



УДК 669.018.44

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-1-1

**ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА  
ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ЖС32-ВИ С УЧЕТОМ  
ПЕРЕРАБОТКИ ВСЕХ ВИДОВ ОТХОДОВ  
В УСЛОВИЯХ СЕРТИФИЦИРОВАННОГО  
СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ФГУП «ВИАМ»**

В.В. Сидоров

*доктор технических наук*

В.Е. Ригин

*кандидат технических наук*

А.В. Горюнов

П.Г. Мин

**Июнь 2014**

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

УДК 669.018.44

*В.В. Сидоров<sup>1</sup>, В.Е. Ригин<sup>1</sup>, А.В. Горюнов<sup>1</sup>, П.Г. Мин<sup>1</sup>***ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ЖС32-ВИ С УЧЕТОМ ПЕРЕРАБОТКИ ВСЕХ ВИДОВ ОТХОДОВ В УСЛОВИЯХ СЕРТИФИЦИРОВАННОГО СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ФГУП «ВИАМ»**

*Разработанная ресурсосберегающая технология переработки 100% литейных отходов жаропрочного сплава ЖС32-ВИ обеспечивает качество литых прутковых заготовок по содержанию примесей, газов и механическим свойствам в соответствии с требованиями ТУ, стабильный химический состав сплавов по основным легирующим элементам, снижение стоимости сплавов и сокращение расхода дефицитных и дорогостоящих легирующих металлов, таких как никель, кобальт, молибден, вольфрам, рений, тантал и другие. Разработанная технология реализована на созданном в ВИАМ научно-производственном комплексе по изготовлению литых прутковых заготовок.*

**Ключевые слова:** технология, отходы, стоимость, свойства, жаропрочный сплав, металлы.

*The developed resources-saving technology of 100% cast scrap GS32-VI superalloy recycling affords the quality of cast bars for impurities content, gases and mechanical properties according to TU demand, stable alloy chemistry to main alloying elements, reducing cost of alloys and saving expensive and deficient alloying metals as nickel, cobalt, molybdenum, tungsten, rhenium, tantalum and other. The developed technology is marketed in FGUP «VIAM» at created scientific-production complex for cast bars manufacture.*

**Keywords:** technology, scrap, cost, properties, high temperature alloy, metals.

<sup>1</sup>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

Как показывает отечественный и зарубежный опыт, важнейшим условием реализации высоких технических и технологических свойств литейных высокожаропрочных сплавов является технология их производства, которая должна обеспечить такие показатели материала, как стабильность химического состава в минимально узких пределах легирования; ультранизкое содержание вредных примесей: серы, фосфора, кислорода, азота, примесей цветных металлов (свинца, висмута, сурьмы, олова и др.), неметаллических включений; плотное с минимальным количеством усадочных дефектов строение литых прутковых заготовок с качественной поверхностью [1–5].

Такая технология разработана и применяется при производстве литой прутковой заготовки [6–17], в том числе сплава ЖС32-ВИ в условиях ФГУП «ВИАМ» (рис. 1).

В ВИАМ создан научно-производственный комплекс по изготовлению литых прутковых заготовок жаропрочных сплавов, предназначенных для литья лопаток с равноосной, направленной и монокристаллической структурой, который включает в себя отдельные участки, оснащенные современным производственным, аналитическим и испытательным оборудованием, что позволяет обеспечить качество изготавливаемой продукции на уровне требований мировых стандартов (рис. 2). Участок сертифицирован Межгосударственным авиационным комитетом.

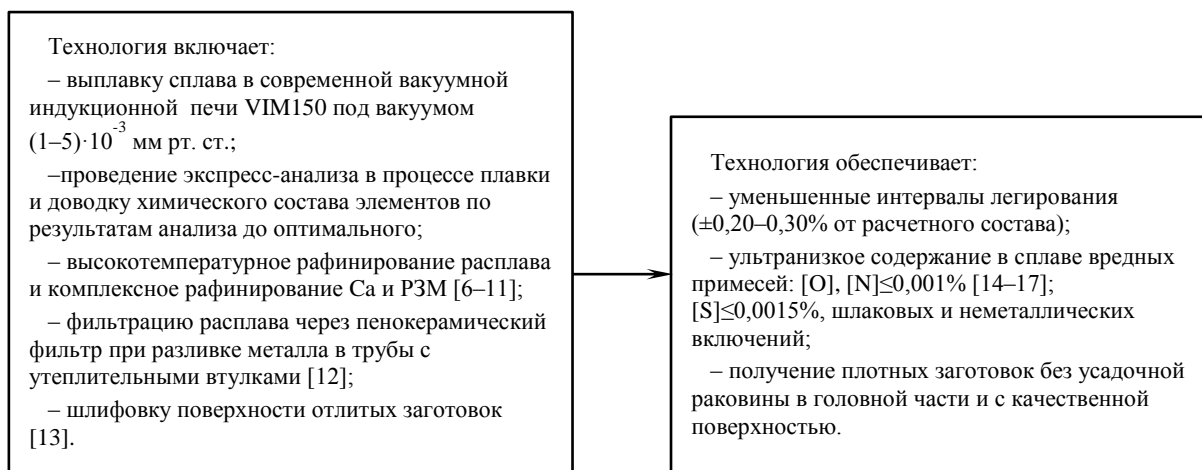


Рис. 1. Производство литых прутковых заготовок сплава ЖС32-ВИ в условиях ВИАМ

### Технологический процесс изготовления заготовок сплавов:

- выплавка сплавов на свежих шихтовых материалах;
- переработка всех видов отходов никелевых жаропрочных сплавов



Вакуумная индукционная печь VIM150 (емкость тигля 650 и 1000 кг)

- извлечение заготовок из труб



Гидравлический пресс с усилием 100 т

- отрезка прибыльной части заготовок



Абразивно-отрезной станок МВ 332

- шлифовка поверхности заготовок с обеспечением глубины съема металла 0,5–1 мм и чистоты с шероховатостью  $R_z=10,0$



Обдирочно-шлифовальный станок ВС3-4208



Готовая продукция

### Контроль качества готовой продукции

#### Определение содержания:

- химического состава сплавов с узкими пределами содержания легирующих элементов ( $\pm 0,2-0,3\%$ )



Оптический спектрометр фирмы ARL

- примесей  $O_2, N_2 \leq 0,0008\%$  каждого,  $S \leq 0,0006\%$ ,  $C \leq 0,005\%$



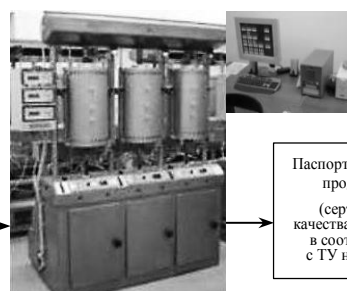
Газоанализаторы фирмы Leco TC600 и CS600

- примесей Pb, Bi, Sb, As, Se, Ag, Sn, Zn



Масс-спектрометр XSeries 2

#### Определение механических свойств ( $\tau, \sigma_B, \delta, \psi$ )



Высокотемпературный испытательный комплекс

Паспорт на готовую продукцию (сертификат качества продукции в соответствии с ТУ на сплавы)

Рис. 2. Научно-производственный комплекс по изготовлению литых прутковых заготовок никелевых жаропрочных сплавов

Технологическая схема получения литых прутковых заготовок из литейных высокожаропрочных сплавов, в том числе 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 разливку металла через пенокерамический фильтр в стальные трубы с утеплительными вставками. Для извлечения прутковых заготовок специально спроектирован и изготовлен гидравлический пресс с рабочим усилием 100 т. После подрезки головной и донной частей прутковых заготовок их поверхность подвергают механической обработке на обдирочно-шлифовальном станке. По сравнению с применяемой ранее токарной обработкой продолжительность механической обработки поверхности заготовок шлифованием сократилось в 20 раз, потери металла сократились более чем в 3 раза (с 8 до 2,4%) при обеспечении высокой чистоты поверхности.

Высокое качество жаропрочных сплавов невозможно обеспечить без применения современного вакуумного плавильного оборудования. В ВИАМ имеется оборудование как для разработки сплавов и новых технологий, так и для серийного производства.

Введена в эксплуатацию новая вакуумная индукционная установка последнего поколения VIM150 фирмы ALD (Германия) с емкостью тиглей 650 и 1000 кг, изготовленная по технологическому заданию ВИАМ (рис. 3).

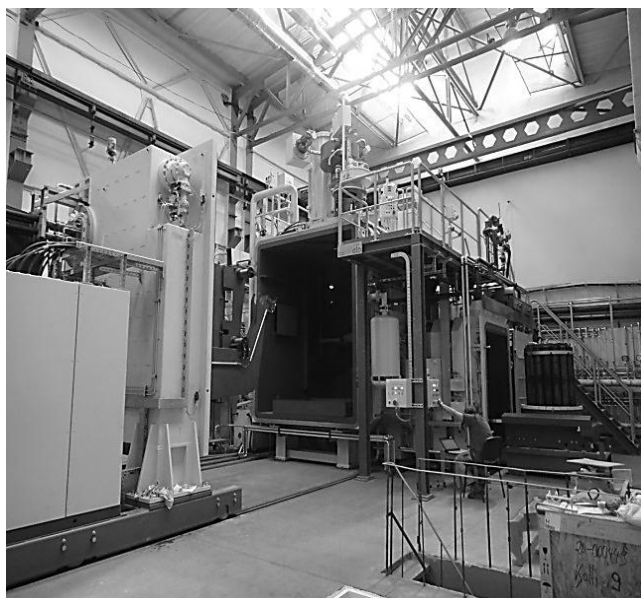


Рис. 3. Вакуумная индукционная печь VIM150 (фирма ALD, Германия) с емкостью тигля 650 и 1000 кг

Печи оснащены: 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 выплавленных сплавов в узких пределах легирования; системой фильтрации металла во время его слива, что обеспечивает высокую чистоту металла по неметаллическим включениям. Конструктивные особенности установки, система вакуумных уплотнений и весьма 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 весьма низким содержанием кислорода и азота.

Для улучшения поверхности прутковых заготовок, технологичности при их механической обработке и повышения выхода годного, металл разливают в калиброванные стальные трубы диаметром  $90 \pm 1$  мм с утеплительными вставками. Разливка металла в полуавтоматическом режиме с использованием компьютерного программного управления позволяет максимально сократить продолжительность разливки и минимизировать неизбежные потери металла. Использование утеплительных вставок дает возможность получить плотные литые заготовки и существенно сократить объем усадочной раковины.

Установка VIM150 имеет конструктивные особенности, которые впервые используются на вакуумных индукционных печах, работающих в Российской Федерации:

- возможность определять содержание кислорода в расплаве в процессе плавки;
- система автоматического поддержания заданной температуры расплава;
- постоянный замер температуры расплава пирометром.

Разработанная технология положена в основу решения другой важной задачи производства литейных жаропрочных сплавов – полного использования всех отходов, образующихся на моторостроительных и ремонтных заводах. В ВИАМ разработана ресурсосберегающая технология рафинирующего переплава всех видов образующихся отходов, в том числе сплава ЖС32-ВИ, в вакуумных индукционных печах, которая позволяет из 100% отходов получить сплавы, полностью отвечающие по чистоте и свойствам требованиям действующих ТУ и не уступающие сплавам, изготовленным из свежих шихтовых материалов на металлургических заводах.

Разработанная технология переработки отходов литейных жаропрочных сплавов реализована на созданном в ВИАМ научно-производственном комплексе по изготовлению литых прутковых заготовок (см. рис. 2).

Схема производства литых прутковых заготовок с применением 100% различных отходов приведена на рис. 4. Это кондиционные отходы в виде литниковых чаш, питателей, коллекторов, забракованных деталей, а также некондиционные отходы в виде гарнисажа с плавильного тигля, скрапины, сплэсов и корольков металла, образующихся при отливке деталей, а также в виде стружки, образующейся после механической обработки отлитых деталей [18].

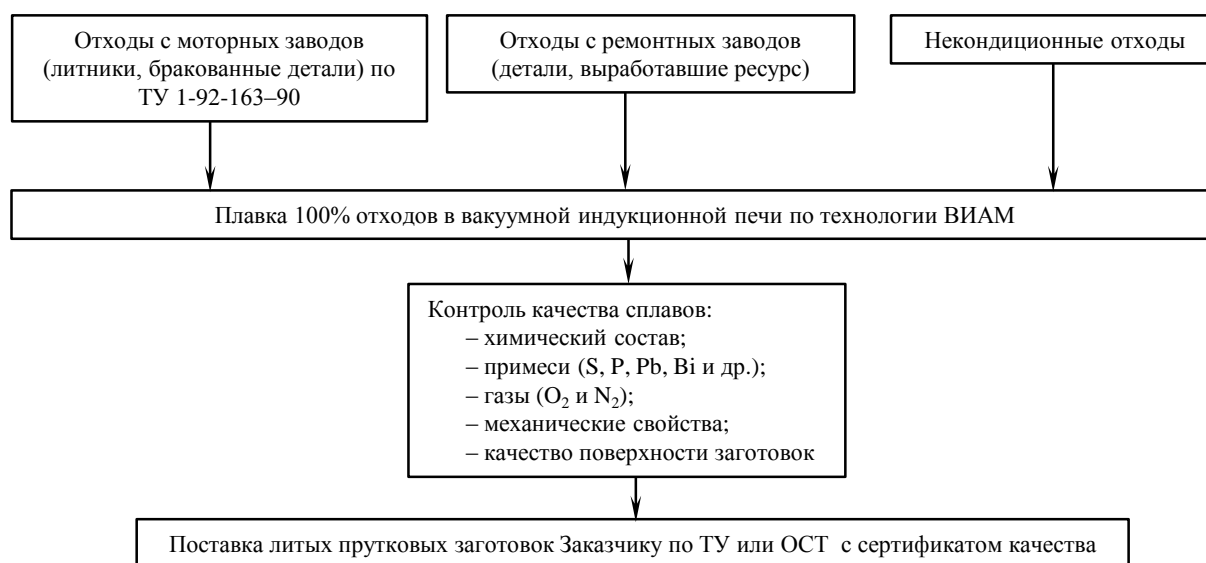


Рис. 4. Производство литых прутковых заготовок с применением 100% отходов

К некондиционным отходам относятся также лопатки турбин ГТД, которые отработали свой ресурс и уже не пригодны для дальнейшей эксплуатации в двигателях.

В табл. 1 приведены результаты контроля неметаллических включений (НВ) в литой прутковой заготовке  $\varnothing 90$  мм сплава ЖС32-ВИ, изготовленного на металлургическом заводе с применением до 50% отходов и в условиях ВИАМ – с применением 100% отходов, которые были дополнительно отрафинированы и затем залиты через пенокерамический фильтр с активированной поверхностью. Видно, что объемная доля и количество неметаллических включений (НВ) в металле, изготовленном в ВИАМ, в несколько раз меньше, чем в серийном металле. Содержание примесей кислорода и серы в готовом металле понизилось соответственно в 3 и 2 раза.

Таблица 1

**Неметаллические включения (НВ) в литой прутковой заготовке  $\varnothing 90$  мм из сплава ЖС32-ВИ**

Технология плавки	% использования отходов	Объемная доля НВ, % (на 10 полях зрения при $\times 200$ )	Среднее количество НВ, шт/мм <sup>2</sup> (разброс)	Максимальный размер НВ, мкм	Содержание примесей, %	
					[O]	[S]
Серийная	До 50	0,1626 (0,0555–0,3674)	373 (164–754)	19,11	0,0009	0,00037
Разработанная в ВИАМ	100	0,0248 (0,0047–0,0666)	43 (6–140)	14,38	0,0003	0,00016

В табл. 2–6 приведены результаты входного контроля и свойства сплава ЖС32-ВИ, изготовленного в ВИАМ с применением 100% отходов, по данным ОАО «ММП им. В.В. Чернышева» и ФГУП «НПЦ газотурбостроения „Салют”». Видно, что по чистоте литых прутковых заготовок (оксидные пленки, шлаки, засоры) и содержанию газов (кислород и азот) металл, выплавленный в ВИАМ, находится на уровне серийного металла. Свойства сплава, изготовленного в ВИАМ, в том числе усталостная прочность готовых лопаток, удовлетворяют требованиям ТУ.

Таблица 2

**Содержание газов в литых прутковых заготовках сплава ЖС32-ВИ (литейные отходы поставки ОАО «ММП им. В.В. Чернышева»)**

Способ выплавки заготовок	Содержание газов, % (по массе)	
	кислород	азот
100% литейных рафинированных отходов	0,00082	0,0003
100% свежей шихты (серийный металл)	0,00085	0,00035

Таблица 3

**Разбраковка партии рабочих лопаток двигателя РД-33 из сплава ЖС32-ВИ (данные ОАО «ММП им. В.В. Чернышева»)**

Способ выплавки литой прутковой заготовки	Вид контроля	% брака			Выход годного, %
		засор	пленка	итого	
100% литейных рафинированных отходов	Визуальный, рентгеновский, люминесцентный	2,35	8,35	10,7	89,3
100% свежей шихты (серийный металл)	То же	3,5	7,7	11,2	88,8

Таблица 4

**Контроль чистоты литых прутковых заготовок  $\varnothing 90$  мм из сплавов ЖС32-ВИ и ЖС26-ВИ, полученных с использованием 100% литейных отходов (данные ФГУП «НПЦ газотурбостроения „Салют”»)**

Сплав	Место контроля заготовки	Вид загрязнений*		
		шлак	оксидные пленки	нитриды
ЖС32-ВИ	Центр	Н/о	Н/о	Н/о
	Периферия	Н/о	Н/о	Н/о
ЖС26-ВИ	Центр	Н/о	Н/о	Н/о
	Периферия	Н/о	Н/о	Н/о

\* Метод контроля загрязненности сплава по ASTM E1245-00; Н/о – не обнаружен.

Таблица 5

**Свойства сплава ЖС32-ВИ, выплавленного с использованием 100% литейных рафинированных отходов (данные ОАО «ММП им. В.В. Чернышева»)**

Технология выплавки (количество отходов)	Длительная прочность $\tau$ , ч (при 975°C, $\sigma=300$ МПа)	Предел выносливости рабочих лопаток $\sigma_{-1}$ , МПа (при 20°C, $N=2 \cdot 10^7$ цикл)	Результаты испытаний
100% рафинированных отходов	79 (среднее значение)	190	Лопатки не разрушились
Норма по ТУ 1-92-177-91	$\geq 40$	–	

Таблица 6

**Свойства сплава ЖС32-ВИ, выплавленного с использованием 100% литейных рафинированных отходов (данные ФГУП «НПЦ газотурбостроения „Салют”»)**

Технология выплавки (количество отходов)	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	Длительная прочность $\tau$ , ч (при 1000°C, $\sigma=280$ МПа)	Предел выносливости рабочих лопаток $\sigma_{-1}$ , МПа (при 20°C, $N=2 \cdot 10^7$ цикл)	Результаты испытаний
100% рафинированных отходов	116,5; 125,2	7,2; 8,3	40 (снят)	150	Лопатки не разрушились
Норма по ТУ 1-92-177-91	$\geq 100$	$\geq 6$	$\geq 40$	–	

Технология, разработанная в ВИАМ, обеспечивает качество сплавов на уровне требований мировых стандартов [19].

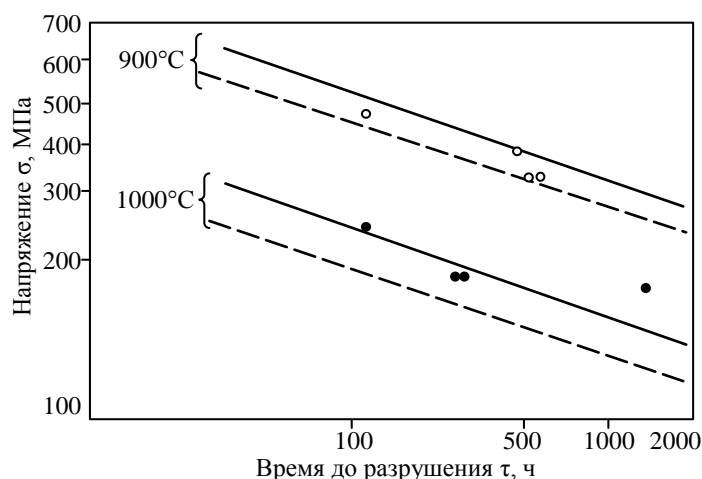


Рис. 5. Длительная прочность сплава ЖС32-ВИ (○, ●), выплавленного с использованием 100% литейных отходов:

—, - - - средние и минимальные значения по паспорту №1540 на сплав ЖС32-ВИ (100% свежей шихты)

На рис. 5 приведены результаты испытаний на длительную прочность при температурах 900 и 1000°C сплава ЖС32-ВИ, выплавленного по разработанной технологии с использованием 100% литейных отходов, в сравнении с паспортными характеристиками сплава, выплавленного с использованием только чистых шихтовых материалов. Видно, что значения долговечности сплава ЖС32-ВИ, выплавленного с использованием 100% отходов, соответствуют паспортным характеристикам сплава.

Ресурсосберегающая технология переработки отходов позволяет создать замкнутый цикл возврата дорогих и дефицитных легирующих металлов в производство, обеспечить их экономию и снизить стоимость сплавов без снижения качества.

Как видно из данных рис. 6, относительная стоимость сплава ЖС32-ВИ в случае переработки 100% отходов по отношению к коммерческой цене металлургических заводов снижается на ~60%, а сплавов ЖС6У-ВИ и ЖС26-ВИ – на 40%. Таким образом, эффективность снижения стоимости сплавов, выплавленных с использованием 100% отходов, выше на сплаве ЖС32-ВИ, легированном дорогостоящим рением.



Рис. 6. Относительная стоимость серийных жаропрочных никелевых сплавов

В табл. 7 приведено качество литых прутковых заготовок литейных жаропрочных сплавов, произведенных в ВИАМ и фирмой Cannon Muskegon (США), которая является ведущей зарубежной фирмой по изготовлению аналогичных сплавов. Видно, что как по стабильности химического состава сплавов, так и по содержанию в них примесей, металл, изготовленный в ВИАМ, не уступает по качеству металлу передовой зарубежной фирмы.

Таблица 7

**Качество литых прутковых заготовок литейных жаропрочных сплавов производства ВИАМ и фирмы Cannon Muskegon (США)**

Качество сплава		Технология выплавки сплава	
		разработанная в ВИАМ	фирмы Cannon Muskegon (США)
Интервал легирования по основным элементам, %		±(0,2–0,3)	±(0,2–0,4)
Содержание примесей в сплавах, ppm (1ppm=10 <sup>-4</sup> %)	[O]	по ТУ фактическое	≤10 2–5
	[N]	по ТУ фактическое	≤10 1–3
	[S]	по ТУ фактическое	≤10 2–5

### Заключение

Сплав ЖС32-ВИ серийно изготавливается в ВИАМ, в том числе с использованием до 100% отходов, на сертифицированном АРМАК производственном участке, оборудованном современным автоматизированным плавильным, аналитическим и испытатель-

ным оборудованием, под контролем военной приемки и по стабильности химсостава, чистоте по примесям, качеству поверхности заготовок и свойствам полностью соответствует ТУ 1-92-177-91 и уровню требований мировых стандартов.

Сплав ЖС32-ВИ может серийно использоваться как свежеразлитый сплав на моторостроительных заводах для изготовления рабочих лопаток турбин ГТД различного назначения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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. трудов науч.-технич. конф., посвященной 310-летию уральской металлургии и созданию технико-внедренческого центра металлургии и тяжелого машиностроения. Т. 1. Екатеринбург: Наука Сервис. 2011. С. 31–38.
3. 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.
4. 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. 2–5.
5. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Тимофеева О.Б., Мин П.Г. Влияние кремния и фосфора на жаропрочные свойства и структурно-фазовые превращения в монокристаллах из высокожаропрочного сплава ВЖМ4-ВИ //Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 32–38.
6. Мин П.Г., Сидоров В.В. Опыт переработки литейных отходов сплава ЖС32-ВИ на научно-производственном комплексе ВИАМ по изготовлению литых прутковых (шихтовых) заготовок //Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 20–25.
7. Сидоров В.В., Тимофеева О.Б., Калицев В.А., Горюнов А.В. Влияние микролегирования РЗМ на свойства и структурно-фазовые превращения в интерметаллидном сплаве ВКНА-25-ВИ //Авиационные материалы и технологии. 2012. №4. С. 8–13.
8. Sidorov V.V., Gorynov A.V., Kolmakova N.A. Effect of lanthanum on the hightemperature strength of single crystals of highly refractory alloy VZhM4-VI containing rhenium and ruthenium //Metal Science and heat treatment. 2012. V. 54. №3–4. P. 126–130.
9. Pang H.T., Edmonds I.M., Jones C.N., Stone H.J., Rae C.M.F. Effects of Y and La additions on the processing and properties of a second generation single crystal nickel-base superalloys CMSX-4 /In: Superalloys-2012 International Symposium on Superalloys. 2012. P. 301–310.
10. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Зайцев Д.Е., Горюнов А.В. Формирование наноструктурированного состояния в литейном жаропрочном сплаве при микролегировании его лантаном //Труды ВИАМ. 2013. №1. Ст. 01 (viam-works.ru).
11. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 01 (viam-works.ru).
12. Сидоров В.В., Исходжанова Н.В., Ригин В.Е., Фоломейкин Ю.И. Оценка эффективности фильтрации при разливке сложнелегированного никелевого расплава //Электрометаллургия. 2011. №11. С. 17–22.
13. Обдирочно-шлифовальный станок: пат. 2399477 Рос. Федерация; опубл. 04.02.2009.
14. 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.
15. Каблов Д.Е., Сидоров В.В. Азот в монокристаллических жаропрочных сплавах //Литейное производство. 2012. №3. С. 6–8.
16. Каблов Д.Е., Чабина Е.Б., Сидоров В.В., Мин П.Г. Исследование влияния азота на структуру и свойства монокристаллов из литейного жаропрочного сплава ЖС30-ВИ //МиТОМ. 2013. №8. С. 3–7.
17. Каблов Д.Е., Беляев М.С., Сидоров В.В., Комарова Т.И. Исследование влияния азота на малоцикловую усталость монокристаллов жаропрочного никелевого сплава ЖС30-ВИ //МиТОМ. 2012. №7. С. 46–47.
18. 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.
19. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных сплавов с монокристаллической и композиционной структурой //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 3–8.