

УДК 669.245.018.44.046.5

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-3-7

А.В. Горюнов¹, В.Е. Ригин¹**СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ
ЛИТЕЙНЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ**

На основании проведенных исследований разработана современная технология получения литейных жаропрочных никелевых сплавов с использованием до 100% литейных отходов, в том числе некондиционных. Данная технология обеспечивает качество литых прутковых заготовок по содержанию примесей, газов и механическим свойствам сплавов в соответствии с требованиями ТУ или ОСТ, снижение стоимости сплавов и сокращение расходов дефицитных и дорогостоящих легирующих металлов.

Ключевые слова: жаропрочный сплав, отходы, примеси, длительная прочность, жаростойкость, экспресс-анализ.

On the basis of conducted researches the modern technology of cast nickel base superalloys production with up to 100% cast scrap usage including off-grade scrap was developed. This technology ensure the cast bars quality by impurities and gases content and mechanical properties in accordance with TU or OST requirements, reducing cost of alloys and dwindling the consumption of deficient and expensive alloying metals.

Keywords: superalloy, scrap, impurities, stress rupture, heat resistance, on line analysis.

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

За последние годы в ВИАМ разработана целая гамма никелевых жаропрочных сплавов нового поколения (безуглеродистых, высокорениевых, рений- и рутенийсодержащих, интерметаллидных), которые обладают уникальным сочетанием свойств, обеспечивающих работоспособность этих материалов при температуре газа перед турбиной 2000–2200 К, что позволяет существенно улучшить тактико-технические характеристики двигателей и самолетов.

Как показывает отечественный и зарубежный опыт, важнейшим условием реализации высоких технических и технологических свойств монокристаллических рабочих лопаток из литейных жаропрочных никелевых сплавов нового поколения является технология их производства [1–4]. Технология должна обеспечивать:

- стабильность химического состава сплава в минимально узких пределах легирования;
- ультранизкое содержание вредных примесей – углерода, серы, газов (кислорода, азота), примесей цветных металлов (свинца, висмута, серебра, теллура, таллия и др.), неметаллических включений;
- плотное, с минимальным количеством усадочных дефектов, строение полученных литых прутковых заготовок с высоким выходом годного.

Для обеспечения перспективных газотурбинных двигателей данными литейными сплавами в институте разработана технология производства этих сплавов, которая включает следующие основные положения:

- корректировка химического состава сплавов в процессе выплавки путем отбора пробы металла по

ходу плавки для проведения экспресс-анализа металла на современном аналитическом оборудовании;

- комплексное высокотемпературное активное рафинирование металла от примесей в вакууме [5, 6];
- микролегирование сплавов редкоземельными металлами для дополнительного повышения характеристик длительной прочности и жаростойкости сплавов [7];

– применение фильтрации расплава от неметаллических включений с использованием пенокерамического фильтра при разливке металла [8];

- разливка металла в стальные трубы (вместо ранее применяемых составных чугунных кокилей) с использованием утеплительных вставок для получения плотных заготовок и минимизации размера дефектной головной части заготовки.

Разработанная технология положена в основу решения другой важной задачи производства литейных жаропрочных сплавов – полного использования всех видов отходов: как кондиционных (обрезы донной и головной части прутковых заготовок, прибыльных и литниковых частей отливок и др.), так и некондиционных (гарнисажа с плавильного тигля, промежуточного ковша и литейной оснастки; скрапин, слесов и корольков после разливки металла; стружки, образующейся после механической обработки литых прутковых заготовок и отлитых из них деталей; лопаток, отработавших свой ресурс, и др.), которые образуются на металлургических, моторостроительных и ремонтных заводах.

Для стабилизации химического состава рений-рутенийсодержащего сплава ВЖМ4-ВИ отработана

на методика его выплавки в вакуумной индукционной печи с проведением экспресс-анализа металла в процессе плавки, который включает отбор проб металла по ходу плавки, анализ металла на современном оптико-эмиссионном спектрометре, доводку состава расплава по результатам анализа до оптимального [9]. Результаты экспресс-анализа двух плавок, выполненного на пробах, взятых из расплава перед разливкой, приведены в табл. 1. На первой плавке отмечено отклонение от оптимального состава по W и Ta, а на второй – по Al и Ta. Путем подшихтовки соответствующих количеств этих элементов в расплав в итоговом составе сплава полученные интервалы легирования по всем элементам укладываются в пределы $\pm 0,2\%$, что гарантирует фазовую стабильность такого металла.

При проведении входного контроля литейных отходов на целом ряде поступивших с моторостроительных заводов партий отходов обнаружено, что по некоторым легирующим элементам имеются значительные отклонения от оптимального состава сплава. Это вполне объяснимо, поскольку на ряде заводов отходы при отливке деталей многократно подшихтовываются в количестве 50 (для рабочих лопаток) и 80% (для сопловых лопаток) от массы плавки к свежему сплаву и состав сплава изменяется вследствие окисления активных металлов (алюминия и титана), испарения хрома, имеющего повышенную упругость пара, ликвиции тугоплавких металлов (вольфрама, рения, молибдена, ниобия и других). Это подтверждается результатами химического анализа поступивших в институт литейных отходов сплава ВЖЛ12У-ВИ (табл. 2). Видно, что содержание хрома и титана в отходах находится ниже нижнего предела нормы по ТУ, а содержание алюминия – на нижнем пределе.

Однако применение разработанной в институте технологии доводки химического состава сплава до оптимального путем проведения экспресс-анализа расплава в процессе плавки позволяет проводить долегиrowание сплава и получать его оптимальный химический состав с отклонением $\pm 0,20-0,30\%$ по всем легирующим элементам от расчетного (табл. 3).

Исследовали влияние микролегиrowания лантаном сплава ВЖМ4-ВИ на его длительную прочность и жаростойкость (рис. 1 и 2) [10–13].

Анализ жаропрочных свойств сплава ВЖМ4-ВИ без лантана и с добавкой лантана (см. рис. 1) показал, что благодаря введению в сплав лантана повысилась долговечность сплава при испытании на длительную прочность: при 1000°C – в 1,65 раза, а при 1100°C – в 2,45 раза.

Жаростойкость определяли по удельному изменению массы – привесу. Видно (см. рис. 2), что привес на образцах с лантаном в 1,5–2 раза меньше, чем на образцах без La. Таким образом, добавка лантана позволила повысить жаростойкость

сплава ВЖМ4-ВИ при температуре 1100°C .

Известно, что использование пенокерамических фильтров в процессе разлиwки жаропрочных сплавов позволяет эффективно очищать расплав от неметаллических включений (оксидов, нитридов, сульфидов и др.).

Пенокерамический фильтр характеризуется высокой открытой пористостью и развитой поверхностью. Такая структура фильтра позволяет эффективно задерживать неметаллические включения в фильтруемом металле при условии смачивания расплавленным металлом поверхности пенокерамического фильтра.

Исследован процесс фильтрации расплава при выплавке рений-рутенийсодержащего сплава ВЖМ4-ВИ через пенокерамический фильтр. Плавки проводили в вакуумной индукционной печи – в керамическом тигле (20 кг). В качестве шихты использовали 100% отходов сплава ВЖМ4-ВИ, состоящих из собственных отходов и отходов литейного производства (литники, литниковые чаши).

При проведении плавок отбирали пробу жидкого металла перед началом фильтрации и анализировали залитую заготовку после фильтрации.

Металл заливали в стальную трубу с установленной на ней утеплительной вставкой, в которую смонтирован пенокерамический фильтр.

В результате фильтрации в металле в 2–2,5 раза понизилось содержание примесей: кислорода – с 0,0014 до 0,0005%, азота – с 0,0005 до 0,0002%, серы – с 0,0010 до 0,0005% (рис. 3).

Проведен контроль чистоты литых прутковых заготовок из сплавов ЖС32-ВИ и ЖС26-ВИ, полученных с использованием 100% литейных отходов (данные ФГУП «НПЦ газотурбостроения „Салют“»). Исследования проводили по центру и периферии литых прутковых заготовок и по разным типам трех типов включений: шлаковым, оксидным пленам и нитридам.

По результатам исследований установлено, что итоговый балл загрязненности по всем трем типам включений равен нулю.

Исследовано влияние переменного количества некондиционных отходов на длительную прочность сплава ВЖМ4-ВИ [14].

Некондиционные отходы имеют повышенную окисленность, загрязнены керамикой, стружка после механической обработки покрыта маслом и эмульсией, поэтому проводится их предварительная подготовка, которая включает сортировку, измельчение, промывку и обезжиривание стружки, а также предварительное рафинирование путем переplava в вакууме.

Выплавку готового сплава проводили в вакуумной индукционной печи с введением различного количества рафинированных некондиционных отходов (остальное – кондиционные отходы в виде обрезки заготовок и свежая шихта). После расплавления металла брали пробу для проведе-

Таблица 1

Отработка методики стабилизации химического состава при выплавке сплава ВЖМ4-ВИ

Условный номер плавки	Проба металла	Содержание элементов, % (по массе)		
		Al	W	Ta
1	Экспресс-анализ	6,08	3,71	4,15
	Подшихтовка	–	+0,30	+0,30
	Итоговый анализ	6,16	3,99	4,40
2	Экспресс-анализ	5,62	3,86	4,14
	Подшихтовка	+0,35	–	+0,40
	Итоговый анализ	6,03	3,95	4,53
1	Интервалы легирования	+0,16	-0,01	-0,10
2		+0,03	-0,05	+0,03

Таблица 2

Содержание легирующих элементов в литейных отходах сплава ВЖЛ12У-ВИ

Условный номер партии отходов	Содержание элементов, % (по массе)		
	Cr	Ti	Al
1	8,6	4,10	5,11
2	8,72	3,94	5,11
3	8,66	3,94	5,05
4	8,6	4,05	5,0
По ТУ на сплав	9,0–10,0	4,2–4,7	5,1–5,7

Таблица 3

Содержание легирующих элементов в сплаве ВЖЛ12У-ВИ, изготовленном с применением 100% литейных отходов

Условный номер плавки	Содержание элементов, % (по массе)		
	Cr	Ti	Al
12В-143В	9,27	4,56	5,43
12В-144В	9,22	4,53	5,41
12В-145В	9,17	4,56	5,43
12В-146В	9,29	4,55	5,56
По ТУ на сплав	9,0–10,0	4,2–4,7	5,1–5,7

Таблица 4

Результаты испытаний на длительную прочность сплава ВЖМ4-ВИ, полученного с использованием рафинированных некондиционных отходов

Условный номер плавки	Количество отходов*, %	Время до разрушения τ , ч, при $T=1000^\circ\text{C}$; $\sigma=294$ МПа
1	100 (н/к)	102
2	25% (н/к)+75 (к)	99
3	50 (н/к)+50 (к)	80
4	75 (н/к)+25 (к)	90
5	25% (н/к)+25 (к) + 50 (свежая шихта)	95
Норма по ТУ		≥ 80

* н/к – некондиционные, к – кондиционные отходы.

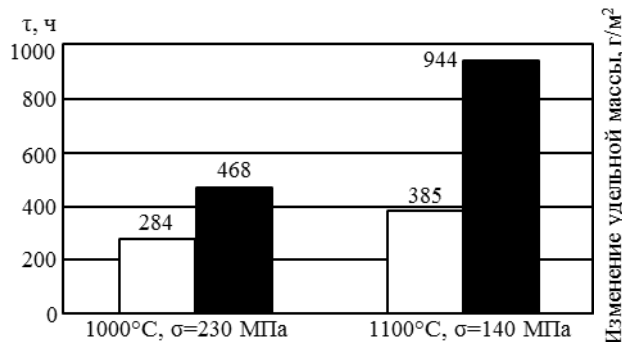


Рис. 1. Влияние лантана на долговечность τ при испытании на длительную прочность сплава ВЖМ4-ВИ: □ – без La; ■ – с La

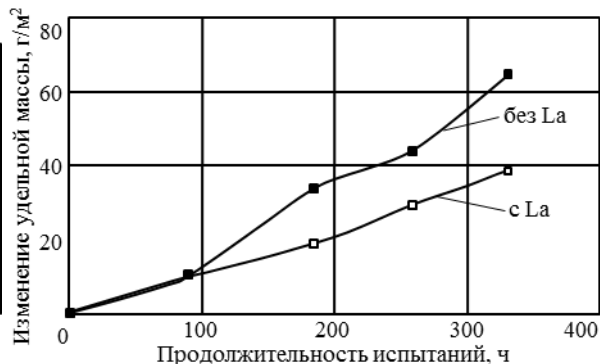


Рис. 2. Влияние лантана на изменение удельной массы при испытании сплава ВЖМ4-ВИ на жаростойкость при 1100°C

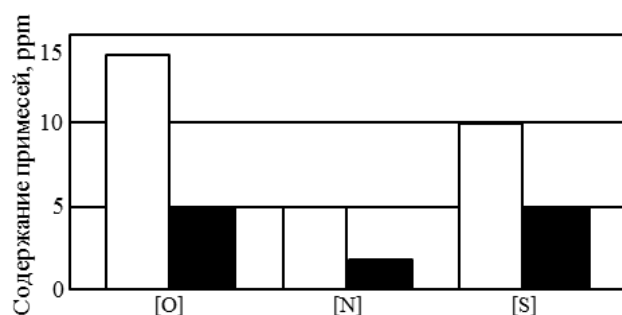


Рис. 3. Влияние фильтрации на содержание вредных примесей в сплаве ВЖМ4-ВИ: □ – до фильтрации; ■ – после фильтрации

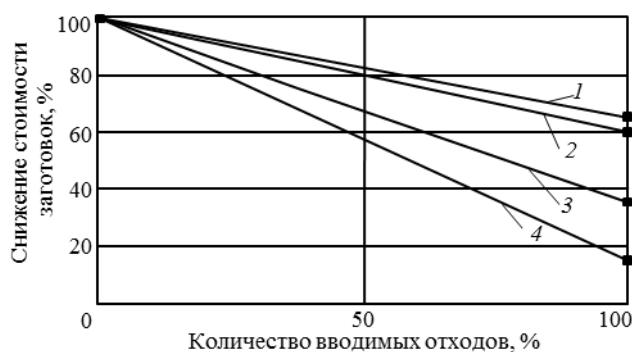


Рис. 4. Снижение стоимости литых прутковых заготовок жаропрочных никелевых сплавов ЖС6У-ВИ (1), ЖС26-ВИ (2), ЖС32-ВИ (4% Re) (3) и ВЖМ4-ВИ (6% Re, 4% Ru) (4) в зависимости от количества вводимых отходов

ния экспресс-анализа. Проводили дошихтовку сплава до оптимального состава с учетом данных, полученных с помощью анализа. Металл заливали через пеночерамический фильтр в стальную трубу.

Проведены испытания на длительную прочность металла пяти плавок по нормам технических условий (ТУ). Результаты испытаний приведены в табл. 4.

Анализ результатов (см. табл. 4) показывает, что разработанная технология позволяет даже при использовании при плавке 100% предварительно подготовленных некондиционных отходов получать характеристики длительной прочности (τ), удовлетворяющие требованиям ТУ: время до разрушения при температуре 1000°C и нагрузке 294 МПа составляет ≥80 ч (фактически 102 ч).

На рис. 4 приведены результаты оценки снижения стоимости литых прутковых заготовок литейных жаропрочных никелевых сплавов в зависимости от количества вводимых отходов.

При введении 100% отходов стоимость жаропрочных никелевых сплавов ЖС6У-ВИ и ЖС26-ВИ снижается на 30–40%, сплава ЖС32-ВИ – на 60–70%, сплава ВЖМ4-ВИ – на 80–85%.

Разработанная технология получения литейных жаропрочных никелевых сплавов реализована на созданном в ВИАМ научно-производственном комплексе по изготовлению литых прутковых заготовок из жаропрочных никелевых сплавов [15, 16]. Комплекс включает в себя ряд отдельных участков, оборудованных современным производственным, аналитическим и испытательным оборудованием.

Разработанная технология получения литейных жаропрочных никелевых сплавов обеспечивает:

- стабильный химический состав сплавов по основным легирующим элементам;
- качество литых прутковых заготовок по содержанию примесей, газов и механическим свой-

ствам сплавов в соответствии с требованиями ТУ или ОСТ;

- снижение стоимости сплавов и сокращение расходов дефицитных и дорогостоящих легирующих металлов, таких как никель, кобальт, молибден, вольфрам, рений, тантал и другие.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии 2012. №S. С. 7–17.
2. 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». 2011. №SP2. С. 68–78.
3. 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. 36–51.
4. 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.
5. 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.
6. Каблов Д.Е., Сидоров В.В. Азот в монокристаллических жаропрочных сплавах //Литейное производство. 2012. №3. С. 6–8.
7. 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).
8. Сидоров В.В., Исходжанова И.В., Ригин В.Е., Фоломейкин Ю.И. Оценка эффективности фильтрации при разливке сложнелегированного никелевого расплава //Электрометаллургия. 2011. №11. С. 23–27.
9. 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.
10. Сидоров В.В., Горюнов А.В., Колмыкова Н.А. Влияние лантана на жаростойкость монокристаллов из высокожаропрочного сплава ВЖМ4-ВИ, содержащего рений и рутений //МиТОМ. 2012. №3. С. 23–27.
11. 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.
12. Горюнов А.В., Сидоров В.В., Ригин В.Е., Зайцев Д.В. Формирование наноструктурированного состояния в литейном жаропрочном сплаве ВЖМ4-ВИ при микролегировании его лантаном //Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 39–43.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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. 2011. Т. 1. Екатеринбург: «Наука Сервис». 2011. С. 31–38.