

ПРОБЛЕМЫ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

СОДЕРЖАНИЕ

1 • 2019

Теоретические основы металлургии

С. М. Карпов, А. Г. Колесников, А. Н. Никулин

Связь механических свойств металла с деформационными условиями прошивки заготовок в гильзы на прошивном стане винтовой прокатки5

**А. И. Зайцев, А. В. Колдаев, С. И. Андросова,
А. Б. Степанов, Б. М. Могутнов, И. А. Краснянская**

Исследование процессов взаимодействия металла со шлаком для повышения качества и чистоты по неметаллическим включениям сверхнизкоуглеродистых IF, IF-HS автолистовых сталей.....21

Технологические процессы металлургии

В. Л. Калюжный, Л. И. Алиева, А. Н. Потятыник

Расчетно-экспериментальное исследование холодного прямого выдавливания по схеме "заготовка за заготовкой"29

Материаловедение и новые материалы

**В. П. Филиппова, О. П. Жуков, С. Ю. Макушев, И. Л. Тяжелникова,
К. В. Неумоин, С. В. Басов, С. Г. Головачёв**

Влияние точечных дефектов на период кристаллической решетки α -Fe и твердых растворов на его основе.....35

Л. А. Баева, М. Е. Гетманова, В. Н. Зикеев, А. Н. Никулин, В. А. Углов, Г. А. Филиппов

Механические свойства и параметры сопротивления разрушению железнодорожных литых колес класса "В"45

А. В. Амежнов, И. Г. Родионова, А. И. Зайцев, Е. И. Заркова, М. Е. Марзоева

Закономерности влияния характеристик неметаллических включений, фазовых выделений на коррозионную стойкость низкоуглеродистых и сверхнизкоуглеродистых сталей58

А. В. Камынин, В. П. Менушенков, Е. С. Хотулёв, А. А. Эверстов

Исследование фазового состава, структуры и магнитных свойств высококоэрцитивных сплавов на основе системы Sm_2Fe_{17} в зависимости от технологии их изготовления70

**И. Г. Родионова, Н. А. Карамышева, А. А. Павлов, А. С. Мельниченко,
В. Е. Телегин, С. Г. Андреев, А. В. Мастяев**

Исследование влияния химического состава и технологических параметров на свойства холоднокатаного проката низколегированной стали (типа HSLA) после непрерывного отжига при использовании методов статистического анализа79

Наноматериалы и нанотехнологии

А. М. Глезер, В. Л. Столяров, Н. А. Шурьгина, Т. В. Рассадина

Инженерия границ зерен как способ получения сверхпрочных нанокристаллов92

Информация

Н. В. Колясникова

Конференция "Современное состояние материаловедения (к 110-летию со дня рождения А.П. Гуляева)"97

А. В. Колдаев, И. А. Краснянская

Международная конференция молодых ученых "Научное наследие Д.К. Чернова" 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.Баннх;
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;
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

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.

© ЦНИИчермет им. И.П. Бардина 2019

PROBLEMS OF FERROUS METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

CONTENTS

1 • 2019

Fundamentals of metallurgy

S. M. Karpov, A. G. Kolesnikov, A. N. Nikulin

Interrelation between the mechanical properties of the metal and the deformation conditions of piercing of blanks into hollow billets at the piercing mill of screw rolling5

A. I. Zaitsev, A. V. Koldaev, S. I. Androsova, A. B. Stepanov, B. M. Mogutnov, I. A. Krasnyanskaya

Investigation of metal-slag interaction processes for improving the quality and non-metallic inclusions cleanliness of ultra-low carbon IF, IF-HS auto sheet steels21

Production processes in metallurgy

V. L. Kalyuzhnyi, L. I. Aliieva, A. N. Potiatynik

Computational and experimental research of cold forward extrusion according to the scheme "workpiece behind the workpiece"29

Materials science and new materials

V. P. Filippova, O. P. Zhukov, S. Yu. Makushev, I. L. Tiazhelnikova, K. V. Neumoin, S. V. Basov, S. G. Golovachiev

Influence of point defects on the period of the crystal lattice of α -Fe and solid solutions based on it35

L. A. Baeva, M. E. Getmanova, V. N. Zikeev, A. N. Nikulin, V. A. Uglov, G. A. Filippov

Mechanical properties and parameters of resistance to destruction of cast rail wheels of class "B"45

A. V. Amezhnov, I. G. Rodionova, A. I. Zaitsev, E. I. Zarkova, M. E. Marzoeva

Regularities of the influence of the characteristics of non-metallic inclusions, phase precipitates on the corrosion resistance of low-carbon and ultra low-carbon steels58

A. V. Kamynin, V. P. Menushenkov, E. S. Khotulev, A. A. Everstov

The study of the phase composition, structure and magnetic properties of high coercive alloys based on the $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ system, depending on the technology of their manufacturing70

G. Rodionova, N. A. Karamysheva, A. A. Pavlov, A. S. Mel'nichenko, V. E. Telegin, S. G. Andreev, A. V. Mastyaev

Investigation on the influence of the chemical composition and technological parameters on the properties of cold-rolled low-alloy steel (HSLA type) after continuous annealing using statistical analysis methods79

Nanomaterials and nanotechnologies

A. M. Glezer, V. L. Stolyarov, N. A. Shurygina, T.V. Rassadina

Engineering of grain boundaries as a means of preparation of super- strength nanocrystals92

Information

N. V. Kolyasnikova

Conference "The current state of metal science (on the 110th anniversary of the birth of A.P. Gulyaev)"97

A.V. Koldaev, I.A. Krasnyanskaya

International conference of young researchers "Scientific heritage of D.K. Chernov" 101

УДК 621.774.3 (001)

Связь механических свойств металла с деформационными условиями прошивки заготовок в гильзы на прошивном стане винтовой прокатки

С. М. Карпов¹, А. Г. Колесников¹, А. Н. Никулин²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

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

Осуществлено моделирование процессов винтовой прокатки поперечной осадкой с привлечением теории колебаний. Установлено влияние прочностных свойств металла и размера заготовки на величину единичного критического обжатия, способное вызвать осевое разрушение заготовки. Показана связь прочностных свойств и природы металла на условия прошивки заготовок в гильзы на прошивном стане. Выполнен сравнительный анализ природных свойств углеродистых и легированных сталей с природными свойствами высоколегированных сталей, используемых для производства бесшовных труб. Даны рекомендации по совершенствованию технологии производства бесшовных труб.

Ключевые слова: винтовая прокатка, прошивка заготовок, деформация, обжатие, осевое разрушение, прочность, пластичность, температура, качество.

Simulation of the processes of screw rolling by transverse draught with the involvement of the vibration theory was carried out. The influence of the metal strength properties and the blank size was established on the value of a single critical reduction, which might cause axial destruction of the blank. The association of the strength properties and the nature of the metal was shown with the conditions for piercing of blanks into hollow billets at the piercing mill. A comparative analysis was performed of the natural properties of carbon and alloyed steels with the natural properties of high-alloy steels used for the production of seamless pipes. Recommendations for improving the production technology of seamless pipes were given.

Keywords: screw rolling, piercing of blanks, deformation, reduction, axial destruction, mechanical strength, plasticity, temperature, quality.

УДК 620.193

Исследование процессов взаимодействия металла со шлаком для повышения качества и чистоты по неметаллическим включениям сверхнизкоуглеродистых IF, IF-HS автолистовых сталей

А. И. Зайцев, А. В. Колдаев, С. И. Андросова, А. Б. Степанов, Б. М. Могутнов, И. А. Краснянская
ФГУП “ЦНИИчермет им. И.П. Бардина”, Москва. E-mail: aizaitsev1@yandex.ru

В результате исследования взаимодействия металла со шлаком при ковшовой обработке и непрерывной разливке сверхнизкоуглеродистых сталей установлено, что эффективным приемом повышения чистоты сталей по неметаллическим включениям и сере является раскисление покровного шлака сталеразливочного ковша после вакуумного обезуглероживания металла. Оптимальными раскислителями шлака являются гранулированный алюминий и отходы производства алюминия торговой марки АВК-65ф. Их использование позволяет достичь содержания FeO в шлаке не более 1,0 – 1,5 масс. % при отсутствии прироста концентрации алюминия в стали. Для снижения содержания неметаллических включений в рассматриваемых сталях предпочтительным является использование в промежуточном ковше шлакового покрытия с повышенной основностью.

Ключевые слова: автолистовые стали, IF стали, IF-HS стали, шлак, ковшовая обработка, промежуточный ковш, раскисление, неметаллические включения, десульфурация, основность.

As a result of studying the interaction between metal and slag during ladle processing and continuous casting of ultra-low carbon steels, it has been established that deoxidation of the covering slag of the steel ladle after vacuum decarburization of the metal is an effective method for increasing the non-metallic inclusions and sulfur cleanliness of the steels. Optimal slag deoxidizing agents are granular aluminum and the wastes of production of the AVK-65f commercial grade aluminum. Their use makes it possible to reach FeO content in the slag of not more than 1.0 – 1.5 wt. pct without increasing the concentration of aluminum in steel. To reduce the content of non-metallic inclusions in the steels under consideration, it is preferable to use in the tundish a slag coating of increased basicity.

Keywords: auto sheet steels, IF steels, IF-HS steels, slag, ladle processing, tundish, deoxidation, non-metallic inclusions, desulphurization, basicity.

УДК.621.777

Расчетно-экспериментальное исследование холодного прямого выдавливания по схеме “заготовка за заготовкой”

В. Л. Калюжный¹, Л. И. Алиева², А. Н. Потятыник¹

¹ *Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, г. Киев. E-mail: kwl_2011@ukr.net, k_omd@ukr.net*

² *Донбасская государственная машиностроительная академия, Украина, г. Краматорск. E-mail: pnir@dgma.donetsk.ua*

Методом конечных элементов проведен расчетный анализ холодного прямого выдавливания по схеме “заготовка за заготовкой” круглых стержней из стали. Установлены степень деформации и угол конуса матрицы, которые обеспечивают проработку структуры металла при пластической деформации, необходимую для получения заданной величины предела текучести. Определены зависимость усилия выдавливания от перемещения деформирующего инструмента, распределения удельных усилий на инструменте, конечные формы и размеры стержней. Разработана и изготовлена конструкция штампа для выполнения выдавливания на гидравлическом прессе. Проведены экспериментальные исследования выдавливания отожженных цилиндрических заготовок для получения круглых стержней. Результаты экспериментов подтвердили расчетные данные по усилиям выдавливания, форме и размерам полученных стержней, а также по пределу текучести деформированного металла стержней.

Ключевые слова: круглый стержень, холодное прямое выдавливание, метод конечных элементов, усилия выдавливания, удельные усилия, форма и размеры стержней, интенсивность деформаций, предел текучести.

The finite elements method was used for research of cold forward extrusion of round steel rods according to the scheme “workpiece behind the workpiece”. The degree of deformation and the matrix’s angle of the cone have been established, which provide the structure of the metal during plastic deformation, required for obtaining the specified value of the yield strength. The dependence of the extrusion force on the displacement of the deforming tool, the distribution of the specific forces on the tool, the final shapes and dimensions of the rods have also been determined. A stamp construction for extrusion on a hydraulic press has been developed and manufactured. Experimental studies of extrusion of annealed cylindrical billets for the production of round rods have been carried out. The results of the experiments confirmed the calculated data on the extrusion efforts, the shape and size of the obtained rods, as well as on the yield strength of the deformed metal of the rods.

Keywords: round rod, cold forward extrusion, finite elements method, extrusion force, specific force, shape and sizes of the rods, intensity of deformation, yield strength.

УДК 669.539.2.

Влияние точечных дефектов на период кристаллической решетки α -Fe и твердых растворов на его основе

**В. П. Филиппова, О. П. Жуков, С. Ю. Макушев,
И. Л. Тяжелникова, К. В. Неумоин,
С. В. Басов, С. Г. Головачёв**

ФГУП “ЦНИИчермет им. И.П. Бардина”, г. Москва.

E-mail: varia.filippova@yandex.ru, zhukov.op@yandex.ru, smb0x2@yandex.ru, ityazh@mail.ru.

Методами компьютерного моделирования и рентгеновской дифрактометрии исследуется природа концентрационной зависимости периода ОЦК кристаллической решетки чистого α -Fe и сплавов на его основе. Показано, что наблюдаемое после закалки из предплавильных температур увеличение периода кристаллической решетки чистого α -Fe и сплавов с достаточно малым содержанием растворенных компонентов связано с преобладанием бивакансий по сравнению с вакансиями. Полученные результаты обсуждаются с позиций возможных механизмов взаимодействия растворенных атомов и точечных дефектов.

Ключевые слова: кристаллическая структура, точечные дефекты, твердый раствор, железо, рентгеновская дифрактометрия, компьютерное моделирование, потенциал межатомного парного взаимодействия.

The nature of the concentration dependence of the crystal lattice period of bcc pure α -Fe and alloys based on it was investigated by computer simulation and X-ray diffractometry. It has been shown that an increase in the crystal lattice period of pure α -Fe and its alloys with a fairly low content of dissolved components occurring after quenching from temperatures near the melting point is due to the predominance of bi-vacancies over vacancies. The obtained results were discussed in terms of possible mechanisms of the interaction between solved atoms and point defects.

Keywords: crystal structure, point defects, solid solution, iron, X-ray diffractometry, computer simulation, potential of interatomic pairwise interaction.

УДК 669.15.194

Механические свойства и параметры сопротивления разрушению железнодорожных литых колес класса “В”

**Л. А. Баева, М. Е. Гетманова, В. Н. Зикеев,
А. Н. Никулин, В. А. Углов, Г. А. Филиппов**

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

Выполнены исследования механических и служебных свойств железнодорожных литых колес класса “В”, изготовленных по стандарту AAR M-107/M-208 (США) на соответствие цельнокатаным колесам из стали марки “2”, ГОСТ 10791. Основное различие в служебных свойствах литых и катаных колес обусловлено способами их производства. Металл литого колеса по ряду прочностных и пластических свойств заметно уступает металлу катаных колес. Наиболее заметно требованиям ГОСТ 10791 по прочностным и пластическим свойствам уступает металл диска литого колеса. Эксплуатация литых колес вследствие низких служебных характеристик на отечественных магистралях нецелесообразна из-за повышенной вероятности преждевременного разрушения.

Ключевые слова: литое колесо, катаное колесо, ликвация, структура, твердость, механические свойства, пластичность, ударная вязкость, дефекты, разрушение металла.

The mechanical and service properties of cast rail wheels of class “В”, produced according to USA standard AAR M-107 / M-208, were studied for consistency with all-rolled wheels from the grade 2 steel, GOST 10791. The main difference in the service properties of cast and rolled wheels results from the methods of their production. The metal of the cast wheel is noticeably inferior to the metal of the rolled wheel for a variety of strength and plastic properties. The metal of the cast wheel web ranks most noticeably below the requirements of GOST 10791 in strength and plastic properties. In the consequence of low performance characteristics operation of cast wheels on domestic railway lines is not appropriate because of the increased likelihood of premature failure.

Keywords: cast wheel, rolled wheel, segregation, structure, hardness, mechanical properties, plasticity, impact strength, defects, fracture of metal

УДК 620.193

Закономерности влияния характеристик неметаллических включений, фазовых выделений на коррозионную стойкость низкоуглеродистых и сверхнизкоуглеродистых сталей

А. В. Амежнов, И. Г. Родионова, А. И. Зайцев, Е. И. Заркова, М. Е. Марзоева

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

Представлены результаты исследования влияния характеристик неметаллических включений на коррозионную стойкость автолистовых сталей с учетом их химического состава и параметров микроструктуры. Показано, что основной причиной снижения коррозионной стойкости является формирование большего количества комплексных неметаллических включений, имеющие наибольшую разницу в значениях ТКЛР по сравнению с матрицей. К таким включениям относятся алюминаты кальция и алюмомагниево-шпинели с сульфидной составляющей. Упрочненные стали, легированные марганцем и фосфором, показали более высокую коррозионную стойкость. Одной из причин этого является то, что сера в таких сталях связана в сульфид марганца, а не в сульфид и карбосульфид титана, которые также снижают коррозионную стойкость.

Ключевые слова: коррозионная стойкость, автолистовые стали, неметаллические включения, микроструктура, фазовые выделения, температурный коэффициент линейного расширения.

The paper presents results of the research into the influence of non-metallic inclusions characteristics on the corrosion resistance of sheet steels with regard to their chemical composition and microstructure parameters. It has shown that the main cause for the decrease in corrosion resistance is the formation of a larger number of complex non-metallic inclusions, which have the greatest difference in the thermal expansion coefficient values in comparison with the matrix. Among them are calcium aluminates and aluminum-magnesium spinel with a sulfide component. Hardened steels, alloyed with manganese and phosphorus, showed higher corrosion resistance. One of the reasons for this is the fact that sulfur in such steels is bound to manganese sulfide and not to titanium sulfide and carbosulfide, which also reduce corrosion resistance.

Keywords: corrosion resistance, auto sheet steels, non-metallic inclusions, microstructure, phase precipitates, temperature coefficient of linear expansion.

УДК 669-138.2

Исследование фазового состава, структуры и магнитных свойств высококоэрцитивных сплавов на основе системы $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ в зависимости от технологии их изготовления

**А. В. Камынин¹, В. П. Менушенков²,
Е. С. Хотулёв¹, А. А. Эверстов¹**

¹ АО “Спецмагнит”, 127238, г. Москва, Дмитровское ш., д. 58.

E-mail: magnit.works@yandex.ru

² НИТУ “МИСУС” г. Москва. E-Mail: menushenkov@gmail.com

Представлена технология синтеза и обработки порошковых магнитотвёрдых сплавов на основе соединения $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ с последующим азотированием порошка. Методами электронной микроскопии и рентгенографии исследована микроструктура и фазовый состав сплавов непосредственно после выплавки различными способами, а также после гомогенизационного отжига. Установлены оптимальные режимы синтеза слитка и гомогенизационного отжига, оптимальный размер частиц порошка. Исследовано влияние режимов азотирования на фазовый состав и магнитные свойства синтезированного нитрида $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$, установлен оптимальный режим азотирования.

Ключевые слова: постоянный магнит, магнитотвёрдые материалы, магнитная анизотропия, коэрцитивная сила, редкоземельные металлы, элементы внедрения, азотирование.

The article presents technologies of synthesis and treatment of sintered magnetically hard alloys on $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ basis with the subsequent nitriding of the powder. Methods of electron microscopy, X-ray and metallography were used to study the microstructure and phase composition of the alloys immediately after smelting and also after homogenizing. The optimal modes of ingot synthesis and its homogenization annealing, the optimal particle size of the powder were established. The influence of nitriding regimes was investigated on the phase composition and magnetic properties of the synthesized $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$ nitride. The optimum regime of nitriding was found.

Keywords: permanent magnet, hard magnetic materials, magnetic anisotropy, coercive force, rare-earth metals, interstitial elements, nitriding.

УДК 669.15-194.2:519.24:621.785.375

Исследование влияния химического состава и технологических параметров на свойства холоднокатаного проката низколегированной стали (типа HSLA) после непрерывного отжига при использовании методов статистического анализа

**И. Г. Родионова¹, Н. А. Карамышева¹, А. А. Павлов¹,
А. С. Мельниченко², В. Е. Телегин³, С. Г. Андреев³,
А. В. Мастяев³**

¹ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва.

E-mail: igrodi@mail.ru, NKmet20@yandex.ru

² НИТУ «МиСИС», г. Москва.

³ ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск Челябинской обл.

При использовании методов статистического анализа для оценки влияния химического состава и технологических параметров на свойства холоднокатаного проката из сталей HSLA после обработки в агрегате непрерывного отжига (АНО) выявлены ключевые технологические параметры, оптимизацией которых можно повысить комплекс механических характеристик. Сформулированы гипотезы о механизмах влияния технологических параметров на процессы, происходящие на разных стадиях производства холоднокатаного проката, которые в дальнейшем целесообразно проверить экспериментальным путем. Показана возможность влияния на свойства сталей не только традиционных механизмов упрочнения (измельчение зеренной структуры, твердорастворное упрочнение и дисперсионное твердение), но и процессов, происходящих на низкотемпературной стадии обработки в АНО. К таким процессам относится осаждение углерода на частицах карбида ниобия, в том числе наноразмерных, с образованием комплексных выделений с участием цементита, приводящее к разупрочнению и повышению пластичности из-за снижения эффективности дисперсионного твердения. Второй процесс, реализуемый в условиях низкотемпературной обработки — это образование сегрегаций атомов углерода на дислокациях, а затем и выделений с его участием, приводящее к повышению прочностных характеристик (процессы старения).

Ключевые слова: высокопрочные стали, холоднокатаные стали, низколегированные стали, HSLA стали, химический состав, термическая обработка, агрегат непрерывного отжига, технологические параметры, механические свойства, статистический анализ.

When using the methods of statistical analysis to assess the influence of the chemical composition and technological parameters on the properties of cold-rolled HSLA steels after processing in a continuous annealing unit (CAU), key technological parameters have been identified, optimizing of which allow improving the complex of mechanical characteristics. Hypotheses have been formulated for the mechanisms of influence of technological parameters on the processes occurring at different stages of the production of cold-rolled steel, which in the future it is advisable to verify experimentally. The possibility of influencing the steels properties of not only traditional hardening mechanisms (grinding grain structure, solid solution hardening and dispersion hardening), but also processes occurring at the low-temperature processing stage at the CAU have been shown. Such processes include the deposition of carbon on niobium carbide particles, including nano-sized ones, with the formation of complex precipitates with the participation of cementite, leading to weakening and increasing plasticity due to a decrease in the efficiency of precipitation hardening. The second process, occurring in the course of low-temperature processing, is the formation of segregations of carbon atoms on dislocations and then precipitates with carbon participation, which lead to an increase in strength characteristics (aging processes).

Keywords: high-strength steels, cold-rolled steels, low-alloy steels, HSLA steels, chemical composition, thermal treatment, continuous annealing unit, technological parameters, mechanical properties, statistical analysis.

УДК 669.24.295:539.389.1

Инженерия границ зерен как способ получения сверхпрочных нанокристаллов

**А. М. Глезер^{1,2}, В. Л. Столяров², Н. А. Шурыгина¹,
Т. В. Рассадина³**

¹ ФГУП «ЦНИИчермет имени И.П. Бардина», г. Москва. E-mail: a.glezer@mail.ru.

² НИТУ «МИСиС», г. Москва.

³ РТУ «МИРЭА», г. Москва

Показано, что на основе концепции упрочнения нанокристаллов, включающей в себя конкуренцию различных механизмов пластической деформации, можно достигнуть предельной (теоретической) прочности нанокристаллов за счет управления структурой (инженерии) границ зерен.

Ключевые слова: прочность, пластическая деформация, граница зерна, проскальзывание, соотношение Холла-Петча, наночастица.

It is shown that on the basis of the strain hardening concept of nanocrystals including which includes competition of various mechanisms of plastic deformation it is possible to attain the limiting (theoretical) strength of nanocrystals by controlling the structure (engineering) of grain boundaries.

Keywords: mechanical strength, plastic deformation, grain boundary, slippage, Hall–Petch relationship, nanoparticle.

Конференция “Современное состояние металловедения (к 110-летию со дня рождения А.П. Гуляева)”

Н. В. Колясникова

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

25 сентября в ФГУП “ЦНИИчермет им. И.П. Бардина” состоялась конференция “Современное состояние металловедения (к 110-летию со дня рождения А.П. Гуляева)”, в которой приняли участие более 50 специалистов из различных областей металлургии и металловедения, в том числе представители следующих предприятий и научно-исследовательских институтов: ОЭМК, АО “ВМЗ”, ПАО “Ижсталь”, АО “МЗ “Электросталь”, ПАО “ММК”, АО “ПНТЗ”, ПАО “НЛМК”, АО “Уральская Сталь”, ООО “Инновационный центр упрочнения” (ООО “ИЦУ”), ПАО “ЧМК”, ООО “ЛЮКОН ПРО”, ООО “ТИКСОМЕТ”, ООО “ВНИИНЕФТЕМАШ”, ГК МЕТПРОМ. На конференции присутствовали также представители СМИ: сотрудники журналов “Металловедение и термическая обработка металлов” и “Металлург”.

С приветственным словом к участникам от организаторов конференции обратился первый заместитель генерального директора ФГУП “ЦНИИчермет им. И.П. Бардина” Углов В.А.

Было заслушано 13 докладов, посвященных научной деятельности А.П. Гуляева и обзору развития металловедения на основе научных положений школы А.П. Гуляева.

Модератор конференции — член Российской и Международной инженерной академий, почетный член Международной федерации и инженерии поверхности, д.т.н., проф. Тихонов А.К. Его выступление “Гуляев А.П. – 110 лет” было первым и

отражало научное наследие А.П. Гуляева по вопросам формирования структуры металла в конкретных условиях производства. А.П. Гуляев сыграл исключительную роль в становлении и развитии черной металлургии СССР и воспитал блестящую плеяду ученых-металловедов. Значителен его вклад в развитие отечественной и мировой металлургии, создание фундаментальных направлений металловедения, современное состояние металловедения в России и за рубежом.

Доклад директора Института качественных сталей ФГУП “ЦНИИчермет им. И.П. Бардина”, д.т.н., проф. Филиппова Г.А. “А.П. Гуляев и современные проблемы металловедения высокопрочных сталей” был посвящен обзору основной научной деятельности А.П. Гуляева, которая проходила в Институте качественных сталей “ЦНИИчермет им. И.П. Бардина”, где долгие годы он занимал должность заместителя директора, и была направлена на решение задач повышения уровня прочности конструкционных материалов с учетом сохранения или увеличения запаса пластичности, вязкости и хладостойкости. Отмечено, что эти задачи стоят перед Институтом качественных сталей и в настоящее время – создание новых систем легирования и совершенствование технологий получения конструкционных материалов различного назначения — выплавки, внепечной обработки, разливки, термомеханической и термической обработки. Наиболее перспективным направлением в области

повышения прочности низколегированных сталей, зарекомендовавшим себя в последнее время, являются комплексные разработки систем легирования в сочетании с подбором режимов термомеханической обработки и ускоренного охлаждения. В последнее время разработка составов и технологий производства проката из высокопрочных свариваемых сталей, в том числе с применением совмещенных процессов правки и термической обработки, позволили решить ряд задач повышения эксплуатационного ресурса изделий автомобильной и горнодобывающей техники. Постоянно растущие требования к прочности и коррозионной стойкости изделий из нержавеющей сталей выдвигают задачу поиска новых систем легирования и эффективных технологий производства проката, труб и других видов металлоизделий. Одним из решений этой задачи является создание аустенитных коррозионно-стойких сталей, легированных азотом и кремнием.

Генеральный директор ООО “Тиксомет”, д.т.н., проф. Казаков А.А. в докладе “Разработка современных металлографических методов количественной оценки микроструктуры стали для пересмотра устаревших ГОСТ” сообщил, что в этом году на государственном уровне в России объявлен курс на “цифровую экономику”, поэтому выполненные ООО “Тиксомет” за последние 20 лет работы по “цифровой металлографии” могли бы обрести статус отраслевых стандартов и ГОСТов и стать значимым вкладом в реализацию этой государственной программы. Многие отечественные ГОСТы, регламентирующие чистоту стали и ее структуру, были разработаны раньше, чем была опубликована в 1977 г. книга А.П. Гуляева “Чистая сталь”, в которой он описал “влияние общей чистоты и отдельных загрязняющих металл элементов на его свойства”. При этом были “сопоставлены свойства металла, полученные разными способами выплавки”. С тех пор стандарты не пересматривались, а в технологиях получения сталей произошли радикальные изменения, что, безусловно, отразилось на их чистоте и структуре.

В докладе “Моделирование кинетики распада переохлажденного аустенита в доэвтектидных сталях на основе нейронных сетей” ведущего научного сотрудника, к.ф.-м.н. ФГУП “ЦНИИчермет им. И.П. Бардина” Вайнштейна Д.Л. представлены программный комплекс ANNETTT моделирования кинетики распада переохлажденного аустенита и результаты моделирования влияния содержания углерода и легирующих элементов в сталях на параметры диаграмм изотермического распада

переохлажденного аустенита. В докладе описаны системные требования к компьютерам для использования программного комплекса ANNETTT.

В докладе д.т.н., проф., главного редактора журнала “Металловедение и термическая обработка металлов” Крапошина В.С. и д.т.н., проф., ведущего научного сотрудника ФГУП “ЦНИИчермет им. И.П. Бардина” Зикеева В.Н. “Журнал “МиТОМ” и бескарбидные бейнитные тенденции в термической обработке после А.П. Гуляева. Где углерод?” отмечено, что наиболее интересными новыми тенденциями в металловедении являются изотермическая закалка на так называемый бескарбидный бейнит, а также обнаружение композитных неметаллических включений типа ядро/оболочка в трубных сталях и автолисте. Частицы ядро/оболочка обнаружены также при старении высокопрочных сплавов системы алюминий-литий-медь. Исследования бескарбидного бейнита сделали вновь актуальной проблему размещения атомов углерода в кристаллических решетках аустенита и мартенсита. Общепринятые теории мартенситного превращения обоснованно постулируют бездиффузионный характер мартенситного превращения (углерод неподвижен), но размещают его в кристаллических решетках там, где он не может разместиться из-за слишком большого диаметра углерода по сравнению с доступными пустотами. В докладе описывается другая модель размещения углерода в структурах аустенита и мартенсита. Модель основана на приблизительном равенстве периодов решеток аустенита и алмаза, чем обеспечивается отсутствие заметных искажений решетки даже при растворении 2 вес. % С в аустените, и подтверждается экспериментами по эффекту Мёссбауэра. Именно совпадением периодов решеток объясняется уникальность системы железо-углерод, отмеченная А.П. Гуляевым.

Также было сообщено, что по инициативе А.П. Гуляева журнал “Металловедение и термическая обработка металлов” с 1959 года публикуется наряду с русскоязычной также и в англоязычной версии под заголовком “Metal Science and Heat Treatment”. Переводятся все статьи каждого выпуска. Английский выпуск содержит статьи двух русских номеров и выходит через 4 месяца после русской версии (6 английских выпусков в год). Полная переводная версия Metal Science and Heat Treatment включена в международные системы цитирования: Cambridge Scientific Abstracts, Chemical Abstracts Service (CAS), ChemWeb, Current Contents/Engineering, Computing and Technology, Inspec, Mathematical Science Citation Index, Science

Citation Index, Science Citation Index Expanded (SciSearch), Scopus.

В докладе главного научного сотрудника ФГУП “ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина”, д.т.н., проф. Матросова Ю.И., к.т.н. Холодоного А.А., Кузнеченко Я.С. “Легирование и технология изготовления толстолистового проката для газонепроводных труб, эксплуатируемых в среде “кислого газа” представлены данные исследований, которые позволили установить влияние химического состава и режимов ускоренного охлаждения после контролируемой прокатки на сопротивляемость листов водородному растрескиванию (НІС). Показано, что снижение содержания углерода ($\leq 0,06\%$) и марганца ($\leq 1,00\%$) в стали и последовательное охлаждение проката из аустенитной области с интенсивностью более $20\text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ до температур прерывания около $550\text{ }^\circ\text{C}$ способствуют значительному повышению стойкости листов против НІС. Дополнительные добавки молибдена ($0,15\%$) приводят к повышению прочностных свойств и стойкости против НІС листов при более низких температурах окончания ускоренного охлаждения — $400 - 450\text{ }^\circ\text{C}$. По результатам исследований разработана и освоена промышленная технология изготовления толстолистового проката категорий прочности X52MS, X56MS, X60MS и X65MS с высокой стойкостью против НІС.

В докладе сотрудников АО “НПО “ЦНИИТМАШ”, МГТУ им Н.Э. Баумана и ООО “ТСЗП” Циха С.Г., Красули А.А., Ишмухаметова Д.З. “Структура и свойства стали 40X13 после безэлектролизного жидкостного борирования” отмечено, что в настоящее время наибольший интерес проявляется к диффузионным покрытиям из-за их прочной связи с основным металлом в результате проникновения элементов покрытия в узлы кристаллической решетки основного металла. Это увеличивает прочность связей больше, чем при любых других видах покрытий. Ими была разработана и проходит промышленное опробование в условиях Нефтекумского нефтяного месторождения технология безэлектролизного жидкостного борирования на ряде деталей газосепараторов-диспергаторов, изготавливаемых из стали 40X13. В случае положительных результатов опытно-промышленных испытаний деталей газосепараторов-диспергаторов эта технология может быть рекомендована для внедрения в нефтедобывающей отрасли в качестве упрочняющей для различных деталей, подвергаемых абразивно-коррозионному изнашиванию.

Доклады, представленные участниками металлургических предприятий отрасли, были

посвящены историческому обзору деятельности А.П. Гуляева и конкретным проблемам сегодняшнего дня, решаемым в научных подразделениях комбинатов. В докладе научного руководителя инженерно-технологического центра АО “Выксунский металлургический завод”, д.т.н. Эфрона Л.И. “Развитие и промышленное использование металлургических основ создания трубных сталей” рассмотрено современное развитие принципов классического металловедения сталей, заложенных А.П. Гуляевым, и создание на их основе технологий производства трубных сталей с уникальным комплексом свойств. Решаются вопросы чистоты сталей по примесям, газам, неметаллическим включениям и их влияния на вязкость трубных сталей, управления структурой на основе экспериментального исследования и моделирования процессов структурообразования, создания новых технологических схем контролируемой прокатки на толстолистовом стане 5000 и стане 1950 литейно-прокатного комплекса. Уделено внимание вопросам оптимального легирования сталей, а также обсуждаются результаты внедрения разработок на АО “Выксунский металлургический завод” при производстве проката для электросварных труб различного назначения.

Доклад начальника лаборатории металловедения и термообработки ПАО “Ижсталь”, к.т.н. Зинченко С.А. “Сфероидизирующая термоциклическая обработка инструментальных сталей” посвящена рассмотрению принятых на предприятии режимов обработки, заключающихся в комбинации термоциклической обработки с выдержками при максимальной температуре изотермического отжига, при котором происходит зарождение множества центров конденсации вторичной карбидной фазы за счет постоянного градиента температуры и последующей выдержки в интервале перлитного распада для роста и коагуляции карбидной фазы. Термоциклическая обработка проката быстрорежущей стали обеспечивает уменьшение среднего размера и повышение плотности распределения эвтектических карбидов в $1,5 - 2$ раза, вследствие чего существенно (на $25 - 30\%$) возрастает технологическая горячая пластичность металлопроката, на $1 - 1,5$ балла снижается карбидная неоднородность.

В докладе технического директора АО “Металлургический завод “Электросталь” Кабанова И.В. и начальника лаборатории металловедения и термической обработки, к.т.н. Сидориной Т.Н. “Решение металлургических задач на заводе “Электросталь”. История, настоящее, перспективы развития” отмечено, что Александр Павлович

Гуляев — один из виднейших учёных металлургов нашей страны. Результаты его научной деятельности актуальны и востребованы в практике завода в настоящее время. Завод “Электросталь” создан как первый в России электрометаллургический завод для производства отечественных качественных сталей. Задачи, решаемые в области металловедения жаропрочных сплавов: совершенствование металлургической технологии жаропрочных сплавов в направлении повышения показателей длительной прочности; создание технологии производства новых сплавов, обеспечивающих требования современного авиадвигателестроения. Задачи, решаемые в области металловедения коррозионностойких и конструкционных сталей: создание коррозионностойких материалов с высокой степенью коррозионной стойкости и повышенными прочностными характеристиками; решение проблем пластичности двухфазных сталей; повышение комплекса свойств мартенситно-стареющих сталей, внедрение технологии упрочняющей термообработки в условиях завода.

В докладе начальника ГНМСИТ АО “ПНТЗ”, к.т.н. Лаева К.А., заведующего лабораторией ЦФМК ФГУП “ЦНИИчермет им. И.П. Бардина”, к.т.н Павлова А.А. “Влияние ниобия на микроструктуру и прочность среднеуглеродистой стали для производства насосно-компрессорных труб” сообщено, что для разработки новой марки экономно-легированной стали для насосно-ком-

прессорных труб с повышенным комплексом эксплуатационных характеристик, получаемых после горячей прокатки, в качестве основы были предложены стали, содержащие 0,2 % углерода, легированные хромом, марганцем, а также дополнительно микролегированные ниобием. Исходя из имеющегося опыта анализа разрушений насосно-компрессорных труб, сделано предположение, что содержание MnS, цементита и карбонитрида ниобия (для вариантов, содержащих ниобий) может отрицательно сказаться на стойкости сталей против СКРН. В связи с этим может потребоваться ограничение марганца и хрома. Микролегирование ниобием предлагается ограничить на уровне 0,05 – 0,07 %.

В заключительном слове д.т.н., проф. Тихонова А.К. отмечено большое значение проведенной конференции для развития отечественного металловедения на традициях, заложенных в ЦНИИчермет им. И.П. Бардина Александром Павловичем Гуляевым.

По итогам конференции приняты следующие решения:

Проводить конференцию 1 раз в два года под девизом “Гуляевские чтения”.

Оформить мемориальную доску, посвященную памяти А.П. Гуляева.

Присвоить Научному центру качественных сталей ФГУП “ЦНИИчермет им. И.П. Бардина” имя А.П. Гуляева.

Международная конференция молодых ученых “Научное наследие Д.К. Чернова”

А. В. Колдаев, И. А. Краснянская

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

01 марта 2017 г. в ФГУП “ЦНИИчермет им. И.П.Бардина” состоялась ежегодная конференция молодых специалистов “Перспективы развития металлургических технологий”. По сложившейся традиции целью проведения конференции являлось повышение квалификации молодых специалистов, объединение усилий представителей различных организаций при решении важных производственно-технических задач, укрепление связи науки и производства. Аспирантам и соискателям представлялась хорошая возможность апробации диссертационных работ.

В конференции приняли участие молодые ученые и специалисты из различных научно-исследовательских организаций и ВУЗов: ФГУП “ВИАМ”, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ФГБОУ ВО МАДИ, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, ФГУП “ЦНИИчермет им. И.П.Бардина”, ФГБОУ ВО “МГТУ “Станкин”, Институт физического материаловедения СО РАН, а также из ведущих металлургических предприятий России (ПАО “НЛМК”, ПАО “ТАГМЕТ”, ПАО “СТЗ”, АО “ОЭМК”, НПО “Нитрид”, АО “ЦНИИМ”). Кроме того, на конференции были представлены доклады представителей Института точной механики (Польша) и ООО “Инновационный центр качественных сталей” (Украина). Всего было представлено 27 докладов.

Открывали конференцию начальник управления ЦНИИчермет Татьяна Павловна Москвина,

академик РАН Леопольд Игоревич Леонтьев, доктор технических наук профессор Лариса Георгиевна Петрова. С приветствием к собравшимся обратилась Т.П. Москвина. Она рассказала о вкладе молодых ученых в научные разработки ЦНИИчермет, проинформировала о предстоящем Международном конгрессе по металловедению и термообработке, а также пожелала участникам конференции интересной и творческой работы. Л.И. Леонтьев выступил с докладом “150 лет со дня открытия Д. К. Черновым полиморфизма железа и стали (критические точки Чернова)”. Он доложил о фундаментальном значении открытия Дмитрия Чернова для металлургической отрасли.

Широкий спектр докладов был посвящен вопросам азотирования и борирования сталей. В докладе Бибикова П.С. (МАИ, НПО “Нитрид”, ФГБОУ ВО МАДИ) представлены результаты исследования особенностей азотирования теплоустойчивых сталей без образования нитридной зоны. Предложен способ азотирования изделий топливной аппаратуры дизельных двигателей с учетом трудностей получения требуемой структуры и свойств при традиционном способе. В ходе исследований была определена оптимальная технология проведения процесса в атмосфере аммиака с добавками 10 – 40 % воздуха. В результате получен азотированный слой, который отвечает всем требованиям Евро-5 к азотированному слою изделий автомобильной техники.

Доклад Малахова А.Ю. (ФГБОУ ВО МАДИ) был посвящен исследованию каталитического эффекта на процессы азотирования стали предварительно наносимой на поверхность медной плёнки. В работе было предложено проведение нагрева цинк-наполненных покрытий в среде аммиака для активации диффузионного проникновения в металл не только цинка, но и азота; предложена схема строения модифицированного слоя.

Работа, представленная Мишигдоржийн У.Л. (Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Институт физического материаловедения СО РАН) касалась исследования микроструктуры и механических свойств углеродистых и легированных сталей после диффузионного борирования. Целью работы было получение борированного слоя с композиционной структурой для повышения комплекса механических свойств углеродистых и легированных сталей методом высокотемпературного диффузионного борирования в смеси, содержащей карбид бора и алюминий. Установлено, что борированные слои с композиционной структурой превосходят слои с традиционной игольчатой структурой по износостойкости и пластичности.

В работе Цих М.С. (МГТУ им. Н.Э. Баумана) исследовались структура и свойства предварительно цементированной стали 30ХГСА после борирования.

Симонов Д.С. (ФГБОУ ВО “МАДИ”) представил доклад “Комбинированные технологии ультразвуковой обработки и азотирования для поверхностного модифицирования изделий из сталей”. В работе анализировались комбинированные технологии создания функциональных покрытий на сталях для повышения надежности и долговечности ответственных деталей, работающих в сложных эксплуатационных условиях. На основе установленных функциональных зависимостей между параметрами комбинированной обработки, параметрами структуры на различных масштабных уровнях и макросвойствами выработаны принципы регулирования структурного состояния и свойств модифицированных слоев при разработке технологических решений для конкретных изделий.

Ряд докладов был посвящен производству труб. Брехачев Ю.С. (ПАО “Тагмет”) в своем сообщении, посвященном совершенствованию режимов нагрева труб под термическую обработку с целью снижения окисного слоя на внутренней поверхности, представил результаты исследований по изучению и опробованию на практике факторов, оказываю-

щих влияние на образование окалины. Предложена оптимизация режимов термической обработки труб в печи с шагающими балками. Было отмечено, что по результатам выполненных работ были внедрены рекомендации инженерно-технического центра в рамках оптимизации режимов нагрева труб под термическую обработку с целью снижения окисного слоя на внутренней поверхности.

Холодный А.А. (ФГУП “ЦНИИчермет им. И.П.Бардина”) представил доклад о перспективных путях повышения свойств низколегированных трубных сталей, стойких против водородного растрескивания (НКС) и сульфидного растрескивания под напряжением (SSC). В работе проведено изучение влияния нагрева в α -, ($\alpha + \gamma$)- и γ - областях с последующим охлаждением на воздухе на механические свойства и сопротивляемость НКС листов из трубных сталей типа 05ГХНДФБ (К50), 10Г2ФБ (К60) и 07Г2НМФБ (К65), изготовленных по технологии контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением. В результате исследования были определены ключевые факторы, влияющие на стойкость против SSC сталей категории прочности Х42-Х70; показана возможность повышения прочностных свойств стали при сохранении исходного уровня стойкости против водородного растрескивания за счет применения отпуска листов, изготовленных по технологии контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением.

Темы производства дисков газотурбинных двигателей касались доклады Короткого А.В. и Шестаковой А.А. (ФГУП “ВИАМ”). Короткий А.В. представил сообщение о реализованной во ФГУП “ВИАМ” технологии изотермической штамповки дисков на воздухе, позволяющей деформировать сложнолегированные никелевые сплавы и получать сложноконтурные заготовки дисков. В данной технологией в комплексе с деформацией проводят термическую обработку, которая является не отдельной операцией, а представляет собой часть технологической цепочки передела заготовки от слитка до готовой детали. Докладчик отметил, что несмотря на появление новых технологий производства жаропрочных никелевых сплавов, например, металлургии гранул и аддитивных методов, получение дисков газотурбинных двигателей (ГТД) деформацией жаропрочных никелевых сплавов будет являться актуальной задачей для металлургической промышленности долгое время. Во ФГУП “ВИАМ” также ведутся работы по созданию технологий производства дисковых деталей перспективных ГТД методами порошковой металлургии новых жаропрочных никелевых сталей, что было

отмечено в докладе Шестаковой А.А. В качестве исходного материала применяют гранулы, полученные двумя разными способами — распылением струи металла в потоке аргона (газовая атомизация) и методом центробежного распыления литых заготовок (PREP). Помимо разных методов получения исходного сырья обрабатываются разные технологии получения готового изделия. Это технологии “Засыпка гранул – ГИП – термическая обработка” и “Засыпка гранул – ГИП – деформация – термическая обработка”. Для повышения рабочих температур и механических характеристик существующих материалов во ФГУП “ВИАМ” проводят работы по созданию металлокерамических порошковых композиций (МКПК) с матрицей из жаропрочных никелевых сплавов и тугоплавкими армирующими наночастицами. Компактированные методом ГИП или синтезированные 3-D печатью изделия из подобных композиционных гранул позволят поднять рабочую температуру нагруженных деталей из дисковых сплавов на 150 – 200 °С.

В докладе Мартынова П.Г. (ФГУП “ЦНИИчермет им. И.П.Бардина”) сообщалось о влиянии режимов деформации и термической обработки на формирование микроструктуры и свойств высокопрочного износостойкого листового проката для стали, применяемой для горнодобывающего оборудования. Целью работы являлось исследование микроструктуры и механических свойств низколегированной стали с бором после изготовления проката по разным технологическим схемам. В работе представлены результаты исследований микроструктуры и механических свойств высокопрочной низколегированной стали с бором после двух различных способов изготовления проката — высокотемпературной горячей прокатки (ГП) и двухстадийной контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением (КП+УО) и последующей закалки (З) с отпуском (О). Показано, что в металле для рассмотренных в работе двух технологических схем прокатки низколегированной стали с бором (ГП и КП+УО) при последующей термообработке формируется мелкозернистая структура отпущенного мартенсита, которая обеспечивает высокие механические свойства, удовлетворяющие предъявляемым требованиям. Повышение температуры отпуска от 200 до 350 °С практически не вызывает разупрочнения, но дальнейшее повышение температуры отпуска от 350 до 650 °С приводит к значительному разупрочнению стали и увеличению относительного удлинения. Установлено, что наблюдаемое при температуре отпуска 350 °С охрупчивание стали связано со сменой аустенитных

прослоек, наблюдаемых при температуре 200 °С, на цементитные.

Работа Навроцкого П. (Институт точной механики, Польша) была посвящена исследованию формирования и свойств азотированных слоев, образующихся при изотермическом превращении. Анализ полученных результатов показывает, что при длительном процессе азотирования в атмосфере, состоящей из диссоциированного аммиака, достигается высокая насыщенность азотом поверхности термообработанных образцов. При высокой насыщенности поверхности азотом невозможно получить хорошие поверхностные свойства термообработанных азотированных слоев. Сталь, испытанная после процесса азотирования, характеризуется твердостью слоев на уровне 900 HV, тогда как после процесса азотирования и изотермической обработки можно достичь твердости 700 HV. Эти значения сопоставимы с науглероженными слоями.

Также на конференции прозвучали доклады по другим различным тематикам. Сергеева А.С. (ФГБОУ ВО “МАДИ”) представила доклад об использовании различных видов энергии в традиционных и инновационных процессах химико-термической обработки. В работе исследовали процессы ХТО инструментальных сталей: 1) плазменное азотирование с последующим оксидированием — для штампового инструмента; 2) плазмохимическое газовое осаждение покрытий (азотирование с последующим CVD-процессом) — для режущего инструмента. Анализ микроструктуры и механических свойств поверхности показал, что процесс плазменного азотирования с последующим оксидированием позволяет повысить ресурс работы штампового инструмента в 2 – 3,3 раза.

В докладе Демина П.Е. (ФГБОУ ВО МАДИ) сообщалось об исследованиях низкотемпературная плазма как способа интенсификации химико-термической обработки. Цель исследования заключалась в разработке технологий химико-термической обработки, которые обеспечивают необходимые эксплуатационные свойства поверхностного слоя изделий, существенное сокращение времени получения диффузионных слоев рабочей толщины и экономии дефицитных металлов путем замены легированных сталей поверхностно-упрочненными углеродистыми сталями. Изучение распределения легирующих элементов по толщине образца показало повышенную концентрацию диффундирующего легирующего элемента в поверхностном слое и пониженную концентрацию железа, что говорит о замещении железа легирующим элементом в твердом растворе. Также наблюдалось образова-

ние 22 нитридов (карбонитридов). Концентрация металла в твердом растворе зависит от его растворимости в железной матрице и термодинамической способности к образованию карбидов и нитридов. Концентрация насыщающего легирующего элемента плавно снижается к границе слоя и сердцевине, что обусловлено как снижением концентрации элемента в твердом растворе, так и уменьшением объемной доли вторичных фаз.

Доклад Луцкой С.А. (ФГУП “ВИАМ”) был посвящен изучению влияния рения на структурно-фазовый состав сплавов на основе интерметаллида Ni_3Al . Целью работы являлся сравнительный анализ микроструктур сплавов на интерметаллидной основе с различным содержанием рения, а также сравнение режимов термических обработок, разработанных для данных сплавов. Для сравнения были выбраны три интерметаллидных сплава системы $Ni - Al - W - Mo - Ti$: ВКНА-1В, ВКНА-25 и ВИН2. В докладе был сделан вывод о том, что для экономно легированных сплавов для снятия напряжений достаточно термической обработки; с увеличением количества тугоплавких легирующих элементов необходимо уделять значительное внимание оптимизации режимов термической обработки.

Кичкина А.А. (ФГУП “ЦНИИчермет им. И.П.Бардина”) представила доклад о формировании М/А-составляющей в структуре высокопрочной низкоуглеродистой бейнитной стали. В работе изучен вопрос идентификации М/А-составляющей в структуре высокопрочных трубных сталей и предложена методика определения

морфологии вторичных фаз; доли остаточного аустенита; размера, формы и распределения участков М/А-структур. Исследовано влияние параметров последеформационного охлаждения: скорости охлаждения и температуры прерывания ускоренного охлаждения; температуры и времени выдержки при УО; параметров ускоренного охлаждения на второй стадии (после выдержки) на состав и морфологию М/А-составляющей в структуре низкоуглеродистых трубных сталей категории прочности К60 и К65. Определены условия формирования микроструктуры, состоящей из матрицы бейнитного феррита и М/А-составляющей различной морфологии. Определены температурно-временные параметры процесса формирования значимой доли М/А-структур в сталях К60 и К65 в условиях, приближенных к реальным характеристикам процесса контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением. Для исследованных сталей категорий прочности К60 и К65 максимальная доля М/А-составляющей 5 – 5,5 % получена при температуре изотермической выдержки 550 °С, вследствие образования этой составляющей на основе двойникового и остаточного аустенита в чистом виде.

В заключение стоит отметить, что молодыми специалистами были представлены доклады по различным тематикам и направлениям развития и разработки металлургических технологий, что говорит о широком включении молодых квалифицированных кадров в весь спектр проводимых научных изысканий и разработок. Важно подчеркнуть, что все представленные доклады обладают высокой научной и практической значимостью.