

УДК 669.187.2

С.А. Крылов¹, А.Г. Евгенов¹, А.И. Щербаков¹, А. А. Макаров¹**НОВАЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ ПЕЧЬ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ДЭШП-0,1:
ОСВОЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-4-4

В мире активно развивается металлургия под давлением (МД), изучается влияние повышенного давления на процессы легирования, выплавки и кристаллизации слитка. Отмечается положительный экономический эффект от применения технологий МД. Технологии МД раскрывают возможности создания новых материалов и легирования элементами, применение которых в традиционных металлургических процессах невозможно. Во ФГУП «ВИАМ» впервые в стране изготовлена и запущена в эксплуатацию новая электрошлаковая печь под давлением ДЭШП-0,1 полупромышленного типа. Приведены конструктивные данные и рассмотрены основные направления практического использования печи и полученных на ней материалов.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 8.2. «Высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие свариваемые стали с высокой вязкостью разрушения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: металлургия под давлением, компрессионный переплав, электрошлаковый переплав, конструкция печи, давление, лигатура с азотом, макроструктура, индукционная плавка, сверхравновесное содержание азота, твердый раствор, газовые поры, феррит, мартенсит, аустенит.

Pressure metallurgy (MD) is actively developed in the world, the effect of higher pressure on the process of alloying, melting, crystallization of ingot is studied. A positive economic effect of MD technologies is noted. MD technologies open possibilities of creating new materials and alloying elements, the use of which in conventional metallurgical processes is impossible. FSUE «VIAM» for the first time in the history of our country produced and put into operation a new pressure electroslag furnace PESR-0,1 of semiindustrial type. The paper presents design data of the furnace, the basic ways of its practical use and materials received with its use.

Work is executed within implementation of the complex scientific direction 8.2. «High-strength structural and corrosion-resistant welded steels with high fracture toughness» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: pressure metallurgy, compression remelting, PESR, furnace design, pressure, addition alloy with nitrogen, macrostructure, induction melting, superequilibrium nitrogen content, solid solution, gas pores, ferrite, martensite, austenite.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

В настоящее время высокоазотистые стали достаточно широко распространены в различных отраслях промышленности. Дальнейшее развитие получают стали со сверхравновесным содержанием азота. Известно, что азот является более эффективным

упрочнителем твердого раствора, чем углерод, и при более высокой растворимости (при одинаковой прочности) снижает склонность к выпадению упрочнителей [1, 2]. Однако максимальное количество азота, которое может быть введено в состав сплава, ограничивается его низкой растворимостью при температуре литья и атмосферном давлении. Хотя растворимость при этих условиях очень низкая, уровень азота $>1\%$ (по массе) может быть получен при введении различных легирующих элементов и при высоком давлении плавления. Одним из способов получения сталей со сверхравновесным содержанием азота является обеспечение необходимого давления над расплавом.

При выплавке сталей и сплавов широко применяются печи, обеспечивающие давление от 10^{-6} мм рт. ст. до 1 ат (от $133,3 \cdot 10^{-6}$ Па до 0,1 МПа), что охватывает очень узкий интервал использования такого важного термодинамического фактора, как давление. Мировая практика показывает, что использование печей, в которых реализована возможность управления давлением в диапазоне от 1 до 100 ат (от 0,1 до 10 МПа), открывает широкий спектр направлений для исследования. Технологии производства стали под давлением позволяют экономить ряд дорогих легирующих элементов, раскрывают возможность легирования такими элементами, как азот, кальций, марганец, магний и другие. Особый интерес представляет легирование азотом, в частности получение высокоазотистых сталей со сверхравновесным содержанием азота.

Стали со сверхравновесным содержанием азота находят все более широкое применение в различных отраслях: в медицине, в химической, пищевой и энергетической промышленности, а также судостроении и авиации. Очень перспективным направлением является применение сталей мартенситного класса со сверхравновесным содержанием азота: 0,5–0,6% и более.

Одним из наиболее эффективных направлений использования такой технологии является переплав сталей и сплавов в электрошлаковых печах под давлением (ЭШПД), так как повышенное давление может быть реализовано при образовании сравнительно небольшого объема жидкого металла. Несмотря на широкое применение электрошлаковых печей (ЭШП) в отечественной практике, печей с использованием избыточного давления в процессе переплава до сих пор не было [3, 4].

За рубежом применяются печи ЭШПД – так, в Германии (г. Эссен) в печи с массой слитка до 20 т (кристаллизатор высотой – до 1000 мм, давление – до 40 бар (4 МПа) производят ряд сталей, легированных азотом, например сталь марки P900, из которой изготавливают бандажные кольца турбогенераторов. Помимо этого сталь опробована в Швейцарии для изготовления железнодорожных колес [5–7]. Испытания показали, что после 50 тыс. км пробега твердость обода повысилась с 23 ± 2 HRC до 47 ± 2 HRC, что не снизило овализацию колес, но снизило уровень шума вследствие хороших демпфирующих свойств материала, а также снизился износ – с 1 мм на 12 тыс. км до 1 мм на 16 тыс. км. Стали мартенситного класса типа Cronidur 30, легированные азотом, применяются для деталей бензонасосов и медицинского инструмента [8].

Перспективным направлением является создание экономнолегированных сталей нового класса, содержащих в качестве легирующего элемента-упрочнителя твердого раствора азот в сверхравновесном количестве, способного частично или полностью заменить никель, молибден, кобальт и обеспечить высокую коррозионную стойкость сталей с прочностью до 2000 МПа [9–11].

В настоящее время наиболее широко изучены коррозионностойкие азотсодержащие стали аустенитного класса, обладающие высокой коррозионной стойкостью и способные растворить до 0,5–0,6% азота, но прочность этих сталей составляет 1000 МПа [12–14]. Более высокую прочность способны обеспечить стали, характеризующиеся мартенситной и аустенито-мартенситной структурой.

Коррозионностойкие стали мартенситного (с содержанием азота – до 0,1%) и аустенито-мартенситного (переходного) классов (с содержанием азота – до 0,15%)

выплавляют в открытых индукционных или дуговых печах при атмосферном давлении. Известно, что растворимость азота пропорциональна квадратному корню из давления газа (N_2) над расплавом. Для двухатомного газа, такого как азот, растворимость реакции в жидком чугуне обычно может быть записана как $N_2^{1/2} = [N]_{Fe}$.

Дальнейшее увеличение содержания азота (сверхравновесное содержание) в стали, находящегося в виде твердого раствора, возможно только при использовании азота под давлением 5–40 бар (0,5–4 МПа) [15].

Использование новой электрошлаковой печи под давлением ДЭШП-0,1 (до 30 бар (3 МПа)) позволит обеспечить сверхравновесное содержание азота в сталях и открыть перспективные направления применения новых материалов.

Помимо перечисленных перспективным направлением является использование указанной печи без давления (возможен переplав в атмосфере нейтрального газа) при переplаве жаропрочных сплавов с целью повышения технологической пластичности и снижения уровня неметаллических включений.

Материалы и методы

В качестве исследуемых материалов использованы сталь 45 и коррозионностойкая сталь ВНС-73, выплавленная в открытой индукционной печи:

Показатель	Сталь 45	Сталь ВНС-73
Содержание азота в исходном металле, %	0,009	0,08
Предварительная растворимость азота при комнатной температуре, %	0,02	0,15

При переplаве использовали шлак марки АНФ-6, азот технически чистый в баллонах, в качестве запальной смеси – алюминиево-магниеую пудру марки ПАМ-4.

Результаты и обсуждение

Азот вводили в расплав при помощи азотированного феррохрома марки ФХН-8 (размер фракций – от 2 до 15 мм). Полученные слитки анализировали по химическому составу, определяли содержание азота по высоте слитков в зависимости от давления азота в печи, исследовали макроструктуру по сечению слитков.

Конструктивные возможности печи под давлением ДЭШП-0,1

В 2015 г. в ВИАМ совместно с ООО «НПФ Комтерм» разработана, смонтирована и запущена в производство электрошлаковая печь под давлением ДЭШП-0,1. Внешний вид печи показан на рис. 1.

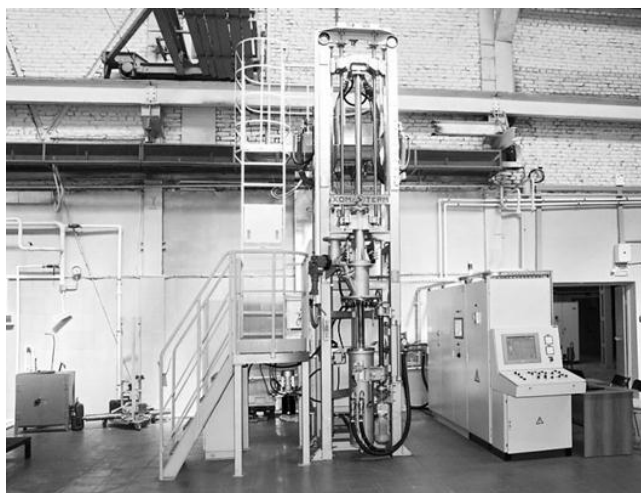


Рис. 1. Электрошлаковая печь под давлением ДЭШП-0,1

Печь предназначена для проведения исследований и разработки новых высокопрочных коррозионностойких сталей, в том числе с повышенным и сверхравновесным содержанием азота, с помощью метода электрошлакового переплава жаропрочных никелевых деформируемых сплавов, сплавов на основе титана и кобальта, технологии их производства, а также для изготовления и поставки опытно-промышленных партий указанных материалов.

Технические возможности печи под давлением ДЭШП-0,1 (см. таблицу):

- электрошлаковый переплав в контролируемой, в том числе нейтральной атмосфере;
- электрошлаковый переплав при контролируемом давлении – до 30 бар (3 МПа);
- электрошлаковый переплав расходуемого электрода в цилиндрических стационарных кристаллизаторах различного диаметра и длины;
- автоматизированное управление процессом электрошлакового переплава.

Технические характеристики печи под давлением ДЭШП-0,1

Характеристика	Значения характеристики
Размеры слитков, мм:	
– диаметр (средний по высоте)	110; 130; 160
– максимальная длина	1000
Максимальная масса слитка, кг	100
Размеры расходуемого электрода, мм:	
– максимальный диаметр	100
– максимальная длина	1500
Максимальная масса электрода, кг	100

Проведенные горячие испытания предусматривали комплексную проверку работоспособности механизмов и систем печи, оптимизацию отдельных параметров функционирования печи ДЭШП-0,1 для подтверждения ее готовности к работе в производственных условиях.

С целью обучения персонала цеха и получения максимально возможной массы слитка совместно с ООО «НПФ Комтерм» провели испытания в печи ДЭШП-0,1 на 8 плавках, полученных в кристаллизаторах диаметром 110, 130 и 160 мм. В качестве расходуемых электродов использовали кованные электроды из стали 45 и высокопрочной коррозионностойкой стали ВНС-73. Выплавку слитков проводили с использованием ручного и автоматического режима управления.

Подготовка печи к плавке включала:

- подготовку расходуемого электрода (очистка поверхности электрода от грязи и масел);
- подготовку затравки (очистка поверхности затравки от грязи и масел) и стартового пакета (укладка стружки из материала электрода и магнийсодержащего порошка);
- заполнение бункеров дозаторов флюсом и добавками.

Плавки проводили согласно заданному технологическому режиму. Для проверки работоспособности автоматического режима перед началом плавки задавали параметры ведения плавки для автоматического режима. В процессе плавки для проверки работоспособности ручного режима делали переходы на ручной режим и обратно, придерживаясь технологических параметров плавки.

В ходе проведения плавки проверяли работоспособность источника питания марки АРШ-300 (сила тока в процессе плавки – от 0 до 4,3 кА, напряжение – от 0 до 63 В). Контролировали значения давления (до 30 бар (3 МПа)), линейной скорости наплавления (в мм/мин) с выводом на дисплей.

При электрошлаковом переплаве сталей применяли технологический режим плавки: сила тока 2,8–3 кА; напряжение 30–36 В.

Плавку начинали без приложения давления в ручном режиме в течение 3–8 мин и далее переходили на автоматический режим управления. Типичная диаграмма процесса электрошлакового переплава под давлением показана на рис. 2.

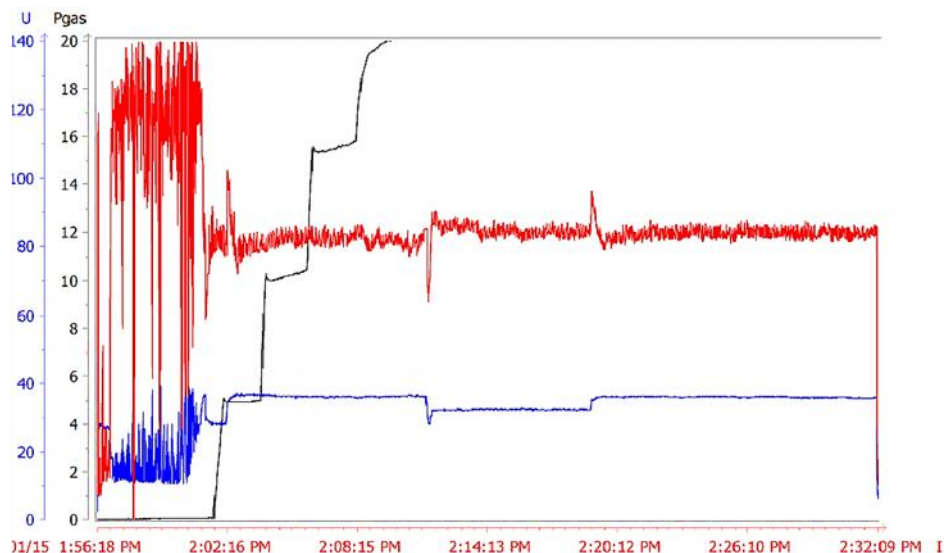


Рис. 2. Типичная диаграмма процесса электрошлакового переплава под давлением в печи ДЭШП-0,1

Флюс марки АНФ-6 с максимальным размером фракции 5 мм вводили в расплав через дозатор; азот – через второй дозатор в виде азотированного феррохрома с максимальным размером фракции – от 2 до 15 мм.

При переплаве электродов из стали 45 азот вводили в виде 10%-ного азотированного феррохрома марки ФХН-8 из расчета 250 г на 10 кг массы электрода. В ходе плавки давление повышали с 0 до 30 бар (3 МПа) с шагом в 5 бар (0,5 МПа), контролируя систему подачи, а также проводили раскисление шлака алюминием.

По окончании плавки снимали давление в печи, проводили выгрузку слитка и визуальный контроль поверхности слитка на наличие внешних дефектов, отсутствие несплошностей и цветов побежалости. Визуальный контроль не выявил внешних дефектов (рис. 3).

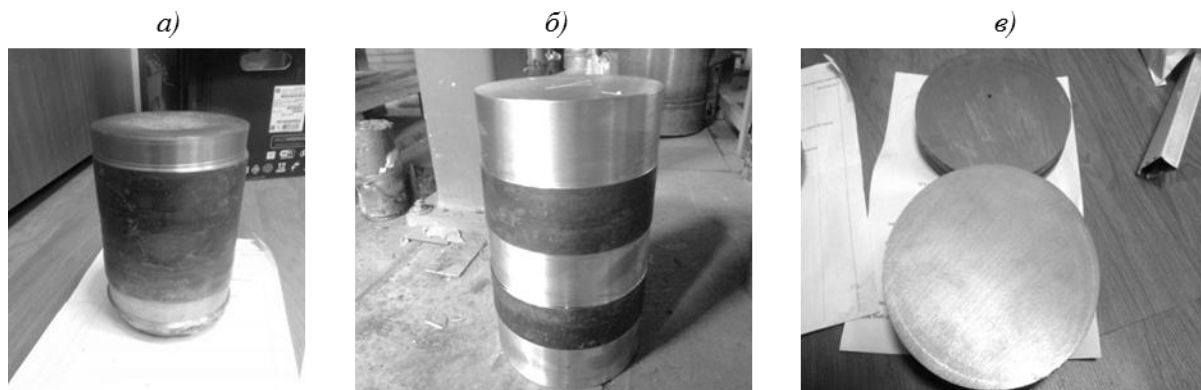


Рис. 3. Выплавленные в печи ДЭШП-0,1 слитки диаметром 110 (а) и 160 мм (б) и поперечный темплет (в) слитка $\varnothing 160$ мм (верхний – верх слитка; нижний – низ слитка)

Для определения азота в готовых слитках отбирали пробы металла из нижней, средней и верхней частей слитков. Из проб металла изготавливали образцы из трех частей: поверхности, 0,5 радиуса и из центра. Исследование показало, что азот распределяется равномерно по сечению слитка, следов остаточной газовой пористости не наблюдается.

В проведенной плавке высокопрочной коррозионностойкой стали ВНС-73 с исходным содержанием азота в количестве 0,08% дополнительно азот с лигатурой не вводили. В начале плавки давление азота не повышали, в середине плавки давление увеличивали до 10 ат (1 МПа), в конце плавки – до 25 ат (2,5 МПа). Содержание азота по высоте слитка изменилось незначительно – с 0,08 до 0,089%, что показывает невозможность дополнительного легирования азотом с помощью газовой фазы при избыточном давлении в печи до 30 ат (3 МПа).

Повышение количества азота в стали должно осуществляться дополнительным введением в расплав азотсодержащей лигатуры (рис. 4 и 5).

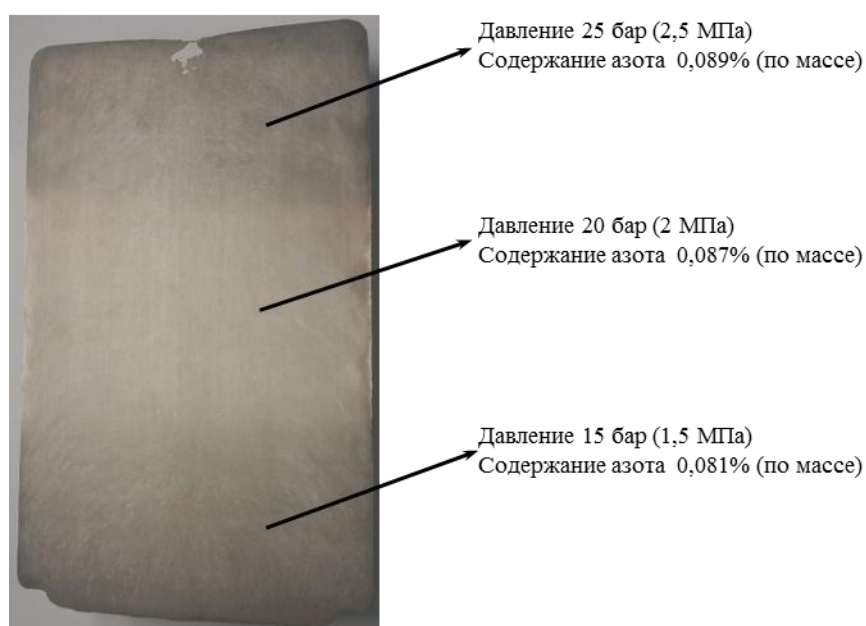


Рис. 4. Продольный темплет слитка свариваемой высокопрочной коррозионностойкой стали ВНС-73

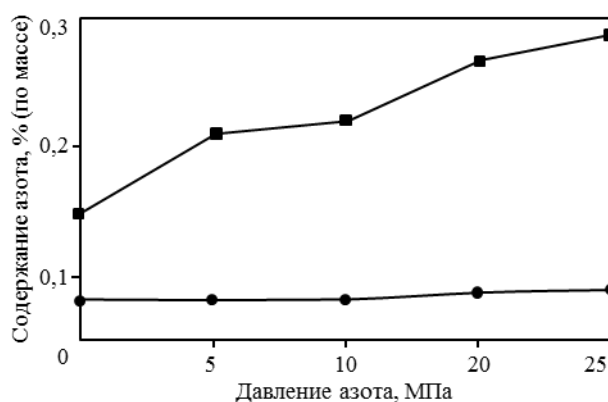


Рис. 5. Содержание азота в сталях в процессе электрошлакового переплава под давлением:
 ■ – сталь 45 с введением азотоносителя; ● – сталь ВНС-73 с содержанием азота 0,08% без введения азотоносителя

Таким образом, электрошлаковый переплав под давлением обеспечивает введение азота до 10 раз больше, чем при выплавке при атмосферном давлении. Однако требуются дополнительные исследования по введению азота в стали мартенситного и переходного класса.

Заключения

Проведенные горячие испытания с помощью электрошлаковой печи под давлением ДЭШП-0,1 позволяют сделать следующие выводы:

- печь с источником тока и контуром охлаждения, механизмом подачи электрода и выгрузки слитка, системами управления техническими газами и процессом плавки и др.
- работоспособна и готова к проведению плавки;
- проведенные плавки показали возможность вариации необходимого давления азота в процессе плавки – до 30 бар (3 МПа);
- при введении азота в виде лигатуры марки ФХН8 при избыточном давлении – до 30 бар (3 МПа) содержание азота в стали 45 повышается до 0,2% при растворимости в ней азота 0,02% (плавка №5, низ слитка); не наблюдается зависимости содержания азота в стали от давления азота в печи без введения азотсодержащих материалов;
- несмотря на повышение азота в стали 45 в 10 раз выше предела его растворимости, газовых пузырей на поверхности и в поперечном сечении слитков не наблюдается, что подтверждает наличие азота в стали в виде твердого раствора;
- необходимо проведение ряда испытательных плавки для отработки методик введения азотсодержащих элементов (хром, марганец, кремний) и необходимого давления азота для обеспечения заданного содержания азота по высоте и сечению слитка;
- необходимо продолжить исследование процесса электрошлакового переплава под давлением коррозионностойких сталей мартенситного и переходного класса с достижением максимального содержания азота.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения // *Крылья Родины*. 2012. №3–4. С. 34–38.
3. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15.
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2013. №3. С. 47–54.
5. High Nitrogen steel, HNS 90. Dusseldorf: Stahl und Eisen. 1990.
6. Poschitz I.N., Kolesov V.A. Use of High-Nitrogen non-magnetic steel for production of steel-aluminum conductor // 5th Int. Conf. High Nitrogen Steels. Espoo – Finland. 1998. P. 19.
7. Berns H. Alloy development and processing // Int. Conf. High Nitrogen Steels HNS-2004. 2004. P. 271–281.
8. Рашев Ц.В. Высокоазотистые стали. Металлургия под давлением. София: Изд-во «Проф. Марин Дринов», 1995. 272 с.
9. Тонышева О.А., Вознесенская И.М., Елисеев Э.А., Шалькевич А.Б. Новая высокопрочная экономнолегированная азотсодержащая сталь повышенной надежности // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 84–88.

10. Тоньшева О.А., Вознесенская Н.М. Перспективные высокопрочные коррозионностойкие стали, легированные азотом (сравнительный анализ) // Авиационные материалы и технологии. 2014. №3. С. 27–32.
11. Тоньшева О.А., Вознесенская Н.М., Шалькевич А.Б., Петраков А.Ф. Исследование влияния высокотемпературной термомеханической обработки на структуру, технологические, механические и коррозионные свойства высокопрочной коррозионностойкой стали переходного класса с повышенным содержанием азота // Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 31–36.
12. Блинов М.В., Банных О.А., Лукин Е.И., Костина М.В., Блинов Е.В. Влияние термической обработки и пластической деформации на структуру и механические свойства азотосодержащей стали 04Н9Х2А // Металлы. 2014. №6. С. 21–28.
13. Братухин А.Г., Демченко О.Ф., Долженков Н.Н., Кривоногов Г.С. Высокопрочные коррозионностойкие стали современной авиации. М.: МАИ, 2006. С. 112–121, 130–143.
14. Кривоногов Г.С., Каблов Е.Н. Границы зерен и их роль в охрупчивании высокопрочных коррозионностойких сталей // Металлы. 2002. №1. С. 35–45.
15. Блинов В.М., Андреев Ч., Костина М.В., Блинов Е.В. Структура и фазовый состав литых железоникелевых сплавов со сверхравновесным содержанием азота // Металлы. 2009. №4. С. 57–62.