химического состава металлических постоянных магнитов, содержащих редкоземельные металлы, обеспечивающего оптимальные магнитные свойства**

**С. С. Шумкин<sup>1</sup>, М. Ю. Семёнов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> АО “Спецмагнит”, г. Москва. E-mail: [shoomkin@s-magnet.ru](mailto:shoomkin@s-magnet.ru).

<sup>2</sup> ФГБОУВО “МГТУ им. Н.Э. Баумана”, г. Москва. E-mail: [semenov.m.yu@bmstu.ru](mailto:semenov.m.yu@bmstu.ru).

Проведен статистический анализ свойств сплавов системы Sm – Co – Cu – Fe – Zr. Установлено, что при текущих условиях обработки 80 % постоянных магнитов соответствуют предъявляемым требованиям ( $26 \text{ МГсЭ} \leq (BH)_{\text{max}} \leq 28 \text{ МГсЭ}$ ). Получены оптимальные соотношения основных легирующих элементов. Предложена упрощенная параметрическая формула пересчета атомных и массовых концентраций легирующих элементов в системе Sm – Co – Cu – Fe – Zr.

Ключевые слова: постоянные магниты, система Sm – Co – Cu – Fe – Zr, магнитные свойства, статистические методы.

---

The statistic analysis of magnetic alloys of the Sm – Co – Cu – Fe – Zr system was carried out. It was established that 80 pct of permanent magnets after current conditions of processing were consistent with the specified requirements ( $26 \text{ MGOe} \leq (BH)_{\text{max}} \leq 28 \text{ MGOe}$ ). The optimum relations of main alloying elements were found. A simplified parametric formula was suggested for recalculation of atomic and mass concentration of alloying elements in the Sm – Co – Cu – Fe – Zr system.

Keywords: permanent magnets, Sm – Co – Cu – Fe – Zr system, magnetic properties, statistic methods.



УДК 669.715:621.78

## **Методика и оборудование для исследования кинетики фазовых превращений аустенита**

**И. И. Франтов, И. Ю. Уткин, А. С. Кириченко**

*ФГУП “ЦНИИчермет им. И.П.Бардина”, г. Москва. E-mail: IFrantov@mail.ru,  
iutkin89@ya.ru*

Описана методика интерпретации дилатационных кривых в терминах различных превращений аустенита при разных скоростях охлаждения. Построены термокинетическая и структурная диаграммы для металла околошовной зоны сварного соединения из стали 06ГБ. Определены диапазоны скоростей охлаждения, в которых происходит образование различных микроструктур.

Ключевые слова: аустенит, фазовые превращения, кинетика, структура, термокинетическая диаграмма, микротвердость.

The paper presents methods of interpretation of dilatometric curves in terms of various transformations of austenite in the course of cooling with different rates. Thermokinetic and structural diagrams were constructed for the metal in neighbourhood of welded joint of the 06MnNb steel. Cooling velocity ranges were determined where various microstructures were formed.

Keywords: austenite, phase transformations, kinetics, structure, thermokinetic diagram, microhardness.

# Правила оформления статей в журнал “Проблемы черной металлургии и материаловедения”

Редколлегия журнала принимает в печать оригинальные научные статьи и обзоры фундаментального и прикладного характера по всем проблемам, имеющим отношение к черной металлургии, свойствам стали и сплавов. Публикуются также дискуссионные статьи, рецензии на изданные книги, информация о научных конференциях. Все публикации производятся бесплатно.

Статьи представляются в редакцию в печатном и электронном вариантах, оформленные по следующим правилам.

1. Индекс УДК, название статьи, ФИО авторов, место работы авторов, почтовый индекс и адрес, адрес электронной почты.
2. Электронный вариант представляется в формате MSWord с рисунками в виде отдельных файлов типа TIFF, EPS или JPEG (разрешение не менее 300 точек на дюйм). Принимаются также графики, построенные в COREL, EXCEL, ORIGIN. В случае большого объема файла допускается использование общеизвестных архиваторов.
3. Тексту статьи должны предшествовать аннотация размером не более 100 слов и перечень ключевых слов.
4. Таблицы и подписи к рисункам располагаются в конце текста.
5. В материалах должны преимущественно использоваться физические единицы и обозначения, принятые в Международной системе единиц СИ.
6. Статьи, содержащие результаты исследований, проведенных в учреждении, должны обязательно иметь направление и разрешение этого учреждения.
7. Список цитируемой литературы оформляется следующим образом:

Фамилии и инициалы авторов. Название статьи. // Наименование журнала. Год. Том. №. страницы. Если ссылка делается на книгу, то указывается количество страниц. Примеры

- ◆ Иванов А.А., Сидоров П.П. и Петров Ж.Д. Механические свойства сплавов. //ФММ. 2002. Т. 77. № 7. С. 1970 – 1975.
- ◆ Hillert M. The Nature of Bainite. // ISIJ International. 1995. V. 35. No. 9. P. 1134 – 1140.
- ◆ Хиллерт М. Параравновесие и другие ограниченные равновесия. / В кн.: Диаграммы фаз в сплавах. М.: Мир.1986. С. 151 – 168.
- ◆ Иванов А.А. Закономерности аморфизации никелевых сплавов. / В кн.: VI Нац. конф. по аморфным сплавам. Тез. докл. М.: Металлургия. 1998. С.145.
- ◆ Счастливцев В.М., Мирзаев Д.А., Яковлева И.Л. Структура термически обработанной стали. М.: Металлургия, 1994, 288 с.

8. Печатный вариант подписывается всеми авторами. Кроме того, авторский коллектив должен указать лицо, с которым редакция будет вести переговоры и переписку.

9. Для ознакомления с подготовленной к публикации статьей авторам по электронной почте высылается корректура. Сведения об опечатках в течение 3-х дней должны быть переданы в редакцию. Все исправления в корректуре должны быть четкими и ясными.

Авторам статьи высылается 1 экземпляр журнала.