

П.Г. Мин¹, В.В. Сидоров¹

ОПЫТ ПЕРЕРАБОТКИ ЛИТЕЙНЫХ ОТХОДОВ СПЛАВА ЖС32-ВИ НА НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОМ КОМПЛЕКСЕ ВИАМ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ ЛИТЫХ ПРУТКОВЫХ (ШИХТОВЫХ) ЗАГОТОВОК

В ВИАМ разработана ресурсосберегающая технология рафинирующего переплава в вакуумных индукционных печах всех образующихся отходов, которая позволяет из 100% отходов получать сплавы, полностью отвечающие по чистоте и свойствам требованиям действующих ТУ. Данная технология позволяет обеспечить экономию дорогих и дефицитных легирующих металлов и снизить стоимость сплавов на 30–50% без снижения их качества. Показано отрицательное влияние кремния на сплав ЖС32-ВИ.

Ключевые слова: кремний, отходы, жаропрочный сплав, вакуумная индукционная печь, прутковая заготовка, монокристалл, структура.

P.G. Min¹, V.V. Sidorov¹

THE EXPERIENCE OF GS32-VI ALLOY SCRAP RECYCLING AT THE VIAM SCIENTIFIC AND PRODUCTION COMPLEX FOR CAST BARS PRODUCTION

In VIAM was developed the resource-saving technology of refining remelting in vacuum induction furnaces of all formed scraps which allows to receive from 100% scraps the alloys completely answering on purity and properties the requirements of active specification. The given technology enables to save an expensive and deficient alloying metals and to reduce alloys costs on 30–50% without decreasing their quality. There was demonstrated the negative influencing of silicon on alloy GS32-VI.

Keywords: silicon, scrap, superalloys, vacuum induction furnace, bar stock, single crystal, structure.

¹ Федеральное 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

При производстве турбинных и сопловых лопаток ГТД и ГТУ из жаропрочных никелевых сплавов на моторостроительных заводах образуется значительное количество литейных отходов в виде литниковых чаш, питателей, коллекторов, забракованных деталей, содержащих дорогостоящие и дефицитные металлы (никель, кобальт, вольфрам, ниобий, рений, тантал, молибден и др.). В связи с необходимостью проведения ряда технологических операций при получении лопаток, при которых металл многократно подвергается высокотемпературному окислению, взаимодействует с керамикой и различными смазками, реагирует с агрессивными средами, отходы загрязнены посторонними вредными примесями (серой, кремнием, натрием, калием и др.), содержат повышенное количество оксидных и нитридных неметаллических включений [1, 2].

Наряду с повышенной загрязненностью химический состав отходов по макролегирующим элементам (алюминию, титану, ниобию, хрому) и полезным микродобавкам РЗМ (церию, иттрию, лантану) отличается от оптимального, поскольку имеет место окисление и испарение этих элементов при высокотемпературных технологических процессах.

Ежегодно на заводах по ремонту ГТД и ГТУ скапливается большое количество отходов в виде лопаток из литейных жаропрочных сплавов, которые отработали свой ресурс, непригодны для дальнейшего использования в двигателях и подлежат утилизации. Материал лопаток, длительно проработавших в продуктах сгорания топлива, загрязняется вредными примесями цветных металлов, серой, фосфором и др.

Поскольку образующиеся отходы загрязнены вредными примесями и неметаллическими включениями, то их применение при выплавке жаропрочных сплавов ограничено. По серийной технологии при плавке используется до 40% отходов, а остальные отходы, образовавшиеся на моторостроительных и ремонтных заводах, находятся на ответственном хранении либо сдаются на предприятия Вторцветмета по заниженным ценам для извлечения только никеля и кобальта, при этом остальные компоненты сплавов терялись. Таким образом, заводы, выпускающие газотурбинные двигатели и производящие их ремонт, и государство несли большие убытки, так как вторично не использовались или просто пропадали дорогостоящие металлы, содержащиеся в отходах.

С учетом высокой стоимости литейных жаропрочных сплавов, содержащих дорогостоящие металлы, возникла необходимость решения вопросов по рациональной и комплексной переработке всех видов отходов.

С использованием новейших достижений в области вакуумной металлургии жаропрочных никелевых сплавов и результаты научно-исследовательских работ, проведенных в ВИАМ, разработана ресурсосберегающая технология рафинирующего переплава всех видов образующихся отходов в вакуумных индукционных печах, которая позволяет из 100% отходов получать сплавы, полностью отвечающие по чистоте и свойствам требованиям действующих ТУ и не уступающие сплавам, изготовленным из свежих шихтовых материалов [3–5]. В табл. 1 приведены содержание газов и свойства сплава ЖС32-ВИ, выплавленного с использованием 100% отходов [6, 7].

Таблица 1

Содержание газов и свойства сплава ЖС32-ВИ, выплавленного с использованием 100% отходов

Технология выплавки (количество отходов)	Содержание газов, % (по массе)		Длительная прочность τ , ч (при 975°C, $\sigma=300$ МПа)	Предел выносливости рабочих лопаток σ_{-1} , МПа (при 20°C, $N=2 \cdot 10^7$ цикл)
	O ₂	N ₂		
100% рафинированных отходов	0,0009	0,0007	79	190
По ТУ 1-92-177-91	≤0,002	≤0,002	≥40	Норма 190

На рис. 1 показаны результаты испытаний на длительную прочность при температурах 900 и 1000°C сплава ЖС32-ВИ (МОНО <001>), выплавленного с использованием 100% кондиционных литейных отходов, в сравнении с паспортными характеристиками сплава, выплавленного с использованием 100% свежих шихтовых материалов. Видно, что значения долговечности сплава ЖС32-ВИ, выплавленного с использованием 100% отходов, соответствуют паспортным характеристикам сплава.

Данная технология позволяет создать замкнутый цикл возврата дорогих и дефицитных легирующих металлов в производство, обеспечить их экономию и снизить стоимость сплавов на 30–50% без снижения их качества. Разработанная технология отличается новизной и оригинальностью, не имеет отечественных аналогов, защищена Патентом РФ.

Разработанная технология по переработке отходов литейных жаропрочных сплавов была реализована на созданном в ВИАМ научно-производственном комплексе по изготовлению литых прутковых (шихтовых) заготовок жаропрочных никелевых

сплавов, предназначенных для литья лопаток с равноосной, направленной и монокристаллической структурой. Данный комплекс включает в себя ряд отдельных участков, оборудованных современным производственным, аналитическим и испытательным оборудованием, что позволяет обеспечить качество изготавливаемой продукции на уровне требований мировых стандартов [8, 9].

Технологическая схема получения литых прутковых (шихтовых) заготовок сплава ЖС32-ВИ включает первоначальный входной контроль шихтовых материалов и отходов на соответствие их требованиям ГОСТ и ТУ, выплавку сплава в вакуумной индукционной печи с применением разработанных технологических процессов и разливу через пенокерамический фильтр в стальные трубы с утеплительными вставками [10]. Для извлечения прутковых заготовок специально спроектирован и изготовлен гидравлический пресс с рабочим усилием 100 тс. После подрезки головной и донной части прутковых заготовок их поверхность подвергают механической обработке на обдирочно-шлифовальном станке, который по техническому заданию ВИАМ был спроектирован и изготовлен на Воронежском станкостроительном заводе. По сравнению с применяемой ранее токарной обработкой продолжительность механической обработки поверхности заготовок шлифованием сокращается в 20 раз, потери металла сокращаются более чем в 3 раза (с 8,0 до 2,4%) при обеспечении высокой чистоты поверхности с шероховатостью $R_z=10,0$ по ГОСТ 2789–73 [11].

Далее из порции металла от прутковой заготовки отливают контрольные образцы (с монокристаллической или направленной структурой), которые подвергают термической обработке, а затем контролируют структуру и свойства. При положительных результатах контроля химического состава и механических свойств и их соответствии действующим ТУ, прутковые заготовки передают потребителю с сертификатом качества [12].

Получить монокристаллический сплав ЖС32-ВИ с ультравысокой чистотой по примесям можно только при использовании для их производства самого современного плавильного оборудования. Такое оборудование установлено и успешно работает в ВИАМ – это промышленная вакуумная индукционная печь VIM-50 производства фирмы «ALD Vacuum Technologies» с тиглем емкостью 350 кг (рис. 2), которая позволяет реализовать новейшие разработки ВИАМ в области производства жаропрочных сплавов. Печь оснащена компьютерным управлением, позволяющим контролировать технологический процесс выплавки жаропрочных сплавов на всех его этапах; оборудованием пробоотбора металла по ходу плавки и дозатором для присадки легирующих добавок, что позволяет поддерживать состав выплавляемых сплавов в узких пределах легирования; системой фильтрации металла при его сливе, обеспечивающей высокую чистоту металла по неметаллическим включениям (рис. 3). Конструктивные особенности установки, система вакуумных уплотнений и высокая производительность вакуумных насосов позволяют обеспечить глубокий вакуум – до $5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. и минимальное натекание, что способствует получению готового металла с достаточно низким содержанием кислорода и азота [13].

Для улучшения поверхности прутковых заготовок, технологичности при их механической обработке и повышения выхода годного, металл разливают в калиброванные стальные трубы диаметром 90 ± 1 мм с утеплительными вставками (рис. 4). Разливка металла в полуавтоматическом режиме с использованием компьютерного программного управления позволяет максимально сократить продолжительность разливки и минимизировать неизбежные потери металла. Использование утеплительных вставок позволяет получать плотные литые заготовки и существенно сократить объем усадочной раковины [14]. Внешний вид заготовок после разливки, отрезки усадочной раковины и шлифовки поверхности показан на рис. 5.

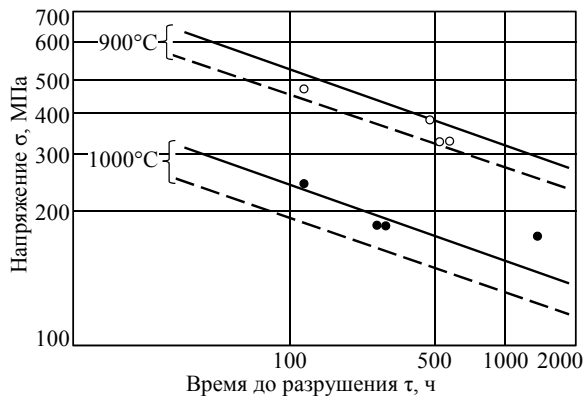


Рис. 1. Длительная прочность сплава ЖС32-ВИ (МОНО <001>), выплавленного с использованием 100% кондиционных отходов: — , - - - средние и минимальные значения по паспорту №1540 на сплав ЖС32-ВИ (100% свежей шихты)



Рис. 2. Общий вид вакуумной плавильной установки VIM-50



Рис. 3. Промежуточный ковш с установленным пенокерамическим фильтром



Рис. 4. Система разливки металла в трубы на установке VIM-50



Рис. 5. Внешний вид литых прутковых заготовок, получаемых в установке VIM-50:

1 – после разливки в трубы; 2 – после отрезки усадочной раковины; 3 – после шлифовки поверхности

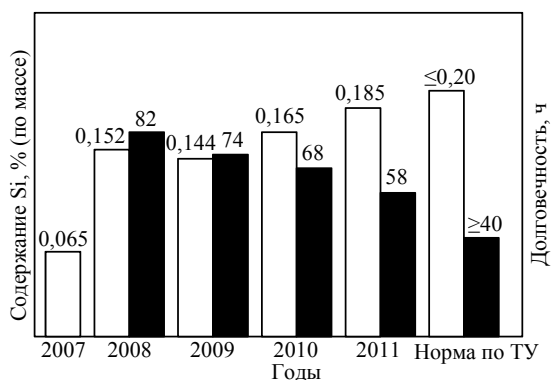


Рис. 6. Изменение содержания Si (□) и долговечности (■; при 975°C, $\sigma=300$ МПа) в сплаве ЖС32-ВИ при использовании в процессе плавки 100% литейных отходов

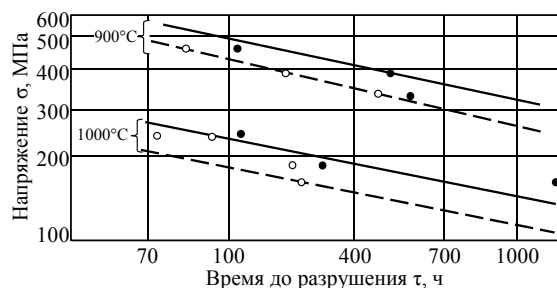


Рис. 7. Влияние 0,1 (●) и 0,2% Si (○) на длительную прочность сплава ЖС32-ВИ: —, - - - средние и минимальные значения по паспорту №1540 на сплав ЖС32-ВИ

Химический состав сплава ЖС32-ВИ в процессе плавки, а также готового металла контролируют на оптико-эмиссионном спектрометре ARL 4460; содержание кислорода, азота, серы и углерода – на анализаторах фирмы «Лесо»; содержание примесей – на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой XSeries 2.

При литье лопаток и других деталей горячего тракта ГТД и ГТУ методами направленной и монокристаллической кристаллизации содержание кремния в литейных жаропрочных сплавах увеличивается. Кремний является вредной примесью, которая понижает свойства сплавов, поэтому его содержание ограничено: в сплавах с равноосной структурой – до 0,25% (ЖС6К-ВИ, ЖС6У-ВИ, ВЖЛ12У-ВИ и др.), с направленной и монокристаллической структурой – до 0,20% (ЖС32-ВИ, ЖС26-ВИ, ЖС26У-ВИ и др.).

Источниками перехода кремния в никелевые жаропрочные сплавы являются шихтовые (при плавке) и керамические (при отливке лопаток) материалы. Основной источник поступления кремния в сплавы с равноосной структурой – металлические шихтовые материалы. Поскольку кристаллизация расплава в равноосных отливках протекает быстро, взаимодействия расплава с керамическим блоком практически не происходит.

В табл. 2 показано максимальное количество кремния, которое может поступить с шихтовыми материалами при плавке.

Таблица 2

Максимальное количество кремния, которое поступает с шихтовыми материалами при плавке

Состав сплава	Содержание Si, % (по массе)	
	в шихтовых материалах	в сплаве
65% Ni	0,002	0,0013
5% Cr	0,2	0,010
8% W	0,04	0,003
1% Mo	0,005	0,0001
9% Co	0,001	0,0001
4% Re	0,008	0,0004
4% Ta	0,02	0,0008
1,6% Nb	0,03	0,0005
6% Al	0,003	0,0002
Итого		0,016

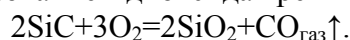
Из данных табл. 2 видно, что с шихтовыми материалами в плавку максимально поступает до 0,02% кремния.

Для сплавов с направленной и монокристаллической структурой источниками поступления кремния в сплавы являются металлические шихтовые и керамические материалы, применяемые при отливке лопаток (керамическая форма, керамический стержень и плавильный тигель).

Для составления суспензии из микропорошков электрокорунда или дистен-силлиманита применяется этилсиликат-40, который содержит 39–42% SiO₂. Для изготовления керамических форм используют гидролизованный раствор этилсиликата-40, содержащий 14–22% SiO₂. При приготовлении гидролизата и последующей прокатке форм содержание свободного SiO₂ в керамике снижается: после прокатки форм при температуре 1050°C оно может составлять 4–8%, при температуре 1350°C: 2–3%.

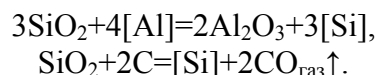
Керамика, изготовленная на основе дистен-силлиманита, прокаленного при температуре >950°C, содержит в своем составе больше свободного SiO₂, чем керамика, изготовленная на основе электрокорунда. Это связано с различным соотношением твердой и жидкой фаз в керамической суспензии: на дистен-силлиманит гидролизата расходуется в 3 раза больше, чем на электрокорунд. Кроме того, дистен-силлиманит (Al₂O₃·SiO₂) при контакте с расплавом в процессе направленной кристаллизации разлагается с образованием муллита (3Al₂O₃·2SiO₂) и кристобалитового стекла (при этом появляется ~4% свободного SiO₂). С учетом SiO₂ в гидролизате, общее содержание свободного SiO₂ в дистен-силлиманите после прокатки может составлять 10–12%.

Для обеспечения прочности стержня на основе электрокорунда и повышенной стойкости к высокотемпературной деформации при температурах отжига применяются связующие на основе SiO₂; такое связующее вводится в состав стержня в виде карбида кремния и пылевидного кварца. Карбид кремния в процессе обжига, начиная с температуры 1000°C, окисляется с образованием диоксида кремния согласно реакции:



Кроме того, применяется упрочняющая пропитка стержня полиалюмосилоксановым лаком. Содержание SiO₂ в стержневых массах колеблется от 2 до 7%.

При длительном взаимодействии расплава с керамикой формы и стержня, содержащих свободный SiO₂, что имеет место при отливке лопаток с направленной или монокристаллической структурой, алюминий, как наиболее активный компонент сплава, и углерод взаимодействуют со свободным SiO₂ и восстанавливают кремний в расплаве по реакциям:



Для повышения термической стойкости в качестве материала плавильного тигля обычно используется муллит (3Al₂O₃·2SiO₂). При высоких температурах расплавленного металла возможна декомпозиция муллита и восстановление кремния в расплаве из SiO₂ по вышеприведенным реакциям.

На рис. 6 приведена динамика (2007–2011 гг.) повышения содержания кремния в сплаве ЖС32-ВИ, выплавленного в условиях ВИАМ с использованием 100% отходов моторных заводов. По мере загрязнения сплава кремнием при отливке лопаток содержание кремния в литых прутковых заготовках выросло в среднем с 0,065 до 0,185%. При этом понизилась долговечность сплава при испытании по ТУ (при 975°C, σ=300 МПа) в среднем с 84 до 58 ч (при норме τ≥40 ч).

На рис. 7 показано влияние кремния на длительную прочность сплава ЖС32-ВИ при температурах 900 и 1000°C в сравнении с паспортными значениями. Видно, что при содержании в сплаве 0,1% Si полученные значения долговечности τ при всех температурах находятся между средними и минимальными значениями. При содержании в

сплаве 0,2% Si долговечность сплава снижается и ее значения, как правило, располагаются около минимальных паспортных значений.

В ВИАМ проведены работы по изучению возможности удаления кремния из литейных отходов сплава ЖС32-ВИ в условиях вакуумной индукционной плавки. При этом исследовали те технологические способы обработки расплава, которые позволили ранее существенно понизить в литейных жаропрочных сплавах содержание примесей кислорода, азота, серы, свинца, висмута и др. Однако исследованные технологические способы пока не позволили снизить содержание кремния в сплаве.

В настоящее время снизить содержание кремния в литейных жаропрочных сплавах, в частности в сплаве ЖС32-ВИ, возможно только путем его разбавления при плавке свежими шихтовыми материалами, что ведет к удорожанию сплава.

Поставка моторостроительным предприятиям литейных жаропрочных сплавов, изготовленных с применением 100% отходов, позволила снизить стоимость сплавов, сократить расход легирующих металлов – никеля, кобальта, молибдена, вольфрама, рения, тантала и др. и снизить энергозатраты, необходимые для их получения.

По заключению моторостроительных заводов, на которые были поставлены эти сплавы, по свойствам, технологичности и выходу годного отлитых лопаток такой металл находится на уровне металла, изготовленного из свежих шихтовых материалов.

К настоящему времени на моторостроительные авиационные предприятия ОАО «ММП им. В.В. Чернышева», ОАО «УМПО», ОАО «ПМЗ», ФГУП «ОМО им. П.И. Баранова», ФГУП НПП «Газотурбостроения „Салют”» поставлено свыше 100 т сплава ЖС32-ВИ, а также сплавов ЖС26-ВИ, ЖС6У-ВИ, ЖС6К-ВИ, ВЖЛ12У-ВИ, ВЖЛ12Э-ВИ, ЖСЗДК-ВИ, ВХ4Л-ВИ, изготовленных с применением 100% литейных отходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Горюнов А.В., Мин П.Г., Каблов Д.Е. Получение Re–Ru содержащего сплава с использованием некондиционных отходов //Металлургия машиностроения. 2012. №3. С. 15–17.
2. Сидоров В.В., Исходжанова И.В., Ригин В.Е., Фоломейкин Ю.И. Оценка эффективности фильтрации при разливке сложнелегированного никелевого расплава с повышенным количеством отходов //Электрометаллургия. 2011. №11. С. 17–21.
3. Каблов Е.Н., Логунов А.В., Сидоров В.В. Обеспечение ультравысокой чистоты металла – гарантия качества литейных жаропрочных сплавов //Металлы. 2000. №6. С. 156–160.
4. Сидоров В.В. Прогрессивные металлургические процессы получения шихтовых заготовок из литейных жаропрочных сплавов /В сб. Авиационные материалы. Избранные труды 1932–2002: Юбилейный науч.-технич. сб. М.: МИСиС–ВИАМ.2002. С. 156–160.
5. Сидоров В.В., Шалин Р.Е. Металлургия литейных жаропрочных сплавов для лопаток газотурбинных двигателей /В сб. Труды международ. науч.-технич. конф. «Научные идеи С.Т. Кишкина и современное материаловедение». М.: ВИАМ. 2006. С. 279–288.
6. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г. Влияние примеси азота на структуру монокристаллов жаропрочного никелевого сплава ЖС30-ВИ и разработка эффективных способов его рафинирования //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 32–36.
7. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Герасимов В.В., Симонов В.Н., Мин П.Г. Исследование закономерностей поведения азота при получении монокристаллов жаропрочного никелевого сплава ЖС30-ВИ //Наука и образование: электронное научно-техническое издание.
8. Сидоров В.В. Металлургия литейных жаропрочных сплавов /В сб. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технологии, покрытия). М.: Наука. 2006. С. 119–186.
9. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Ригин В.Е. Металлургия литейных жаропрочных сплавов /В сб. Авиационные материалы. Избранные труды 1932–2007: Юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 125–132.
10. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е., Каблов Д.Е. Особенности технологии выплавки и разливки современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Спец. вып. Перспективные конструкционные материалы и технологии. 2011. С. 68–78.

11. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е. Производство литых прутковых (шихтовых) заготовок из современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов /В сб. Труды науч.-технич. конф. Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований. 2011. С. 31–38.
12. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Горюнов А.В., Каблов Д.Е. Высокоэффективные технологии и современное оборудование для производства шихтовых заготовок из литейных жаропрочных сплавов //Металлург. 2012. №5. С. 26–30.
13. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Каблов Д.Е. Организация производства литых прутковых заготовок из современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов //Литейное производство. 2011. №10. С. 2–6.
14. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Ригин В.Е., Горюнов А.В. Современные технологии получения прутковых заготовок из литейных жаропрочных сплавов нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 97–105.

REFERENS LIST

1. Sidorov V.V., Rigin V.E., Gorjunov A.V., Min P.G., Kablov D.E. Poluchenie Re–Ru soderzhashhego splava s ispol'zovaniem nekondicionnyh othodov [Receiving Re–Ru of a containing alloy with use of sub-standard waste] //Metallurgija mashinostroenija. 2012. №3. S. 15–17.
2. Sidorov V.V., Ishodzhanova I.V., Rigin V.E., Folomejkin Ju.I. Ocenka jeffektivnosti fil'tracii pri razlivke slozhnolegirovannogo nikel'evogo rasplava s povyshennym kolichestvom othodov [Assessment of efficiency of a filtration when pouring complex-doped nickel fusion with the increased quantity of waste] //Jelektrometallurgija. 2011. №11. S. 17–21.
3. Kablov E.N., Logunov A.V., Sidorov V.V. Obespechenie ul'travysokoj chistoty metalla – garantija kachestva litejnyh zharoprochnykh spлавov [Ensuring ultrahigh purity of metal – a quality assurance of foundry heat resisting alloys] //Metally. 2000. №6. S. 156–160.
4. Sidorov V.V. Progressivnye metallurgicheskie processy poluchenija shihtovykh zagotovok iz litejnyh zharoprochnykh spлавov [Progressive metallurgical processes of receiving the charge billets from foundry heat-resisting alloys] /V sb. Aviacionnye materialy. Izbrannye trudy 1932–2002: Jubilejnyj nauch.-tehnic. sb. M.: MISiS–VIAM.2002. S. 156–160.
5. Sidorov V.V., Shalin R.E. Metallurgija litejnyh zharoprochnykh spлавov dlja lopatok gazoturbinykh dvigatelej [Metallurgy of foundry heat resisting alloys for shovels of gas-turbine engines] /V sb. Trudy mezhdunarod. nauch.-tehnic. konf. «Nauchnye idei S.T. Kishkina i sovremennoe materialovedenie». M.: VIAM. 2006. S. 279–288.
6. Kablov D.E., Sidorov V.V., Min P.G. Vlijanie primesi azota na strukturu monokristallov zharoprochnogo nikel'evogo splava ZhS30-VI i razrabotka jeffektivnykh sposobov ego rafinirovanija [Influence of impurity of nitrogen on structure of monocrystals of a heat resisting nickel alloy of ZhS30-VI and development of effective ways of its refinement] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №2. S. 32–36.
7. Kablov D.E., Sidorov V.V., Gerasimov V.V., Simonov V.N., Min P.G. Issledovanie zakonomernostej povedenija azota pri poluchenii monokristallov zharoprochnogo nikel'evogo splava ZhS30-VI [Research of regularities of behavior of nitrogen when receiving monocrystals of a heat resisting nickel alloy of ZhS30-VI] //Nauka i obrazovanie: jelektronnoe nauchno-tehnicheskoe izdanie.
8. Sidorov V.V. Metallurgija litejnyh zharoprochnykh spлавov [Metallurgy of foundry heat-resisting alloys] /V sb. Litye lopatki ga-zoturbinykh dvigatelej (spлавy, tehnologii, pokrytija). M.: Nauka. 2006. S. 119–186.
9. Kablov E.N., Sidorov V.V., Rigin V.E. Metallurgija litejnyh zharoprochnykh spлавov [Metallurgy of foundry heat-resisting alloys] /V sb. Aviacionnye materialy. Izbrannye trudy 1932–2007: Jubilejnyj nauch.-tehnic. sb. M.: VIAM. 2007. S. 125–132.
10. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Sidorov V.V., Rigin V.E., Kablov D.E. Osobennosti tehnologii vyplavki i razlivki sovremennykh litejnykh vysokozharoprochnykh nikel'evykh spлавov [Features of technology of smelting and pouring of modern foundry high-heat resisting nickel alloys] //Vestnik MGTU im. N. Je. Bauman. Ser. Mashinostroenie. Spec. vyp. Perspektivnye konstrukcionnye materialy i tehnologii. 2011. S. 68–78.

11. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Sidorov V.V., Rigin V.E. Proizvodstvo lityh prutkovykh (shihtovykh) zagotovok iz sovremennykh litejnykh vysokozharoprochnykh nikelovykh splavov [Production cast the bar stock (charge billets) from modern foundry high-heat resisting nickel alloys] /V sb. Trudy nauch.-tehnich. konf. Problemy i perspektivy razvitija metallurgii i mashinostroenija s ispol'zovaniem zavershennykh fundamental'nykh issledovanij. 2011. S. 31–38.
12. Sidorov V.V., Rigin V.E., Gorjunov A.V., Kablov D.E. Vysokoeffektivnye tehnologii i sovremennoe oborudovanie dlja proizvodstva shihtovykh zagotovok iz litejnykh zharoprochnykh splavov [Highly effective technologies and the modern equipment for production the charge billets from foundry heat resisting alloys] //Metallurg. 2012. №5. S. 26–30.
13. Sidorov V.V., Rigin V.E., Kablov D.E. Organizacija proizvodstva lityh prutkovykh zagotovok iz sovremennykh litejnykh vysokozharoprochnykh nikelovykh splavov [The organization of production cast the bar stock from modern foundry high-heat resisting nickel alloys] //Litejnoe proizvodstvo. 2011. №10. S. 2–6.
14. Kablov E.N., Sidorov V.V., Kablov D.E., Rigin V.E., Gorjunov A.V. Sovremennye tehnologii poluchenija prutkovykh zagotovok iz litejnykh zharoprochnykh splavov novogo pokolenija [Modern technologies of receiving the bar stock from foundry heat resisting alloys of new generation] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 97–105.