УДК 669.018.44 DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-23-30

Н.Г. Орехов[1], И.В. Старостина [1]

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ЛИТОЙ ПРУТКОВОЙ (ШИХТОВОЙ) ЗАГОТОВКИ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ПРОИЗВОДСТВА ФГУП «ВИАМ»

Разработана технология металлургической переработки с использованием 100% литейного возврата жаропрочных сплавов при производстве литой прутковой (шихтовой) заготовки (ЛПЗ) из сплавов для литья лопаток с равноосной и направленной структурой, в том числе из специально легированных безуглеродистых монокристаллических сплавов. Организовано промышленное производство литой прутковой заготовки. На базе нормативной документации разработан стандарт предприятия по оценке качества производимой литой прутковой (шихтовой) заготовки. Проведена статистическая обработка выпускаемой продукции, подтверждено качество и осуществляется серийная поставка ЛПЗ предприятиям отрасли.

Ключевые слова: *технология, литейный возврат, литая прутковая шихтовая заготовка (ЛПЗ), монокристалл, свойства, жаропрочный сплав, контрольная карта индивидуальных значений, выборочное стандартное отклонение, индекс пригодности процесса.*

A technology of metallurgical processing using 100% of cast wastes of superalloys in production of charge bar castings for blades with equiaxial and directional structure including casting of blades from specially alloyed carbon-free single-crystal superalloys was developed. Commercial production of charge bar castings was organized. Based on normative documentation, a local standard for quality validation of the charge bar castings was developed. Statistical processing of the output products was performed, the quality of castings was confirmed and their serial delivery to branch enterprises is carried out.

Keywords: *technology, cast recovery, charge bar casting, single crystal, properties, superalloy, control card of individual values, selective standard deviation, process capability characteristic.*

[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

Введение

Литые прутковые заготовки из жаропрочных сплавов используются как полуфабрикат при производстве отливок деталей горячего тракта газотурбинных двигателей (ГТД), в том числе его рабочих и сопловых лопаток. Эти детали относятся к особо ответственным элементам ГТД. Для материалов, из которых они изготовлены, функционирует наиболее жесткая система обеспечения качества, включающая общую и специальную квалификацию, а также сертификацию серийного производства этих материалов и полуфабрикатов.

В ВИАМ при разработке литых прутковых (шихтовых) заготовок (ЛПЗ) из жаропрочных сплавов и технологии их изготовления с применением литейного возврата, а также последующей подготовке их серийного производства проведены все необходимые работы в рамках общей квалификации – созданы паспорта на материалы, технические условия на их поставку и технологические инструкции на изготовление ЛПЗ широкой номенклатуры жаропрочных сплавов. На следующем этапе допуска ЛПЗ из жаропрочных сплавов для изготовления деталей ГТД является сертификация их производства, включающая:

– оценку системы менеджмента качества изготовителя на соответствие требованиям ГОСТ ISO 9001–2011 «Системы менеджмента качества, требования»;

– оценку технологии производства (наличие необходимого технологического оборудования и нормативной документации);

– аттестацию на компетентность испытательных лабораторий, осуществляющих приемочный контроль и испытания готовой продукции;

– статистический анализ качества продукции, стабильность ее свойств и технологических процессов, а также соответствие требованиям нормативной документации.

В данной работе проведен статистический анализ качества ЛПЗ из жаропрочных сплавов производства ВИАМ и оценка стабильности технологического процесса их производства.

При производстве отливок деталей горячего тракта, в том числе рабочих и сопловых лопаток ГТД, ЛПЗ подвергается глубокой металлургической обработке [1–7]. Технология литья при производстве отливок в значительной степени определяет уровень механических свойств материала. В результате анализа качества продукции должно появиться обоснование стабильности металлургического производства ЛПЗ из жаропрочных сплавов для подтверждения «Сертификата производства авиационного материала» на разработанные в ВИАМ ЛПЗ из жаропрочных сплавов.

Объектами статистической обработки являются результаты химического анализа и оценки механических свойств ЛПЗ из жаропрочных сплавов, полученных методом вакуумной индукционной (ВИ) плавки в плавильных печах ИСВ-016 и VIM-50.

В качестве контрольных нормативных значений использованы минимальные и максимальные значения определяемых характеристик, установленные в нормативно-технической документации и представляющие собой критерии для принятия решения по результатам выборочного контроля соответствия продукции установленным требованиям.

Материалы и методы

Статистическая обработка результатов включает построение контрольных X-карт индивидуальных значений определенных параметров, построение кривых распределения основных легирующих элементов и подтверждение нормального распределения результатов анализа в соответствии с требованиями ГОСТ [8–12], стандарта предприятия СТО 1-595-1377–2013 «Контроль качества материалов и полуфабрикатов из жаропрочных сплавов серийного производства» и нормативно-технической документации (НД, ТУ).

При анализе стабильности химического состава ЛПЗ определяли:

– среднее значение параметра по выборке

$$\bar{x}=\frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n};$$

– среднее квадратическое отклонение (СКО) для выборки измерений

$$S_{\Sigma}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-x_{\text{рас}})^2}{n-1}};$$

– доверительный интервал для данной выборки

$$\Delta_{\Sigma}=\frac{t\cdot S_{\Sigma}}{\sqrt{n}};$$

– коэффициент, суммарно характеризующий стабильность технологического процесса и ошибку химического анализа

$$\gamma'=\frac{\Delta_{\Sigma}}{x_{\text{рас}}}\cdot 100\%,$$

где n – число измерений; x_i – измеренное значение массовой доли элемента; $x_{\text{рас}}$ – расчетное (шихтовочное) значение массовой доли элемента; Δ_{Σ} – доверительный интервал данной выборки; t – коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности 0,95.

Критерием соответствия материала требованиям НД (ТУ) на марки материала является выполнение следующих неравенств:

$$\bar{x}-(x_{\min})_{\text{ТУ}}>\Delta;$$

$$(x_{\max})_{\text{ТУ}}-x>0,$$

где $(x_{\min})_{\text{ТУ}}$, $(x_{\max})_{\text{ТУ}}$ – минимальные и максимальные значения массовой доли элементов в технических условиях (ТУ) на марку сплава; Δ – допускаемое предельное значение возможных погрешностей результатов химического анализа с доверительной вероятностью 0,95.

При анализе статистических данных стандартных механических свойств определяли:

– среднее значение выборки – $\bar{x}$;

– среднее квадратическое отклонение (СКО) – S_{Σ};

– коэффициент вариации – $\gamma=\frac{S_{\Sigma}}{\bar{x}}\cdot 100\%$;

– средний допустимый уровень (тренд) – изменение значений характеристик по временной шкале.

Выполнение условия – $|\bar{x}-X_{\text{НД}}|>S_{\Sigma}$ (где $X_{\text{НД}}$ – нижний допустимый уровень характеристики по НД (ТУ)) означает попадание данных контроля в область значений, приведенных в технических условиях с вероятностью 0,841, что отвечает требованию для сертифицируемого материала.

Интегральную оценку стабильности производства ЛПЗ осуществляли с помощью совокупного параметра качества $P_{\text{р.к}}$, который определяется на основе ГОСТ Р 50799.44–2001.

Коэффициент $P_{\text{р.к}}$ – индекс пригодности – $P_{\text{р.к}}=(X_{\text{ср}}-X_{\text{НД}})/3\cdot S_{\Sigma}$.

При значениях $P_{\text{р.к}}<0{,}67$ процесс производства считается нестабильным, требует корректировки и не может быть сертифицирован без проведения дополнительного анализа. При значениях $1{,}33>P_{\text{р.к}}>0{,}67$ – процесс производства стабильный (контролируемый), но требует дополнительного анализа и возможностей корректировки. При значениях $P_{\text{р.к}}>1{,}33$ – процесс стабильный, контролируемый и управляемый.

Характеристики механических свойств ЛПЗ из сплавов, предназначенных для равноосного литья, определяются для 100% продукции. Для ЛПЗ из сплавов с направленной и монокристаллической структурой оценивают каждую пятую плавку на образцах с регламентированной кристаллографической ориентацией, соответствующей ориентации отливок, применяемых в эксплуатации.

Статистической обработке подвергаются результаты химического анализа всех ЛПЗ. В данной статье рассматриваются преимущественно результаты аттестации ЛПЗ из сплава ЖС32-ВИ.

Результаты

Сплав ЖС32-ВИ, легированный 4% Re и 4% Ta, содержит упрочняющие границы зерен элементы – B и C, применяется для литья лопаток методом направленной кристаллизации в литейных установках УВНК. Существуют две технологии литья лопаток из сплава ЖС32-ВИ:

– одна обеспечивает получение отливок с нерегламентированной направленной структурой;

Результаты статистической обработки химического состава литой прутковой заготовки (ЛПЗ) из сплава ЖС32-ВИ

Документ	Содержание легирующих элементов*, % (по массе)								
	C	Co	W	Mo	Cr	Al	Re	Ta	Nb
Требования по ТУ 1-92-177–91	0,12/0,17	9/9,5	8,1/8,9	0,9/1,3	4,5/5,3	5,7/6,2	3,6/4,3	3,7/4,4	1,4/1,8
Значения параметров после шихтовки отходами									
Расчетный параметр	0,145	9,25	8,5	1,1	4,9	5,95	3,95	3,95	1,6
$\bar{x}$	0,15	9,24	8,51	1,14	4,89	6,0	4,00	3,98	1,55
S_Σ от $x_{рас}$	0,005	0,081	0,101	0,050	0,108	0,065	0,092	0,105	0,059
Δ_Σ	0,0010	0,017	0,021	0,010	0,013	0,022	0,019	0,022	0,012
Коэффициент γ', %	0,70	0,18	0,24	0,93	0,27	0,37	0,48	0,55	0,76
Δ	±0,007	±0,215	±0,3	±0,05	±0,075	±0,18	±0,07	±0,06	±0,06
$\bar{x}-(x_{min})_{ТУ}>\Delta$	0,03	0,24	0,41	0,24	0,39	0,34	0,40	0,28	0,15
$(x_{max})_{ТУ}-x>0$	0,02	0,26	0,39	0,16	0,41	0,16	0,30	0,42	0,25

* В числителе – минимальные значения, в знаменателе – максимальные.

– вторая – монокристаллическую структуру с заданной кристаллографической ориентацией (КГО) [13–15].

В первом случае лопатки состоят из нескольких зерен нерегламентированной кристаллографической ориентации. Многочисленными исследованиями, проведенными в ВИАМ, показано, что механические свойства образцов с нерегламентированной ориентацией характеризуются большой дисперсией, связанной с ориентационной зависимостью механических свойств монокристаллов [13, 14]. В связи с этим поставка Потребителю сплавов (ЖС26-ВИ, ЖС26У-ВИ, ЖС32-ВИ, ЖС32У-ВИ) для направленной кристаллизации осуществляется при соответствии химического состава сплава нормам ТУ. Контроль механических свойств ЛПЗ при оценке стабильности производства проводится для каждой пятой плавки на образцах с монокристаллической структурой ориентации [001] или по требованию Заказчика.

Технологическая схема получения литых прутковых заготовок из литейных высокожаропрочных сплавов, в том числе из сплава ЖС32-ВИ, включает первоначальный входной контроль шихтовых материалов и отходов на их соответствие 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 [16–19]. Технология должна обеспечить стабильность химического состава в минимально узких пределах легирования; низкое 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 [1–7].

В работе проведен статистический анализ результатов испытаний выплавленной в ВИАМ литой прутковой (шихтовой) заготовки с использованием 100% всех видов образующихся в вакуумных индукционных печах литейных отходов, с оценкой соответствия требованиям действующих ТУ на сплавы, изготовленные из свежих шихтовых материалов на металлургических заводах. С учетом результатов научно-исследовательских работ института, для сплавов, применяемых для направленной кристаллизации и монокристаллического литья, введен расширенный контроль содержания вредных примесей. При этом особое внимание уделено содержанию в сплавах кремния, серы, фосфора, кислорода и азота. Ограничение содержания указанных элементов положительно сказывается на увеличении выхода годных по макроструктуре монокристаллических отливок лопаток и на их свойствах [20–25].

Объем выборки, предоставленный для химического анализа ЛПЗ (производство 2012 и 2013 г.), составлял 93 плавки. Результаты статистической обработки химического состава основных легирующих элементов ЛПЗ из жаропрочного сплава ЖС32-ВИ представлены в таблице.

Результаты статистической обработки химического состава ЛПЗ из сплава ЖС32-ВИ показывают соответствие плавок из выборочного объема требованиям ТУ 1-92-177–91. Содержание легирующих элементов ЛПЗ находится в интервале минимальных и максимальных значений: $\bar{x}$ – средние значения по выборкам для всех легирующих элементов находятся в интервале, регламентированном ТУ. Критерии соответствия материала требованиям НД (ТУ) на марку материала ограничиваются условиями: $\bar{x}-(x_{min})_{ТУ}>\Delta$; $(x_{max})_{ТУ}-\bar{x}>0$. Значения коэффициента γ', суммарно характеризующего стабильность технологического процесса и ошибку анализа для основных легирующих элементов, не превышают 1%, что соответствует стабильному и воспроизводимому процессу.

Стабильность процесса производства ЛПЗ из сплава ЖС32 подтверждается Х-картами контроля индивидуальных значений содержания всех основных легирующих элементов в сплаве [8–10]. Графики приведены для двух наиболее дорогостоящих, дефицитных элементов – рения и тантала. На рис. 1 представлены Х-карты значений содержания Re и Ta для расширенной выборки (за 5 лет) для сплава ЖС32. Случаев выхода значений содержания Re и Ta за нижний и верхний пределы содержания элементов по ТУ не отмечалось.

Гистограммы легирующих элементов Re и Ta отвечают закону нормального распределения, что подтверждается значениями распределения отклонения вероятностей от нормального, построенными в соответствии с ГОСТ Р ИСО 5479–2002 (рис. 2) [10].

Проведенный анализ содержания основных элементов свидетельствует о стабильности технологического процесса производства ЛПЗ из жаропрочного сплава ЖС32 по технологии, разработанной в ВИАМ, с использованием 100% литейного возврата.

Применяемые методы раскисления и рафинирования расплава, использование РЗМ обеспечивают низкое содержание в ЛПЗ примесей цветных металлов, а также серы и фосфора, азота и кислорода на уровне, менее допустимых значений по ТУ (рис. 3) [16, 19–23]. Из всех проанализированных элементов исключение составил кремний, который накапливается в сплаве при использовании возвратных материалов. Анализ содержания в сплаве кремния показал, что, вне зависимости от поставщика литейного возвратного материала, содержание кремния при использовании 100% отходов находится вблизи от верхнего допустимого уровня для сплава ЖС32-ВИ – 0,2% (рис. 4). Это обстоятельство связано с восстановлением кремния из керамической формы, содержащей этилсиликат, в течение длительного процесса направленной кристаллизации и накопления кремния в жидком расплаве сплава. Повышение содержание кремния в сплаве сказывается на технологичности при литье монокристаллических лопаток [16].

В сплавах для равноосного литья, таких как ЖС6К-ВИ, ЖС6У-ВИ, ВЖЛ12У-ВИ и других, накопления кремния практически не отмечается, что связано с кратковременностью и более низкими температурами процесса литья отливок.

Обогащения сплавов кремнием не отмечается также и для безуглеродистых монокристаллических жаропрочных сплавов, таких как ЖС36, ВЖМ5 и др. Отсутствие в этих сплавах углерода практически исключает взаимодействие расплава с керамикой тигля и формы и, как следствие, обогащение ЛПЗ кремнием.

Для снижения содержания кремния с предельных концентраций (0,17–0,20%) в сплаве ЖС32-ВИ, при выплавке ЛПЗ применяют подшихтовку сплава чистой исходной шихтой в количестве 30–50% – об этом свидетельствуют ЛПЗ, выплавленные из возвратного материала ОАО «СМЗ». Начиная с середины 2011 г. при использовании подшихтовки чистой исходной шихтой в количестве 30–50% содержание кремния в ЛПЗ не превышало 0,15% и в основном находилось в пределах 0,08–0,1% (рис. 5).

В ЛПЗ, выплавленной в 2007 г. из чистых шихтовых материалов, содержание кремния в сплаве находится на уровне 0,05–0,08%; использование 100% возвратных материалов (в 2009 и 2011 г.) приводит к увеличению содержания кремния в ЛПЗ – до 0,15–0,18% и превосходит содержание кремния в ЛПЗ производства СМК (0,11% Si). Применение в 2013 г. подшихтовки возвратных материалов чистой шихтой уменьшает среднее содержание кремния до 0,09%, т. е. до уровня содержания кремния, характерного для сплава, выплавленного СМК (см. рис. 5).

Динамика изменения содержания кремния в ЛПЗ из сплава ЖС32-ВИ по годам представлена гистограммами на рис. 6.

Проведен анализ результатов испытания образцов (отлитых с использованием 100% литейных отходов в 2011 г. и с подшихтовкой 30–50% свежей шихты) на длительную прочность при температуре испытаний 975°С и напряжении 300 МПа.

Гистограммы долговечности для выборок представлены на рис. 7.

На гистограммах отмечается повышение долговечности ЛПЗ из сплава ЖС32-ВИ с монокристаллической структурой с КГО [001] в среднем на 20 ч для ЛПЗ, выплавленной в 2013 г. с подшихтовкой 30–50% свежей шихты.

Совокупный параметр качества, индекс пригодности – $P_{р.к}=(X_{ср}-X_{НД})/3\cdot S_S$ составляет:

– в 2011 г. – $P_{р.к}=0{,}81$, что отвечает условию $1{,}33>P_{р.к}>0{,}67$, т. е. процесс производства стабильный, контролируемый, но требует дополнительного анализа и возможности корректировки;

– в 2013 г. $P_{р.к}=1{,}45$, что отвечает условию $P_{р.к}>1{,}33$, т. е. процесс стабильный, контролируемый и управляемый.

Обсуждение и заключения

В соответствии с требованиями ГОСТ Р 50779.44–2001 «Статистические методы. Показатели возможностей процессов. Основные методы расчета», СТО 1-595-1-377–2013 «Контроль качества материалов и полуфабрикатов из жаропрочных сплавов серийного производства» и Руководства Р СЦМ-04–2010 «Оценка качества авиационных материалов/полуфабрикатов при сертификации их производства» проведен анализ качества литой прутковой (шихтовой) заготовки из никелевых жаропрочных сплавов и стабильности технологического процесса производства, разработанного в ВИАМ, на подтверждение «Сертификата производства авиационного материала», выданного Авиационным регистром Межгосударственного комитета.

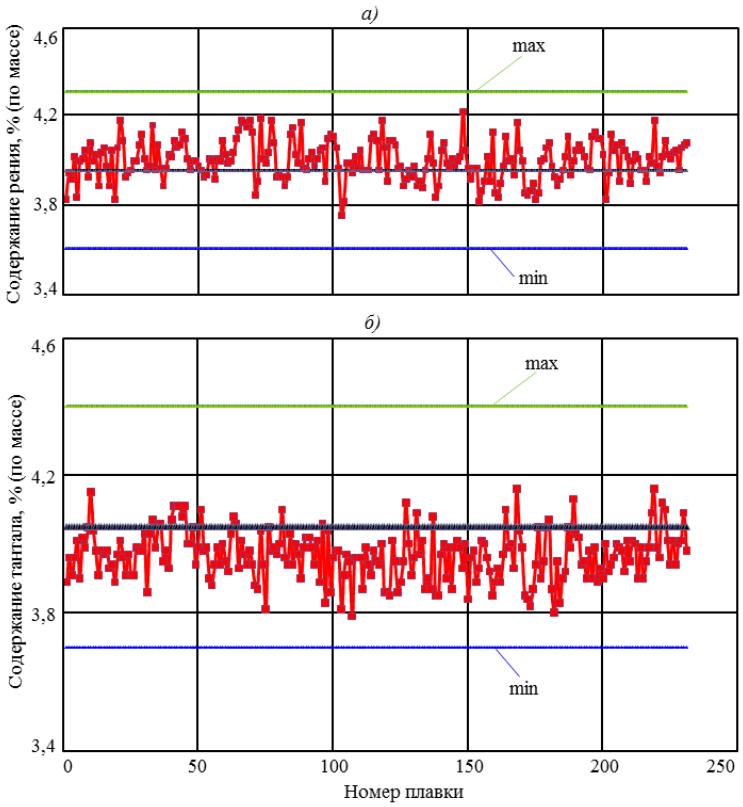

Рис. 1. Контрольные X-карты индивидуальных значений элементов в литой прутковой (шихтовой) заготовке из сплава ЖС32 по содержанию рения (*а*) и тантала (*б*): ■ – определено; ▬ рассчитано

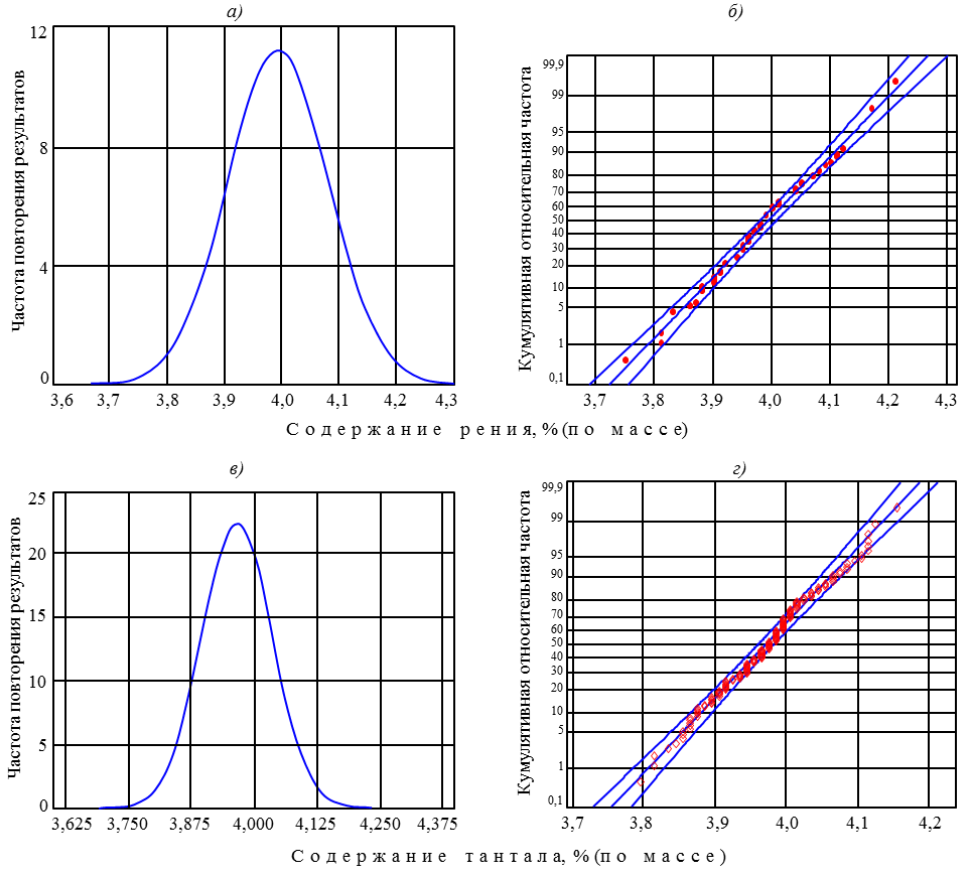

Рис. 2. Гистограммы легирующих элементов (*а*, *в*) в литой прутковой (шихтовой) заготовке из сплава ЖС32 и распределение отклонения вероятностей (доверительная вероятность 95%) от нормального распределения (*б*, *г*) для рения (*а*, *б*) и тантала (*в*, *г*)

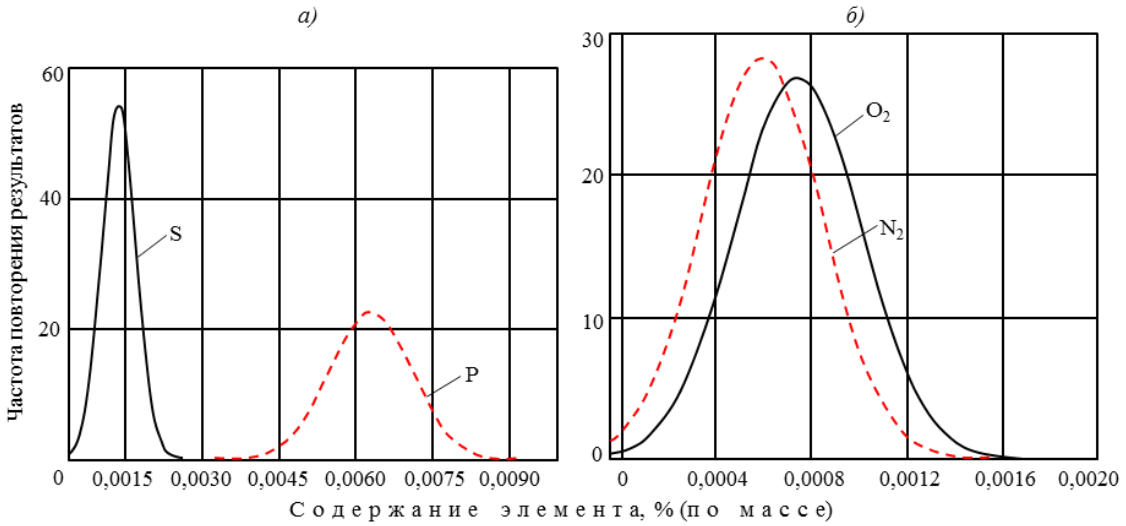

Рис. 3. Гистограммы серы, фосфора, кислорода и азота в литой прутковой (шихтовой) заготовке из сплава ЖС32-ВИ. Содержание элементов по ТУ в % (по массе): серы – не более 0,005, фосфора – не более 0,01, кислорода и азота (каждого) – не более 0,002

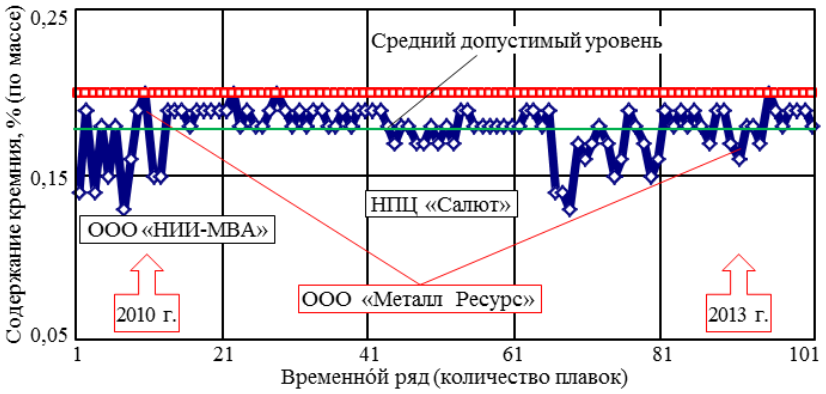

Рис. 4. Контрольная Х-карта индивидуальных значений кремния (□ – максимально допустимое; ◊ – определенное) в литой прутковой (шихтовой) заготовке из сплава ЖС32-ВИ с использованием 100% возвратных материалов различных предприятий-поставщиков

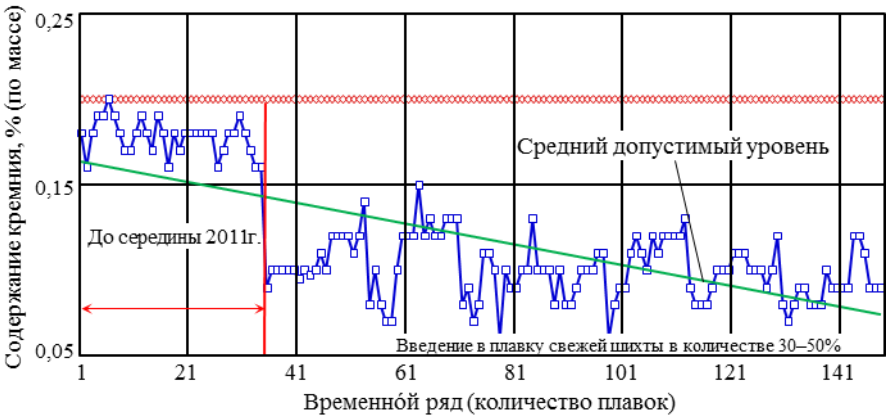

Рис. 5. Контрольная Х-карта индивидуальных значений кремния (◊ – максимально допустимое; □ – определенное) в литой прутковой (шихтовой) заготовке из сплава ЖС32-ВИ с использованием 100% возвратных материалов (поставщик ОАО «СМЗ») и введением в плавку чистых шихтовых материалов в количестве 30–50%

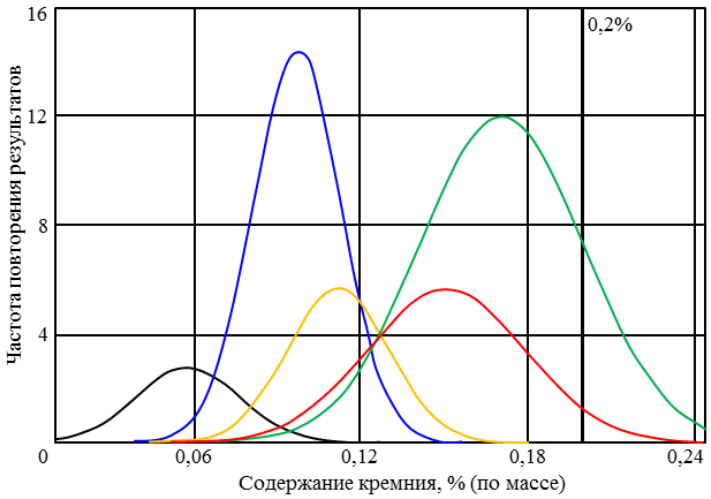

Рис. 6. Гистограммы кремния в литых прутковых (шихтовых) заготовках из сплава ЖС32-ВИ, выплавленных во ФГУП «ВИАМ» в 2007 (—), 2009 (—), 2011 (—), 2013 годах (—) и на СМК (—). Содержание кремния в сплаве ЖС32-ВИ по ТУ составляет ≤0,2%

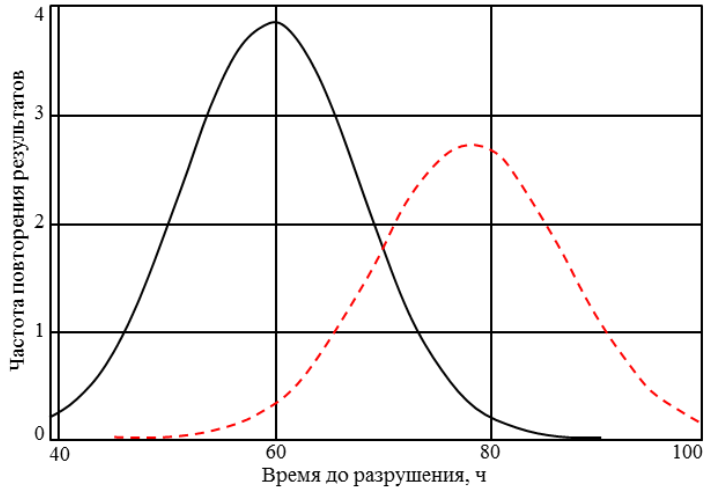

Рис. 7. Гистограммы долговечности литых прутковых (шихтовых) заготовок из сплава ЖС32-ВИ, выплавленных в 2011 (—) и 2013 годах (- - -)

В период 2005–2013 гг. изготовлены и поставлены Заказчику литые прутковые (шихтовые) заготовки из жаропрочных никелевых сплавов: ЖС6У-ВИ, ЖС32-ВИ, ЖС26-ВИ, ЖС36-ВИ, ВКНА-1В-ВИ, ВЖЛ12У-ВИ, ВКНА-1ВР-ВИ и др. Все изготовленные ЛПЗ отвечают требованиям нормативно-технической документации на сплавы как по химическому составу, примесям и газам, так и по механическим свойствам. Случаев рекламации ЛПЗ со стороны Заказчика не было.

Применяемые методы раскисления и рафинирования расплава, использование РЗМ обеспечивают низкое содержание в ЛПЗ примесей цветных металлов, а также серы и фосфора, азота и кислорода (на уровне меньше допускаемых значений по ТУ).

Из всех проанализированных элементов исключение составил кремний, который в ЛПЗ из сплавов для направленной кристаллизации – в частности сплава ЖС32-ВИ – накапливался в сплаве при использовании литейных возвратных материалов. Анализ содержания в сплаве кремния показал, что, вне зависимости от поставщика литейных возвратных материалов, содержание кремния при использовании 100% литейных отходов находится вблизи от верхнего допустимого для сплава ЖС32-ВИ уровня – 0,2%. Применение для подшихтовки литейных отходов 30–50% чистой исходной шихты в процессе производства ЛПЗ из сплава ЖС32 обеспечивает содержание кремния в сплаве на уровне ~0,01%.

Интегральная оценка стабильности производства литой прутковой (шихтовой) заготовки с помощью индекса пригодности $P_{р.к}$ показала, что процесс производства ЛПЗ с равноосной структурой и изготовление образцов из вышеперечисленных сплавов обеспечивают выполнение условия $1{,}33>P_{р.к}>0{,}67$, что свидетельствует о том, что процесс производства стабильный, контролируемый, но требует дополнительного анализа и возможности корректировки. Возможными причинами повышенной дисперсии свойств могут являться разнозернистость образцов, а также состояние поверхности образцов перед испытанием.

Для ЛПЗ из сплава ЖС32-ВИ с применением 30–50% чистой шихты с регламентированной монокристаллической структурой с КГО [001] индекс пригодности достигает значений $P_{р.к}>1{,}33$, что отвечает процессу стабильному, контролируемому и управляемому.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Физико-химические и технологические особенности создания жаропрочных сплавов, содержащих рений //Вестник МГУ. Сер. 2 «Химия». 2005. Т. 46. №3. С. 155.
2. 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. №S. С. 97–105.
3. 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.
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. 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.
6. Сидоров В.В., Исходжанова Н.В., Ригин В.Е., Фоломейкин Ю.И. Оценка эффективности фильтрации при разливке сложнолегированного никелевого расплава //Электрометаллургия. 2011. №11. С. 17–22.
7. 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.
8. Руководство Р СЦМ-04-2010 Оценка качества авиационных материалов/полуфабрикатов при сертификации их производства. М. 2011. Вып. 4.
9. ГОСТ Р 50779.44–2001 Статистические методы. Показатели возможностей процессов. Основные методы расчета.
10. ГОСТ Р ИСО 5479–2002 Статистические методы. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения.
11. ГОСТ 17745–90 Стали и сплавы. Методы определения газов.
12. Отраслевой стандарт ОСТ1 90128–96. Сплавы никелевые жаропрочные. Общие требования к методам анализа. Требования безопасности.
13. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б., Толорайя В.Н. и др. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение. 1997. 336 с.
14. Каблов Е.Н., Орехов Н.Г., Толорайя В.Н., Демонис И.М. Литейные жаропрочные сплавы и технология получения монокристаллических турбинных лопаток ГТД //Технология легких сплавов. 2002. №4. С. 100–105.
15. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 36–52.
16. 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.
17. Толорайя В.Н., Остроухова Г.А., Орехов Н.Г. Влияние ростового градиента на структуру и прочностные характеристики монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов //МиТОМ. 2014 (в печати).
18. Бондаренко Ю.А., Каблов Е.Н., Морозова Г.И. Влияние высокоградиентной направленной кристаллизации на структуру и фазовый состав жаропрочного сплава типа RENE-N5 //МиТОМ. 1999. №2. С. 15–18.
19. Толорайя В.Н., Филонова Е.Н., Остроухова Г.А., Алешин И.Н. Микрорыхлота в монокристаллических отливках из безуглеродистых жаропрочных сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2010. №4. С. 12–16.
20. 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).
21. 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).
22. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Бронфин М.Б., Алексеев А.А. Особенности монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов, легированных рением //Металлы. 2006. №5. С. 47–57.
23. 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.
24. Каблов Д.Е., Сидоров В.В. Азот в монокристаллических жаропрочных сплавах //Литейное производство. 2012. №3. С. 6–8.
25. 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.