

От редакции

Коллективом ученых МГТУ им. Г.И. Носова в рамках научной школы «Развитие теории и технологии инновационных процессов получения и обработки изделий из перспективных, композиционных и наноструктурных материалов» под руководством профессора, доктора технических наук Чукина М.В. совместно со специалистами ОАО «Мотовилихинские заводы» (г. Пермь) реализуется комплексный проект по организации малотоннажного производства наноструктурированных заготовок из многофункциональных сплавов инварного класса нового поколения. Научные разработки по проекту осуществляются на базе НИИ «Наносталей» МГТУ им. Г.И. Носова с применением современного исследовательского оборудования. Проект реализуется в рамках Постановления Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. №218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства» (Договор с Минобрнауки России от 12 февраля 2013 г. № 02.G25.31.0040). Общая стоимость проекта за счет средств субсидий составляет 150 млн руб. Разрабатываемая наукоемкая продукция ориентирована на малотоннажное серийное производство изделий для высокотехнологичной техники нового поколения. Уникальное сочетание физико-механических свойств в разрабатываемых многофункциональных инварных сплавах (например, высокая механическая прочность при аномально низком значении коэффициента температурного линейного расширения) открывает широкие перспективы применения изделий из таких материалов в различных отраслях мировой экономики.

УДК 669.018.58.017

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ ВЫСОКОПРОЧНЫХ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СПЛАВОВ ИНВАРНОГО КЛАССА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ*

Чукин М.В.¹, Голубчик Э.М.¹, Гун Г.С.¹, Копцева Н.В.¹, Ефимова Ю.Ю.¹, Чукин Д.М.¹, Матушкин А.Н.²

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия

² Мотовилихинские заводы, г. Пермь, Россия

Аннотация. В настоящее время для разработки техники нового поколения широкую востребованность получают материалы на базе многофункциональных сплавов с особыми физико-механическими свойствами. Одним из таких материалов являются инварные сплавы с минимальным тепловым расширением и повышенным уровнем механических свойств, в частности прочности (σ_b) и твердости (HV). Такие материалы необходимы для создания компонентов навигационных систем (акселерометры, гироскопы), датчиков малых перемещений, лазерной техники (юстировочные узлы, зеркала), антенн, волноводов и т.д. Представлены результаты комплексных исследований инновационных высокопрочных многофункциональных сплавов инварного класса. Показано влияние режимов термической обработки на формирование структуры и физико-механических свойств исследуемых сплавов на примере железоникелевых композиций, легированных углеродом, кобальтом и ванадием. Применительно к условиям ОАО «Мотовилихинские заводы» разработана базовая промышленная технология изготовления наноструктурированных заготовок из многофункциональных сплавов нового поколения, обеспечивающая достижение повышенного уровня механической прочности ($\sigma_b \approx 1100$ МПа) и аномально низких значений коэффициента термического линейного расширения ($\text{ТКЛР} \leq 1 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$).

Ключевые слова: многофункциональные сплавы, инвары, прочность, термдеформационное упрочнение, температурный коэффициент линейного расширения, Gleeble 3500.

Введение

В 2013 г. коллективом ученых ФГБОУ ВПО «МГТУ» совместно со специалистами ОАО «Мотовилихинские заводы» (г. Пермь) начата реализация проекта по созданию мини-завода по изготовлению наноструктурированных заготовок из многофункциональных сплавов нового поколения на железоникелевой основе, обладающих минимальным значе-

нием температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) и высоким уровнем механических свойств [1-3].

Рост мировой потребности различных отраслей промышленности в подобных сплавах обусловлен тем, что на сегодняшний день практически исчерпаны как возможности используемых традиционных инварных материалов, так и дальнейшее повышение качества и эксплуатационных свойств изделий на их основе. В то же время получить качественно расширенные технические характеристики изделий можно, если при их изготовлении использовать принципиально новые материалы и инновационные разработки в области технологий изготовления изделий из таких материалов. Таким примером могут служить высоко-

* Работа проведена в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения (договор №02.G25.31.0040); программы стратегического развития университета на 2012-2016 гг. (конкурсная поддержка Минобрнауки РФ программ стратегического развития ГОУ ВПО).

прочные сплавы инварного класса нового поколения, одновременно сочетающие уникальный набор физико-механических свойств высокого уровня, в том числе ферромагнитные инварные сплавы (36Н, 32НК, 32НКД, 29НК), магнитномягкие сплавы (например, 79НМ), немагнитные инварные сплавы, сплавы с высокими упругими свойствами, сплавы с высоким омическим сопротивлением, сплавы с заданными свойствами упругости и с температурно-стабильным модулем упругости (элинварные – 36НХТЮ, 36НХТЮ8М), термобиметаллы и др. Эти многофункциональные сплавы относятся к высокотехнологичным изделиям, составляющим верхний этаж мирового рынка подобных материалов [4-9].

При этом концепция создаваемого производства металлоизделий из новых высокопрочных многофункциональных материалов предусматривает получение длинномерных прутков преимущественно круглого и квадратного поперечного сечений с диаметром или стороной квадрата 6-20 мм. Разрабатываемая продукция ориентирована на серийное производство изделий для современной высокотехнологичной техники, а также техники нового поколения, используемой в авиационной и ракетно-космической отраслях промышленности, приборостроении, медицине, атомной энергетике, геодезии, судостроении, оборонной и нефтегазовой промышленности, металлургии и т.д.

Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

Для проведения исследований по разработке наноструктурированных заготовок из многофункциональных сплавов инварного класса, а также для качественной и количественной оценки различных параметров разрабатываемых материалов используется оборудование научно-исследовательского института наносталей ФГБОУ ВПО «МГТУ». Проведение научно-технических разработок по проекту производится в кооперации с профильной лабораторией одного из ведущих зарубежных вузов – Czechochowa University of Technology, факультет инженерии процессов, материалов и прикладной физики (г. Ченстохова, Польша) [10].

За основу исследования был принят многофункциональный сплав инварного класса 32НУКФ, содержащий: 32% Ni, 4,5% Co, 1,2% V и 0,5% C. Для формирования нормируемых физико-механических свойств ($TKLP \approx 0,5 \cdot 10^{-6} \div 3,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, твердость $HV \geq 310$, временное сопротивление $\sigma_B \geq 800 \text{ МПа}$) сплав подвергался термомодеформационному воздействию. При этом особое внимание на данном этапе исследования уделялось влиянию режимов термической обработки, которая заключалась в следующем:

- закалка от температуры 1200-1320°C с разной скоростью охлаждения, имитирующей охлаждение на воздухе и в масле, для получения минимального значения ТКЛР;

- нагрев до температуры $\approx 650^\circ\text{C}$ с выдержкой в течение 1 ч и охлаждением, имитирующем охлажде-

ние на воздухе, что обеспечивает стабильность ТКЛР при дальнейшем технологическом нагреве до указанной температуры;

- отпуск при температуре 300°C с выдержкой в течение 1 ч и последующим охлаждением;

- старение при температуре 80°C в течение 48 ч для повышения стабильности размеров изделий в течение длительного времени.

Физическое моделирование указанных процессов термической обработки реализовывалось на исследовательском комплексе Gleeble 3500 на образцах диаметром 10 мм и длиной 80 мм [11]. Нагрев осуществлялся прямым пропусканием тока, что позволяло создать заданную скорость до 10000°C/с и/или поддерживать постоянную равновесную температуру. После каждой стадии термической обработки производилось определение ТКЛР с помощью стандартного модуля Pocket Jaw комплекса. В качестве измерительного прибора использовался высокоточный дилатометр, входящий в состав комплекса, при этом точность измерения геометрических параметров составляет 0,4 мкм. Термический режим проведения испытаний в соответствии с ГОСТ 14080-78 сводился к нагреву со скоростью 3°C/мин до температуры 150°C, выдержке при этой температуре в течение 20 мин и охлаждению со скоростью 10°C/мин. Во время испытания дилатометр вел запись данных по изменению линейных размеров образца, которые анализировались при помощи стандартного программного пакета Origin®, встроенного в систему Gleeble 3500, обладающего математическими функциями для анализа данных. Полученная информация представлялась в виде графика зависимости удлинения от времени, по которому и определялся ТКЛР.

Для микроанализа по стандартной методике изготавливались микрошлифы с использованием запрессовки в смолу «Transoptic» на автоматическом прессе Simplimet 1000 на линии пробоподготовки фирмы Buehler. Для выявления микроструктуры поверхность шлифов подвергалась травлению в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте методом погружения полированной поверхности в ванну с реактивом.

Структура была исследована на оптическом микроскопе Meiji Techno при увеличениях от 50 до 1000 крат с использованием системы компьютерного анализа изображений Thixomet PRO, а при увеличениях более 1000 крат – методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) во вторичных и упругоотраженных электронах с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM 6490 LV. Микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) проводился с использованием приставки к сканирующему микроскопу – системы INCA Energy. Микротвердость оценивалась методом вдавливания алмазной пирамиды на твердомере Buehler Micromet в соответствии с ГОСТ 9475-76.

Результаты исследования и их обсуждение

Характерная микроструктура исследованного инварного сплава, полученная при моделировании полного цикла описанной термической обработки, представлена на рис. 1.

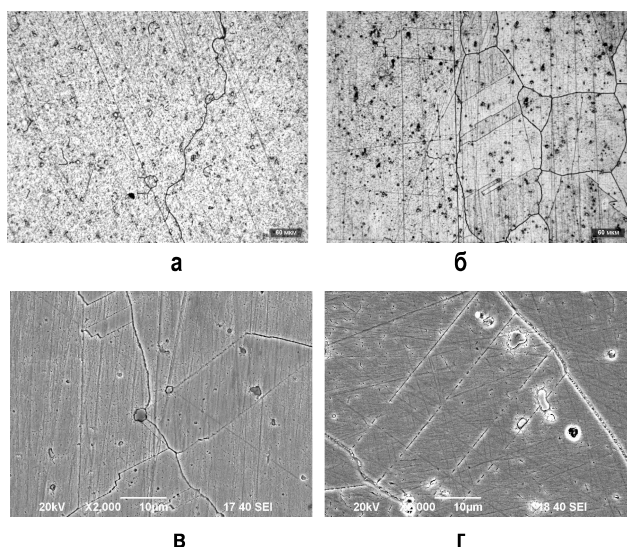


Рис. 1. Структура высокопрочного инварного сплава после полного цикла термической обработки: закалка от 1200°C в масле (а – х 200, в – РЭМ); закалка от 1320°C на воздухе (б – х200, г – РЭМ)

Структура представляет собой гетерогенную систему из зерен различного размера, дисперсных включений и более крупных частиц. Дисперсные включения размером от 60 до 130 нм и более крупные

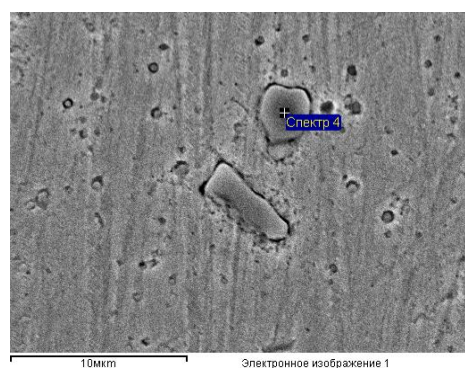
частицы размером 300–420 нм достаточно равномерно распределены по всему сечению образца (рис. 1, а, б). В зернах матрицы обнаруживаются двойники (рис. 1, в, г). При этом самые крупные частицы имеют размеры в поперечнике до 2 мкм и в длину до 5 мкм и располагаются преимущественно на границах зерен или двойников (см. рис. 1, г).

Результаты микрорентгеноспектрального анализа МРСА позволили идентифицировать фазовый состав сплава (рис. 2).

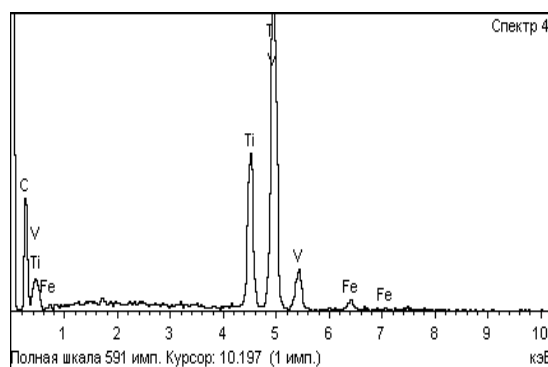
В матрице микроструктуры образцов, обработанном по разным режимам, обнаруживаются Fe, Ni, Co и C (рис. 2, а, б), что позволяет идентифицировать ее как γ -твердый раствор. В дисперсных включениях и частицах присутствуют V (~50%), Ti (~14%) и C (рис. 2, в, г), что позволяет идентифицировать эти фазы, как карбиды типа (V,Ti)C.

Твердость сплава, в котором была смоделирована закалка от 1320°C на воздухе, составила HV 378 и оказалась выше твердости сплава, в котором была смоделирована закалка от 1200°C в масле – HV 311 (что ориентировочно соответствует временному сопротивлению $\sigma_B \approx 1260$ МПа и $\sigma_B \approx 1030$ МПа).

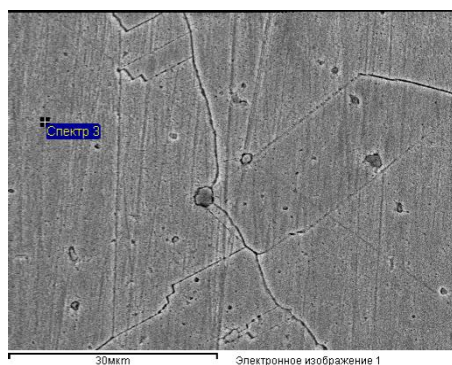
Полученные значения ТКЛР на различных стадиях термической обработки инварного сплава типа 32НУКФ в процессе осуществления физического моделирования в условиях Gleeble 3500 представлены на рис. 3.



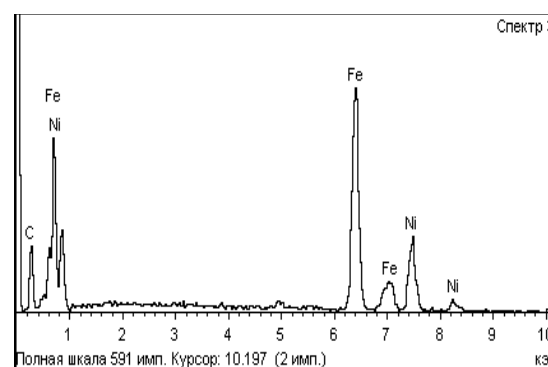
а



б



в



г

Рис. 2. Электронное изображение исследуемых участков микроструктуры (а, в) и характеристические спектры, снятые с частиц (б) и матрицы (г) микроструктуры после стабилизирующего старения при 80°C сплава, первоначально закаленного от 1200°C в масле

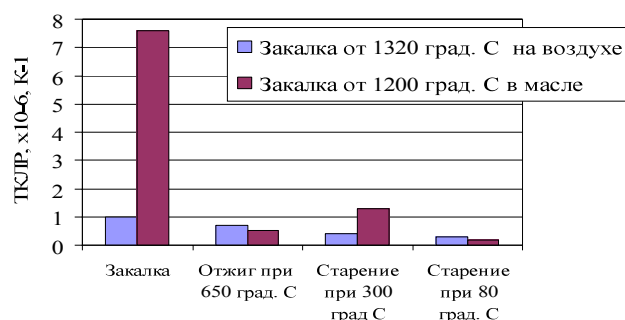


Рис. 3. Значения ТКЛР на различных этапах термической обработки

Анализ научно-технической литературы по вопросам технологий производства инварных сплавов, а также результаты проведенных комплексных исследований позволили разработать принципиальную технологическую схему изготовления наноструктурированных заготовок из исследуемых высокопрочных многофункциональных сплавов инварного класса применительно к условиям промышленного производства ОАО «Мотовилихинские заводы» (рис. 4).



Рис. 4. Базовая технологическая схема изготовления наноструктурированных заготовок из высокопрочных многофункциональных сплавов со специальными свойствами

Выводы

В ходе проведенных комплексных исследований по влиянию режимов термдеформационной обработки на уровень физико-механических свойств высоко-

прочных многофункциональных сплавов инварного класса нового поколения были выявлены особенности формирования структуры инварного сплава типа 32НУКФ, а также спроектирована базовая опытно-промышленная технология изготовления наноструктурированных заготовок из данных материалов, обеспечивающая сочетание высоких прочностных характеристик с аномально низкими значениями ТКЛР.

Список литературы

- Освоение новых технологий производства многофункциональных сплавов инварного класса с повышенными эксплуатационными свойствами / Колокольцев В.М., Чукин М.В., Голубчик Э.М., Родионов Ю.Л., Бухвалов Н.Ю. // *Металлургические процессы и оборудование*. 2013. №3. С. 47-52.
- Разработка композиций многофункциональных сплавов инварного класса с расширенными эксплуатационными характеристиками / Чукин М.В., Голубчик Э.М., Кузнецова А.С., Родионов Ю.Л., Кормс И.А., Касаткин А.В., Подузов Д.П. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2013. №3. С. 62-66.
- Организация малотоннажного производства наноструктурированных заготовок из многофункциональных сплавов со специальными свойствами / Колокольцев В.М., Чукин М.В., Гун Г.С., Бухвалов Н.Ю., Голубчик Э.М., Кузнецова А.С., Пустовойт К.С. // *Труды IX конгресса прокатчиков*. Т. 1. Череповец: ФГБОУ ВПО ЧГУ, 2013. С. 248-251.
- Высокопрочные инварные сплавы / Родионов Ю.Л., Щербинский Г.В., Максимова О.П., Юдин Г.В. // *Сталь*. 2000. №5. С. 76-80.
- Rodionov Y.L., Mogutnov B.M., Shaposhnikov N.G., Korms I.A., Pozdnyakov V.A., Mishanin S.V., Malinov V.I. Alloys with thermal expansion matching to electrolyte materials for solid oxide fuel cells // *International Journal of Materials Research*. July, 2010, pp. 907-913.
- Silman G.I. Compilative Fe-Ni phase diagram with author's correction / *Metal Science and Heat Treatment*. July, 2012, vol. 54, no. 3-4, pp.105-112.
- Grachev S.V., Filippov M.A., Chemen-ski V.I., Kharchuk M.D., Konchakovskii I.V., Zhilin A.S., Tokarev V.V., Nikiforova S.M. Thermal properties and structure of cast carbon-containing invar and superinvar alloys after two-stage annealing // *Metal Science and Heat Treatment*. vol.55, no.3-4, July, 2013, pp. 124-128.
- Chukin M.V., Korchunov A.G., Gun G.S., Polyakova M.A., Koptseva N.V., Nanodimensional structural part formation in high carbon steel by thermal and deformation process // *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2013. №5. P. 33-36.
- Перспективы производства высокопрочной стальной арматуры из высокоуглеродистых марок стали / Чукин М.В., Гун Г.С., Корчунов А.Г., Полякова М.А. // *Черные металлы*. 2012, дек. С. 8-15.
- Реализация проекта малотоннажного производства наноструктурированных заготовок из многофункциональных сплавов со специальными свойствами / Чукин М.В., Гун Г.С., Голубчик Э.М., Кузнецова А.С., Бухвалов Н.Ю. // *XIV International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering»*. A collective monograph edited by prof. dr hab inz. Henrek Dyja, dr hab. inz. Anna Kawalek, prof. PCz. Chapter 1. Series: Monografie Nr 24. Polish. Czestochowa, 2013. С. 374-379.
- Чукин Д.М., Ишимов А.С., Жеребцов М.С. Использование комплекса Gleeble 3500 для анализа фазовых превращений в стали эвтектоидного состава, микролегированной бором // *Обработка сплошных и слоистых материалов: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. М.В. Чукина*. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. Вып. 38. С. 53-57.

THE STUDY OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF HIGH-STRENGTH ALLOYS OF INVAR ALL-IN-ONE-GENERATION CLASS

Chukin Mihail Vitalevich – D.Sc. (Eng.), Professor, First Vice-Rector-Vice Rector for Science and Innovation, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: m.chukin@mail.ru.

Golubchik Eduard Mikhailovich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: golub66@mail.ru.

Gun Gennadij Semenovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Advisor to the Rector, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: goon@magtu.ru.

Koptseva Natalia Vasilyevna – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: koptsev2002@mail.ru.

Efimova Yuliya Yuryevna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: jefimova78@mail.ru.

Chukin Dmitriy Mikhajlovich – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia.

Matushkin Aleksey Nikolaevich – Director of the Plant of Precision Alloys, OJSC Motovilikhinskiye zavody, Perm, Russia.

Abstract. Materials on the base of multifunctional alloys with the special physical and mechanical properties for developing the equipment of new generation are in high demand at present. Among these materials are Invar alloys with the minimum thermal expansion and the increased level of mechanical properties, in particular, strength ((c) hardness (HV)). Such materials are necessary for creating the components of navigation systems (accelerometers, gyroscopes), sensors of small displacements, laser technology (adjustment units, mirror), antennas, waveguides, etc. The results of complex research of innovative high-strength multifunctional invar class alloys are presented. The effect of thermal treatment on the formation of structure and physical and mechanical properties of alloys in terms of iron nickel alloys, carbon, cobalt and vanadium is shown. Relating to the conditions of OJSC Motovilikhinskiye zavody the base industrial technology of the production of the nano-structured billets of the multifunctional alloys of new generation has been developed. This technology ensures to achieve the increased level of mechanical strength ($\sigma_s \approx 1100$ MPa) and anomalously low values of the thermal linear expansion coefficient ($\leq 1 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$).

Keywords: feature-rich alloys, high-strength invar, durability, treatment, deformation, Gleeble 3500.

References

- Kolokoltsev V.M., Chukin M.V., Golubchik E.M., Rodionov Yu.L., Bukhvalov N.Yu. Osvoenie novykh tekhnologiy proizvodstva mnogofunktsional'nykh splavov invarnogo klassa s povyshennymi ekspluatatsionnymi svoystvami [Development of new technologies for the production of multifunctional alloy invarnogo class with elevated performance properties]. *Metallurgicheskie processy i oborudovanie* [Metallurgical processes and equipment]. 2013, no. 3, pp. 47-52.
- Chukin M.V., Golubchik E.M., Kuznetsova A.S., Rodionov Yu.L., Korms I.A., Kasatkin A.V., Poduzov D.P. Razrabotka kompozitsiy mnogofunktsional'nykh splavov invarnogo klassa s rassirennymi ekspluatatsionnymi harakteristikami. [Development of multifunctional alloy invarnogo class compositions with enhanced performance]. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 3, pp. 62-66.
- Kolokoltsev V.M., Chukin M.V., Gun G.S., Bukhvalov N.Yu., Golubchik E.M., Kuznetsova A.S., Pustovoyt K.S. Organizatsiya malotonnazhnogo proizvodstva nanostrukturirovannykh zagotovok iz mnogofunktsional'nykh splavov so special'nymi svoystvami [Organization of small tonnage production of multifunctional nanostructured alloys with special properties]. *Trudy IX kongressa prokatchikov* [Proceedings of the IX Congress rolling]. vol. 1. Cherepovets, RUSSIAN STATE UNIVERSITY CSU. 2013, pp. 248-251.
- Rodionov Yu.L., Serbedinskij G.V., Maksimova O.P., Yudin V.I. Vysokoprochnyye invarnye splavy [High-strength alloys /invar]. *Stal'* [Steel]. 2000, no. 5, pp. 76-80.
- Rodionov Y.L., Mogutnov B.M., Shaposhnikov N.G., Korms I.A., Pozdnyakov V.A., Mishanin S.V., Malinov V.I. Alloys with thermal expansion matching to electrolyte materials for solid oxide fuel cells. *International Journal of Materials Research*. July, 2010, pp. 907-913.
- Silman G.I. Compilative Fe-Ni phase diagram with author's correction. *Metal Science and Heat Treatment*, July, 2012, vol. 54, no. 3-4, pp. 105-112.
- Grachev S.V., Filippov M.A., Chermenskii V.I., Kharchuk M.D., Konchakovskii I.V., Zhilin A.S., Tokarev V.V., Nikiforova S.M. Thermal properties and structure of cast carbon-containing invar and superinvar alloys after two-stage annealing. *Metal Science and Heat Treatment*, July, 2013, vol. 55, no. 3-4, pp. 124-128.
- Chukin M.V., Korchunov A.G., Gun G.S., Polyakova M.A., Koptseva N.V., Nanodimensional structural part formation in high carbon steel by thermal and deformation process. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 5, pp. 33-36.
- Chukin M.V., Gun G.S., Korchunov A.G., Polyakova M.A. Perspektivy proizvodstva vysokoprochnoy stal'noy armatury iz vysokouglerodistykh marok stali [Prospects of production of high-strength steel reinforcement of high-carbon steel]. *Chernye metally* [Non-ferrous metals]. December, 2012, pp. 8-15.
- Chukin M.V., Gun G.S., Golubchik E.M., Kuznetsova A.S., Bukhvalov N.Yu. Realizatsiya proekta malotonnazhnogo proizvodstva nanostrukturirovannykh zagotovok iz mnogofunktsional'nykh splavov so special'nymi svoystvami [Realization of the project of small tonnage production of multifunctional nanostructured alloys with special properties]. *XIV International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering. A collective monograph edited by Prof. dr H.A.B. inz. Henrek Dyja, dr H.A.B. inz. Anna Kawalek, Prof. PCz. Chapter 1. Series: Monografie Nr 24. Polish. Czestochowa*, 2013, pp. 374-379.
- Chukin D.M., Ishimov A.S., Jerebcov M.S. Ispol'zovanie kompleksa Gleeble 3500 dla analiza fazovykh prevrasenij v stali evtektoidnogo sostava, mikrolegirovannoj borom [Gleeble 3500 using complex analysis of phase transformations in steel evtektoidnogo, mikrolegirovannoj with boron]. *Obrabotka splosnykh i sloistykh materialov: mezhvuz. sb. nauch. tr. / Pod red. M.V. Chukina* [Processing of solid and laminated materials: Proceedings of the collected works. Ed. M.V. Chukin]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, no. 38, pp. 53-57.