

ПРОБЛЕМЫ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

СОДЕРЖАНИЕ

2 • 2021

Теоретические основы металлургии

А. М. Глезер

Структурно-физические причины наблюдения процессов нанокристаллизации аморфных металлических сплавов в процессе мегапластической деформации5

Сырьевая база черной металлургии

Д. И. Алексеев, А. Н. Смирнов

Выбор независимых параметров для оценки окисленности углей при прогнозировании качества кокса по показателям M_{25} и M_{10} 14

Технологические процессы металлургии

М. Е. Гетманова, О. В. Ливанова, Н. О. Ливанова, А. Н. Никулин, Г. А. Филиппов

Аналитическое моделирование деформационных условийковки круглой заготовки на радиально-ковочной машине РКМ 5519

Е. М. Засельский, Н. Т. Тихонцева, И. П. Савченко, О. А. Софрыгина

Разработка и освоение материалов в производстве высокопрочных бурильных труб со специальными свойствами37

Д. В. Зиновеев, В. Г. Дюбанов

Современное состояние и пути переработки доменных шлаков: краткий обзор41

Переработка техногенного сырья

У. А. Кологриева, А. И. Волков, П. Е. Стулов, Д. Л. Вайнштейн

Современные методы оценки эффективности окислительного обжига ванадийсодержащих шламов49

Материаловедение и новые материалы

Г. С. Белоусов

Свойства железомарганцевого аустенита, легированного азотом до сверхравновесных концентраций56

А. И. Зайцев, И. Г. Родионова, А. В. Колдаев, Н. А. Арутюнян, Н. А. Карамышева

Исследование влияния параметров состава и температурно-деформационной обработки на структуру и свойства проката IF сталей60

Д. Н. Пермьякова

Зависимость водородного коррозионного растрескивания трубных сталей в сероводородсодержащей среде от содержания легирующих элементов: ключевые особенности69

Э. А. Елисеев, Г. С. Севальнёв, А. В. Дорошенко, К. В. Дульнев

Исследование химического состава границ зёрен в азотированном слое стали мартенситного класса ВКС-7, обработанной методом поверхностной пластической деформации перед азотированием74

Наноматериалы и нанотехнологии

Р. В. Кузнецов, В. Е. Громов, Е. В. Полевой, Ю. А. Рубанникова, В. Е. Кормышев

Эволюция структурно-фазовых состояний и свойств дифференцированно закаленных 100-метровых рельсов при экстремально длительной эксплуатации. Сообщение 3. Структура и свойства рельсов после пропущенного тоннажа 1,77 млрд тонн81

PROBLEMS OF FERROUS METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

CONTENTS

2 • 2021

Fundamentals of metallurgy

A. M. Glezer

Structural-physical reasons for observing the processes of nanocrystallization of amorphous metal alloys in the severe plastic deformation process5

Raw materials for ferrous metallurgy

D. I. Alekseev, A. N. Smirnov

A characteristic of the coal oxidation by independent parameters in predicting the coke quality by M25 and M1014

Production processes in metallurgy

M. E. Getmanova, O. V. Livanova, N. O. Livanova, A. N. Nikulin, G. A. Filippov

Analytical modeling of deformation conditions for forging a circular billet on a radial forging machine RKM 5519

E. M. Zaselskiy, N. T. Tikhontseva, I. P. Savchenko, O. A. Sofrygina

Development and implementation of materials in the production of high-strength drill pipes with special properties37

D. Zinoveev, V. Dyubanov

State of the art and prospect for recycling of blast furnace slag — a short review.....41

Recycling of technogenic raw materials

U. A. Kologrieva, A. I. Volkov, P. E. Stulov, D. L. Weinstein

Modern methods for evaluating the efficiency of oxidation roasting of vanadium-containing sludge49

Materials science and new materials

G. S. Belousov

Properties of ferromanganese austenite doped with nitrogen to superequilibrium concentrations56

A. I. Zaitsev, I. G. Rodionova, A. V. Koldaev, N. A. Arutyunyan, N. A. Karamysheva

Influence of the composition and temperature-deformation treatment parameters on the structure and properties of rolled IF steels60

D. N. Permyakova

Dependence of hydrogen corrosion cracking of pipe steels in a hydrogen sulfide-containing medium on the content of alloying elements: key features69

E. A. Eliseev, G. S. Seval'nev, A. V. Doroshenko, K. V. Dul'nev

Investigation of the chemical composition of grain boundaries in a nitrided layer of martensitic steel of the VKS-7 treated by surface plastic deformation before nitriding74

Nanomaterials and nanotechnologies

R. V. Kuznetsov, V. E. Gromov, E. V. Polevoy, Yu. A. Rubannikova, V. E. Kormyshev

Evolution of structural-phase states and properties of differentially hardened 100-meter rails during extremely long-term operation. message 3. Structure and properties of rails after the transported tonnage of 1.77 billion tons.....81

ПРОБЛЕМЫ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

Главный редактор:

Семенов В.В., к.э.н.

Заместители главного редактора:

Леонтьев Л.И., академик РАН

Глезер А.М., д.ф.-м.н.

Могутнов Б.М., д.х.н.

Члены редколлегии:

Алымов М.И., член-корр. РАН

Бабул Т., профессор (Польша)

Бродов А.А., к.э.н.

Григорович К.В., академик РАН

Денисов С.Н., д.э.н.

Дуб А.В., д.т.н.

Еремин Г.Н., к.т.н.

Зайцев А.И., д.ф.-м.н.

Иевлев В.М., академик РАН

Комлев В.С., член-корр. РАН

Куклев А.В., д.т.н.

Левашов Е.А., д.т.н.

Морозов Ю.Д., к.т.н.

Москвина Т.П., к.т.н.

Никулин А.Н., д.т.н.

Оспенникова О.Г., д.т.н.

Орыщенко А.С., член-корр. РАН

Петрова Л.Г., д.т.н.

Рубаник В.В., член-корр. НАНБ (Беларусь)

Рудской А.И., академик РАН

Родионова И.Г., д.т.н.

Скачков О.А.

Смирнов Л.А., академик РАН

Сомерс М.А.Дж., профессор (Дания)

Филиппов Г.А., д.т.н.

Филонов М.Р., д.т.н.

Флюге В., профессор (Германия)

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

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.chermet.net

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.

58999 Подписной индекс в объединенном каталоге “Пресса России”

Зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций свидетельство ПИ № ФС77-60022

© ЦНИИчермет им. И.П. Бардина 2021

УДК 669.018.242.70

Структурно-физические причины наблюдения процессов нанокристаллизации аморфных металлических сплавов в процессе мегапластической деформации

А. М. Глезер^{1,2}

¹ *Тольяттинский Государственный Университет, г. Тольятти;*

² *Национальный Исследовательский Технологический Университет “МИСиС”, г. Москва.*

Теоретически показано, что нанокристаллизация при формировании полос сдвига в процессе мегапластической деформации аморфных металлических сплавов обусловлена существенным повышением температуры внутри полос, которое, в свою очередь, связано с диссипацией накопленной энергии мегапластической деформации. Рост температуры зависит от величины деформации, скорости распространения полосы сдвига и физических параметров, определяющих тепловые характеристики аморфной матрицы в области полосы сдвига.

Ключевые слова: аморфный сплав, мегапластическая деформация, полоса сдвига, локальное тепловыделение, диссипация упругой энергии, нанокристаллизация.

It has been shown theoretically that the nanocrystallization process during slip bands action at severe plastic deformation of amorphous metallic alloys is due to the remarkable temperature rise inside bands which in turn is connected with the dissipation of storage energy of severe plastic deformation. The temperature rise depends on deformation value, on rate of slip band propagation and on physical parameters which correspond to the heat characteristics of amorphous matrix in the area of slip bands.

Keywords: amorphous alloy, megaplastic deformation, shear band, local heat release, dissipation of elastic energy, nanocrystallization.

УДК 662.74.012:658.562

Выбор независимых параметров для оценки окисленности углей при прогнозировании качества кокса по показателям M_{25} и M_{10}

Д. И. Алексеев¹, А. Н. Смирнов²

¹ *Новотроицкий филиал московского государственного института стали и сплавов
462359, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8,
E-mail: alekseev41047@mail.ru*

² *Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
455036 г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38. Россия, E-mail: sman@magtu.ru*

В статье проанализированы модели структурного типа для прогнозирования показателей качества кокса M_{25} и M_{10} , имеющие в качестве независимой переменной показатель степени окисленности. Показана неоднозначность аналитического вида параметра — показателя степени окисленности угля Π_o . Установлено, что показатель отражения витринита R_o малоинформативен при оценке степени окисленности.

Ключевые слова: кокс, показатели качества кокса, математическая модель, классификация по внутренней структуре и алгоритму построения, структурная модель.

The article analyzes structural models for predicting the quality indicators of M_{25} and M_{10} coke, which have an independent indicator of the degree of oxidation. Shown the ambiguity of the analytical form of the indicator — the indicator of the degree of oxidation Π_o . It is shown that the vitrinite reflection index R_o is not very informative in assessing the degree of oxidation.

Keywords: coke, coke quality indicators, mathematical model, classification by internal structure and construction algorithm, structural model.

УДК 621.771.65:534.1

Аналитическое моделирование деформационных условий ковки круглой заготовки на радиально-ковочной машине РКМ 55

**М. Е. Гетманова, О. В. Ливанова, Н. О. Ливанова,
А. Н. Никулин, Г. А. Филиппов**

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

С привлечением теории колебаний осуществлено аналитическое моделирование процессов ковки заготовок на РКМ. Рассмотрены механизм формирования в заготовке при поперечной ковке (осадке) структурно-деформационных элементов с формированием пластичных и жестких зон, их участие и роль в процессе деформации. При наличии пластичных и жестких зон в заготовке определено развитие в ней при деформации упругих и диссипативных сил в виде отношения ε'/ω , которое было использовано в качестве оценочного критерия при аналитическом исследовании влияния технологических факторов и режимов деформации на напряженное состояние металла и развитие осевого разрушения заготовки при ковке на РКМ. Использование теории колебаний для моделирования и анализа процессов ковки на РКМ позволило получить новые научные представления о технологическом процессе.

Ключевые слова: РКМ, деформация, заготовка, поперечная ковка, винтовая прокатка, колебания, напряжения, масштабный фактор, очаг деформации, осевое разрушение.

With the involvement of the theory of vibrations, analytical modeling of the processes of forging of blanks on a radial forging machine has been carried out. The mechanism of formation of structural-deformation elements in the workpiece during transverse forging (upsetting) with the formation of plastic and rigid zones, their participation and role in the deformation process are considered. In the presence of plastic and rigid zones in the workpiece, the development of elastic and dissipative forces in it during deformation was determined in the form of a ratio ε'/ω , which was used as an evaluation criterion in the analytical study of the influence of technological factors and deformation modes on the stress state of the metal and the development of axial fracture of the workpiece during forging on radial forging machine. The use of vibration theory for modeling and analysis of forging processes on a radial forging machine has provided new scientific concepts of the technological process.

Keywords: radial forging machine, deformation, billet, transverse forging, helical rolling, vibrations, stresses, scale factor, deformation zone, axial fracture.

УДК 669.15-194.2

Разработка и освоение материалов в производстве высокопрочных бурильных труб со специальными свойствами

**Е. М. Засельский¹, Н. Т. Тихонцева¹,
И. П. Савченко¹, О. А. Софрыгина^{1, 2}**

¹ АО «Синарский трубный завод», г. Каменск-Уральский,

² Политехнический институт (филиал) УрФУ, г. Каменск-Уральский, E-mail:
SofryginaOA@sintz.ru

Представлен опыт освоения производства высокопрочных бурильных труб с обеспечением показателей хладостойкости и коррозионной стойкости в средах, содержащих сероводород. Сформулированы общие рекомендации по выбору химического состава стали и технологическим особенностям проведения закалки с отпуском бурильных труб. По результатам проведенных исследований, микролегирование бором хромомарганцевой стали серийно внедрено в производство толстостенных бурильных труб, при этом оптимизирован применяемый уровень легирования молибденом в диапазоне 0,15 – 0,65 масс. % в зависимости от требуемого комплекса прочностных и специальных свойств труб.

Ключевые слова: конструкционная хромомарганцевая сталь, микролегирование, бурильная труба, улучшение, прокаливаемость, хладостойкость, сероводородостойкость.

The article presents the experience of implementation of high-strength drill pipes assuring the performance of cold resistance and corrosion resistance in H₂S environment. General recommendations to choose chemical composition of steel and technological specifics of quenching with tempering of drill pipes are established. According to the results of the research studies, microalloying the chromium-manganese steel with boron was serially implemented into production of heavy wall drill pipes, at that, the used level of alloying with molybdenum was optimized within the range of 0.15 – 0.65 % wt. depending on the required strength and special properties of pipes.

Keywords: structural chromium-manganese steel, microalloying, drill pipe, improvement, hardenability, cold resistance, H₂S resistance

УДК 669.531.5

Современное состояние и пути переработки доменных шлаков: краткий обзор

Д. В. Зиновеев, В. Г. Дюбанов

*ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
E-mail: dzinoveev@imet.ac.ru*

Доменные шлаки являются одними из самых крупномасштабных отходов черной металлургии. В мире ежегодно образуются около 0,67 – 0,7 млрд т доменных шлаков. При этом основное их количество утилизируется в строительном секторе экономики, в частности в дорожном строительстве и производстве вяжущих веществ. В настоящее время разработаны способы позволяющие получать из доменных шлаков материалы с высокой добавленной стоимостью такие как: шлакоситаллы, шлакощелочные вяжущие, цеолиты, пропанты, наночастицы кремния. Повышение глубины переработки доменных шлаков позволит металлургическим предприятиям не только снизить нагрузку на окружающую среду, но и получить дополнительные доходы.

Ключевые слова: доменный шлак, грануляция, рециклинг, утилизация, шлакощелочный цемент, шлакоситалл, карбонизация, цеолит.

Blast furnace slag is one of the largest-scale wastes of the ferrous metallurgy. About 0,67-0,7 billion tons of blast furnace slags are produced annually in the world. The most common methods of its utilization are use in the construction industry, particularly in the road construction and the production of binders. Currently, methods have been developed for obtaining high-value-added materials from blast-furnace slags, such as glass-ceramics, slag-alkali binders, zeolites, proppants and silicon nanoparticles. The increase of recycling degree of blast furnace slag by metallurgical plants can contribute to decreasing of environmental pollution and getting additional profits.

Keywords: blast furnace slag, granulation, recycling, utilization, slag-alkali cement, glass-ceramics, carbonization, zeolite.

УДК 661.888.1

Современные методы оценки эффективности окислительного обжига ванадийсодержащих шламов

**У. А. Кологриева, А. И. Волков, П. Е. Стулов,
Д. Л. Вайнштейн**

*ФГУП “ЦНИИчермет им. И. П. Бардина”, г. Москва,
E-mail: ufowka@mail.ru, rhenium@list.ru, pavel1411@rambler.ru, d_wainstein@sprg.ru*

Для наиболее полного извлечения ванадия из отходов гидрометаллургического производства пентаоксида ванадия необходимо проведение окислительного обжига. В работе рассмотрен комплекс современных методов исследований для оценки эффективности окислительного обжига ванадийсодержащих шламов: метод окислительно-восстановительного титрования; рентгенофазового анализа; рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.

Ключевые слова: ванадий, отходы, пентаоксид ванадия, шпинель, обжиг, гидрометаллургия, шламы, выщелачивание.

For the most complete extraction of vanadium from the waste of hydrometallurgical production of vanadium pentoxide, it is necessary to conduct oxidation roasting. The paper considers a set of modern research methods for evaluating the efficiency of oxidative roasting of vanadium-containing sludge: the method of redox titration; X-ray phase analysis; X-ray photoelectron spectroscopy.

Keywords: vanadium, waste, vanadium pentoxide, spinel, roasting, hydrometallurgy, sludge, leaching.

УДК 621.785.532

Свойства железомарганцевого аустенита, легированного азотом до сверхравновесных концентраций

Г. С. Белоусов

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

Проведено исследование структуры и механических свойств железомарганцевых аустенитных сплавов, содержащих от 0,38 до 2,3 масс. % азота. Установлено, что при содержании азота свыше 0,5 % структура сплавов при всех режимах механических испытаний сохраняется аустенитной. Сплавы с 0,9 – 1,1 % азота характеризуются оптимальным сочетанием механических свойств. Аномально высокое деформационное упрочнение железомарганцевого аустенита можно связать с образованием кластеров, обогащенных марганцем и азотом.

Ключевые слова: аустенит, сверхравновесные концентрации, дислокации, деформационное упрочнение, междислокационное взаимодействие, генерация дислокаций, предел текучести.

The study of the structure and mechanical properties of ferromanganese austenitic alloys containing from 0.38 to 2.3 wt. % nitrogen. It was found that at a nitrogen content of more than 0.5 %, the structure of the alloys remains austenitic under all mechanical test conditions. Alloys with 0.9 – 1.1 % nitrogen are characterized by an optimal combination of mechanical properties. The abnormally high strain hardening of ferromanganese austenite can be attributed to the formation of clusters enriched in manganese and nitrogen.

Keywords: austenite, superequilibrium concentrations, dislocations, strain hardening, inter-dislocation interaction, dislocation generation, yield strength.

УДК 621.771.23.01: 669.1.017

Исследование влияния параметров состава и температурно-деформационной обработки на структуру и свойства проката IF сталей

А. И. Зайцев^{1,2}, И. Г. Родионова¹, А. В. Колдаев¹,
Н. А. Арутюнян², Н. А. Карамышева¹

¹ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина». Россия, г. Москва,
E-mail: aizaitsev1@yandex.ru, igrodi@mail.ru, koldaevanton@gmail.com

² Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. Россия, г. Москва,
E-mail: naarutyunyan@gmail.com

На металле 2-х лабораторных плавок IF сталей с содержанием углерода 0,004 и 0,006 масс.% с использованием современных термодинамических методов прогнозирования условий стабильности фазовых выделений, определения их характеристик методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, локального рентгено-спектрального анализа, испытания механических характеристик, определения содержания элементов внедрения в твердом растворе, выполнено детальное исследование структурного состояния и свойств горячекатаного и холоднокатаного проката отожженного по режиму АНГЦ. Установлены закономерности формирования структурного состояния и свойств горячекатаного и холоднокатаного проката. Показано что производство высококачественного холоднокатаного и оцинкованного проката из IF сталей с принципиально улучшенными показателями пластичности, штампуемости может быть обеспечено при относительно высоком содержании углерода 0,006 масс. %, при условии придания ему благоприятной формы существования в виде выделений $Ti_4C_2S_2$.

Ключевые слова: сверхнизкоуглеродистые IF стали, горячекатаный прокат, холоднокатаный прокат, рекристаллизационный отжиг по режиму АНГЦ, фазовые выделения, микроструктура, элементы внедрения, состояние твердого раствора, пластичность, штампуемость.

Detailed investigation of the structural state and properties of hot-rolled and annealed cold-rolled IF steels was carried out. Annealing was performed according to the mode of continuous hot-dip galvanizing units (CHGU). The study of two laboratory-smelted steels with a carbon content of 0.004 and 0.006 wt. % included thermodynamic prediction of the stability conditions of phase precipitates, determination of their characteristics by scanning and transmission electron microscopy, and local X-ray spectral analysis, tests of mechanical characteristics, detection of the content of interstitial elements in a solid solution. The regularities of the formation of the structural state and properties of hot-rolled and cold-rolled steel have been established. It has been shown that the production of high quality cold-rolled and galvanized rolled IF steels with fundamentally improved plasticity and stamping characteristics can be ensured at a relatively high carbon content of 0.006 mass. % under conditions, which provide the favorable variant of carbon existence in the form of $Ti_4C_2S_2$ precipitates.

Keywords: ultra-low-carbon IF steels, hot-rolled steel, cold-rolled steel, recrystallization annealing according to the CHGU mode, phase precipitates, microstructure, interstitial elements, state of solid solution, plasticity, stampability.

УДК 669.14.018.41

Зависимость водородного коррозионного растрескивания трубных сталей в сероводородсодержащей среде от содержания легирующих элементов: ключевые особенности

Д. Н. Пермякова

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

Установлены зависимости водородного коррозионного растрескивания трубных сталей в сероводородсодержащей среде от содержания легирующих элементов. На основе анализа современных научных данных было определено действие легирующих элементов на центральную сегрегационную неоднородность и стойкость против растрескивания трубных сталей. Были сделаны выводы об актуальности исследований для научного сообщества.

Ключевые слова: химический состав, водородное растрескивание, сульфидное растрескивание, трубная сталь, легирование, сероводородсодержащая среда, центральная сегрегационная неоднородность.

The dependences of the hydrogen corrosion cracking of pipe steels in a hydrogen sulfide-containing medium on the content of alloying elements are established. Based on the analysis of modern scientific data, the effect of alloying elements on the central segregation heterogeneity and resistance to cracking of pipe steels was determined. Conclusions were drawn about the relevance of the research for the scientific community.

Keywords: chemical composition, hydrogen cracking, sulfide cracking, pipe steel, alloying, hydrogen sulfide-containing medium, central segregation heterogeneity.

УДК 621.785.532

Исследование химического состава границ зёрен в азотированном слое стали мартенситного класса ВКС-7, обработанной методом поверхностной пластической деформации перед азотированием

Э. А. Елисеев, Г. С. Севальнёв, А. В. Дорошенко, К. В. Дульнев

Федеральное унитарное государственное предприятие “Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов” (“ФГУП ВИАМ”), г. Москва, ул. Радио, д. 17, 105005, E-mail: yeliseyeva@viam.ru.

В рамках работы исследован химический состав границ зёрен азотированного слоя образцов из низкоуглеродистой стали мартенситного класса ВКС-7 после предварительной термической обработки, поверхностной пластической деформации и низкотемпературного азотирования. Установлено, что на границах зёрен в азотированном слое происходит существенное перераспределение химических элементов. Содержание никеля на границах зёрен существенно превышает среднее содержание никеля в стали, содержание хрома значительно падает, а в приповерхностных областях приближается к нулю. Содержание азота на границах уменьшается по сравнению с недеформированным состоянием.

Ключевые слова: Азотирование, азотированный слой, нитридная сетка, диффузионная граница зерна, поверхностная пластическая деформация, электронная Оже-спектроскопия.

The chemical composition of grain boundaries of the nitrided layer of samples made of low-carbon steel of the VKS-7 martensitic class after preliminary heat treatment, surface plastic deformation and low-temperature nitriding was studied. It was established that a significant redistribution of chemical elements occurs at the grain boundaries in the nitrided layer. The Nickel content at the grain boundaries significantly exceeds the average Nickel content in steel, the chromium content decreases significantly, and in the near-surface areas it approaches zero. The nitrogen content at the boundaries decreases in comparison with the undeformed state.

Keywords: Nitriding, nitrided layer, nitride mesh, grain diffusion boundary, surface plastic deformation, electronic Auger spectroscopy.

УДК 669.539.382:669.17:625.1

Эволюция структурно-фазовых состояний и свойств дифференцированно закаленных 100-метровых рельсов при экстремально длительной эксплуатации. Сообщение 3. Структура и свойства рельсов после пропущенного тоннажа 1,77 млрд тонн
Р. В. Кузнецов¹, В. Е. Громов¹, Е. В. Полевой², Ю. А. Рубанникова¹, В. Е. Кормышев¹

¹Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

²АО "Евраз-Западно-Сибирский металлургический комбинат", г. Новокузнецк

Экстремально длительная эксплуатация длинномерных дифференцированно закаленных рельсов категории ДТ350 после пропущенного тоннажа 1,77 млрд. тонн сопровождается значительными преобразованиями структурно-фазового состояния и свойств рельсов. Определены количественные значения механических свойств, твердости, микротвердости, параметров макро- и микроструктуры, дефектной субструктуры по сечению и на поверхности катания головки рельсов. Проведено сравнение с результатами исследований параметров и свойств этой же партии рельсов после пропущенного тоннажа 0,69 и 1,41 млрд тонн.

Ключевые слова: длительная эксплуатация, рельсы, макро- и микроструктура, механические свойства.

The extreme long-term operation of lengthy differentially quenched rails of DT350 category after passed tonnage 1.77 billion tons is accompanied by the significant transformations of rail structure phase state and properties. The quantitative values of mechanical properties, hardness, microhardness, macro- and microstructure, defect substructure by cross section and on the rail rolling surface are detected. The comparison with the study results of parameters and properties of the same bath of rail after passed tonnage 0.69 and 1.41 billion tons is completed.

Keywords: extreme long-term operation, rails, macro- and microstructure, mechanical properties.