

УДК 669.018.44:669.245

Е.Н. Каблов<sup>1</sup>, В.В. Сидоров<sup>1</sup>, Д.Е. Каблов<sup>1</sup>, П.Г. Мин<sup>1</sup>

## **МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫСОКОГО КАЧЕСТВА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-55-71

*Для получения бездефектных монокристаллических отливок из высокожаропрочных сплавов необходимо обеспечить в них ультранизкий уровень таких примесных элементов, как сера, фосфор, кислород, азот, углерод, цветные металлы. В результате проведенных термодинамических расчетов и выполненных научно-исследовательских работ определены условия эффективного удаления из расплава указанных примесей различными способами: управлением температурой и продолжительностью рафинирования расплава, введением высокоактивных добавок РЗМ, применением пенокерамических фильтров для осаждения соединений примесей с рафинирующими добавками. В результате получены монокристаллы с ультранизким содержанием азота (<0,001%), кислорода (<0,001%), серы (<0,0005%), фосфора (<0,005%), углерода (<0,005%), свинца (<0,00001%), с повышенными параметрами жаростойкости покрытия при 1150 °С, малоциклового усталости при 900 °С и длительной прочности при 1000 °С на базе 500–1000 ч.*

*Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10.1. «Ресурсосберегающие технологии выплавки перспективных литейных и деформируемых супержаропрочных сплавов с учетом переработки всех видов отходов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].*

**Ключевые слова:** жаропрочный сплав, примеси, длительная прочность, сера, фосфор, кислород, азот, рафинирование.

*E.N. Kablov, V.V. Sidorov, D.E. Kablov, P.G. Min*

### **The metallurgical fundamentals for high quality maintenance of single crystal heat-resistant nickel alloys**

*To produce single crystal castings from super alloys without defects it is necessary to provide them with an ultra-low level of impurities such as sulfur, phosphorus, oxygen, nitrogen, carbon, non-ferrous metals. As result of conducted thermodynamic calculations and executed science-research works the conditions*

<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

*of effective removal of the impurities from melt by different methods: melt temperature and duration refining control, introduction of high active REM additions, application of ceramic foam filters for precipitation of the impurities junctions with refining additions were determined. As result the single crystals with ultra-low content of nitrogen (<0,001%), oxygen (<0,001%), sulfur (<0,0005%), phosphorus (<0,005%), carbon (<0,005%), plumbum (<0,00001%), also with high level parameters of heat resistance coating at 1150 °C, low fatigue at 900 °C and stress rupture at 1000 °C on 500–1000 hour base were produced.*

*The work is executed within the implementation of the complex scientific direction 10.1. «Resource-saving melting technologies of advanced cast and wrought highly heat-resistant alloys with provision for processing of all types of wastes» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].*

**Keywords:** *heat-resistant alloy, impurities, stress rupture strength, sulfur, phosphorus, oxygen, nitrogen, refining.*

Создание современных высокоресурсных авиационных ГТД невозможно без применения в них лопаток с монокристаллической структурой [2]. Наряду с высокими жаропрочными свойствами такие лопатки отличаются повышенной термостойкостью и более медленным разупрочнением металла при эксплуатации, а также повышенными механической и термической выносливостью. Такое уникальное сочетание различных свойств в монокристаллах позволяет эффективно использовать их в качестве материала лопаток турбины для работы в условиях сверхвысоких температур и напряжений, что дает возможность увеличить тягу и ресурс двигателя [3–5].

Экспериментальные данные показывают, что, в отличие от традиционных литейных жаропрочных сплавов с равноосной и направленной структурой, получить высококачественные лопатки с бездефектной монокристаллической структурой возможно только при использовании для их отливки сплавов с ультранизким содержанием вредных примесей: углерода, кислорода, азота, серы, фосфора, а также легкоплавких цветных металлов. Это гарантирует рост монокристаллов с заданной кристаллографической ориентацией, получение высокого уровня свойств, отсутствие ТПУ фаз, стабильность их микроструктуры при длительной эксплуатации лопаток в двигателе.

Однако традиционные технологии выплавки литейных жаропрочных сплавов для получения отливок с равноосной структурой, которые в настоящее время применяются на отечественных заводах качественной металлургии, не могут быть использованы при выплавке жаропрочных сплавов нового поколения для монокристаллического литья, поскольку не позволяют снизить в сплавах содержание примесей до требуемого низкого уровня [6–12].

В связи с необходимостью обеспечения моторостроительных предприятий разработанными во ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ высокожаропрочными сплавами для получения лопаток с монокристаллической структурой, проведены научно-исследовательские работы и разработаны принципиально новые технологии получения монокристаллических сплавов нового поколения с гарантировано низким содержанием примесных элементов, что обеспечило повышение служебных свойств сплавов и в первую очередь характеристик длительной и усталостной прочности, а также структурной стабильности при длительном ресурсе работы [13–15].

В качестве объектов исследования выбраны серийные литейные высокожаропрочные сплавы для монокристаллического литья марок ЖС30 (ТУ1-92-177) и ЖС32 (ТУ1-92-177), безуглеродистые литейные ренийсодержащие жаропрочные никелевые сплавы:

- второго поколения – ЖС36 (ТУ1-595-4-473);
- третьего поколения – ВЖМ4 (ТУ1-595-1-9488) и ВЖМ5 (ТУ1-595-1-1073) [16].

Сплавы выплавляли в вакуумной индукционной печи ВИАМ-2002 с массой тигля 10–20 кг под вакуумом  $(1-5) \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст. Металл заливали в стальную трубу с внутренним диаметром 70–90 мм. Часть плавок заливали через пенокерамический фильтр, нагретый до 1000°C. Полученные слитки подвергали механической обработке поверхности, а затем переплавляли методом направленной кристаллизации в вакуумных индукционных установках УВНК-9А ( $G=70^\circ\text{C}/\text{см}$ ) и УВНС-5 ( $G=150^\circ\text{C}/\text{см}$ ) для получения монокристаллических заготовок с кристаллографической ориентацией  $\langle 001 \rangle$ .

Для разработки теоретических основ обеспечения высокого качества монокристаллических жаропрочных сплавов использовали компьютерную программу TERRA и сопряженную с ней справочную базу данных, содержащую свойства ~3000 соединений\*.

К достоинствам компьютерной программы TERRA следует отнести возможность ввода до 20 реагирующих компонентов гетерогенной системы в количествах, предусмотренных заданием. При проведении расчетов вводили следующие исходные данные: химический и массовый состав реагирующей системы, выраженный в массовых процентах, температуру и давление в системе. На выходе получали равновесное массовое количество продуктов взаимодействия в виде конденсированных и газообразных соединений. Полученные данные подвергали анализу и обрабатывали в виде таблиц и графиков.

Для расчета состава и количества фаз использовали метод расчета равновесия в многокомпонентных гетерогенных системах, основанный на использовании принципа максимума энтропии, который справедлив в соответствии со вторым началом термодинамики для любой равновесной системы.

\* Термодинамические расчеты выполнены д.т.н. В.Н. Симоновым (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Рассмотрены различные направления выбора рафинирующих и микролегирующих добавок для сложнолегированных жаропрочных никелевых сплавов, включающие анализ диаграмм фазового состояния рафинирующих добавок и основы сплава – никеля, термодинамический анализ продуктов взаимодействия добавок с примесями и компонентами сплава и кристаллографические особенности этих фаз.

Для качественной оценки влияния примесей и микролегирующих элементов на структуру и свойства сплавов использованы сведения об электроотрицательности этих элементов, что позволило оценить эффективность восстановительных процессов в жаропрочных никелевых сплавах и сделать вывод о целесообразности применения лантана в качестве микролегирующей и рафинирующей добавки.

Анализ сведений о диффузионной подвижности легирующих элементов, примесей и рафинирующих добавок в температурном интервале эксплуатации сплавов свидетельствует о том, что диффузионная подвижность примесей углерода, азота, серы намного превосходит диффузионную подвижность легирующих элементов и большинства применяемых рафинирующих добавок. Эти примеси могут оказать негативное влияние на формирование структуры и свойств даже на начальных этапах эксплуатации. Среди рафинирующих добавок наиболее высокую диффузионную подвижность имеет иттрий и его нейтрализующее действие на примеси должно происходить при проведении рафинирования расплава, а также на начальных этапах эксплуатации. В качестве быстродействующей микролегирующей добавки на начальной стадии рафинирования оправдано применение магния. Нейтрализующее действие гафния, церия, лантана, коэффициенты диффузии которых ниже, чем у иттрия, должно происходить на более поздних этапах эксплуатации. Из вышеперечисленных рафинирующих добавок лантан имеет наибольшее химическое сродство к примесям и оказывает наиболее глубокое рафинирующее действие.

Установлены основные закономерности поведения примесей на различных этапах плавки и направленной кристаллизации монокристаллических заготовок из жаропрочных никелевых сплавов и выявлено их неравномерное распределение по высоте монокристаллических отливок.

Сера, фосфор и азот в низких концентрациях распределяются равномерно по высоте заготовки, в то время как углерод даже при содержании  $<0,005\%$  (по массе), а также кислород при содержании  $<0,001\%$  (по массе) вытесняются растущими кристаллами в верхнюю часть заготовки. В то же время содержание свинца в направлении роста монокристалла снижается в результате его испарения в вакууме. В процессе направленной кристаллизации вытеснения нитридов, карбидов, карбонитридов растущим монокристаллом в верхнюю часть заготовки не происходит, поэтому при

повышенном содержании азота (0,002% (по массе)) и углерода (0,023% (по массе)) они распределяются неравномерно по высоте заготовки, концентрируясь в основном в нижней и средней части заготовки [17–20]. При повышенном содержании кислорода в сплаве (0,002% (по массе)), также как при его низком содержании (<0,001% (по массе)), он в виде оксидов вытесняется растущими кристаллами в верхнюю часть заготовки.

Определены термодинамические и кинетические условия эффективного удаления углерода, кислорода, серы, фосфора различными способами: увеличением температуры рафинирования расплава для свинца, кислорода и углерода; введением химически высокоактивных добавок редкоземельных элементов (La, Ce, Y) для удаления серы и нейтрализации фосфора; применением пенокерамических фильтров для осаждения соединений примесей с рафинирующими добавками.

Удаление углерода целесообразно проводить при максимально возможных температурах в условиях вакуума по реакции  $C + 2NiO \rightarrow 2Ni + CO_2 \uparrow$ . При избытке оксида никеля расплав обогащается кислородом. Очистка сплава от кислорода возможна введением Ca, Ce, Y, образующих термодинамически прочные оксиды CaO,  $Y_2O_3$ ,  $CeO_2$ . Одновременно снижается содержание углерода в расплаве, который связывается в карбиды  $YS$ ,  $Ce_2C_3$ ,  $CaC_2$ .

Полученные экспериментальные результаты по удалению примесей из сплава хорошо согласуются с термодинамическими расчетами. Так, с повышением температуры расплава скорость удаления свинца под вакуумом увеличивается и достигает максимальной величины при температуре 1650°C (рис. 1). Термодинамическими расчетами показано, что расчетное время процесса для получения содержания 0,000009% (по массе) свинца в расплаве при температуре рафинирования 1530°C составляет 46 мин, а при 1650°C: 12 мин.

Проведены исследования по удалению из сплава ЖС36 примесей серы и фосфора путем микролегирования лантаном. Установлено, что лантан связывает серу в тугоплавкие (термодинамически прочные) сульфиды LaS, которые удаляются из расплава за счет адгезии на стенках плавильного тигля при плавке и затем при фильтрации расплава с помощью пенокерамического фильтра при разливке. Степень десульфурации составила 90% (рис. 2) [21–26]:

Исследована керамика плавильного тигля до и после проведения плавок металла, содержащего сульфиды лантана, а также исследован материал пенокерамического фильтра после фильтрации такого металла (рис. 3).

$$\frac{[S]_{\text{нач}} - [S]_{\text{кон}}}{[S]_{\text{нач}}} \cdot 100\%.$$

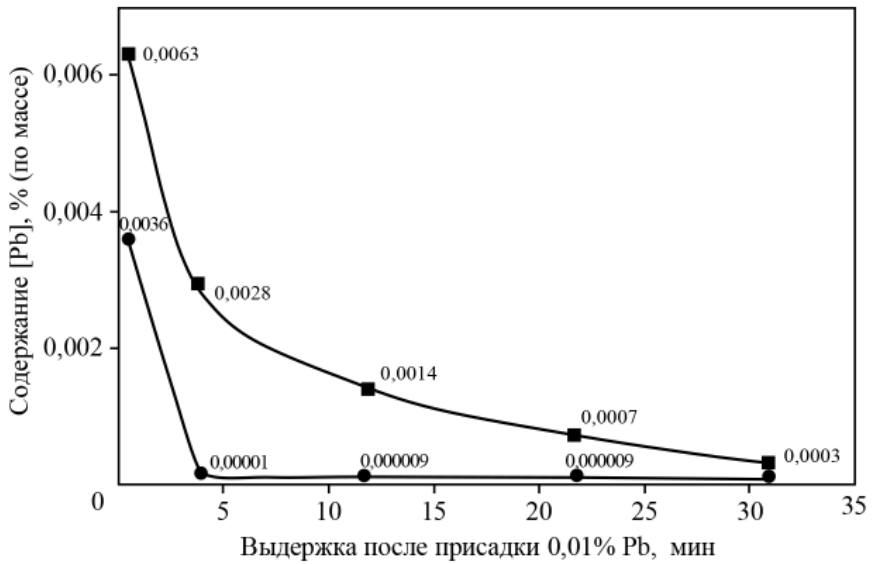


Рис. 1. Изменение содержания свинца при выплавке на установке ВИАМ-2002 сплава ЖС36 в зависимости от температуры расплава: 1530 (■) и 1650°C (●)

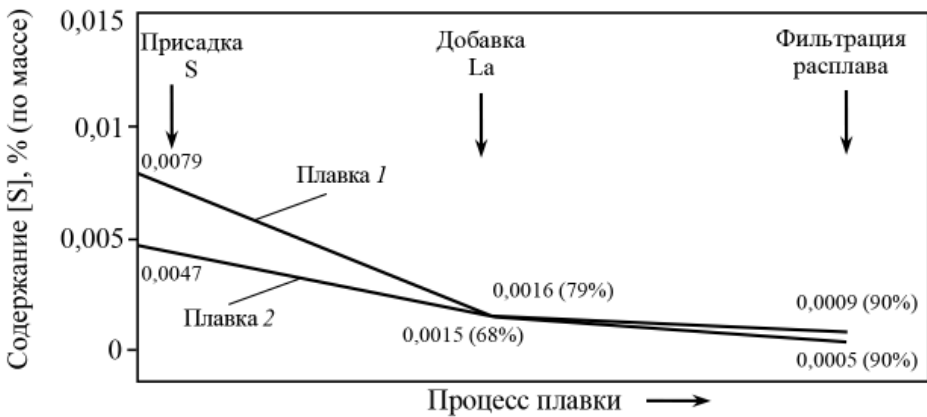


Рис. 2. Влияние присадки La и фильтрации расплава на десульфурацию сплава ЖС36 (установка ВИАМ-2002)

Установлено, что при плавке и разливке через пенокерамический фильтр происходит насыщение серой как керамики плавильного тигля, так и материала фильтра. Если в рабочем слое тигля до проведения пла-

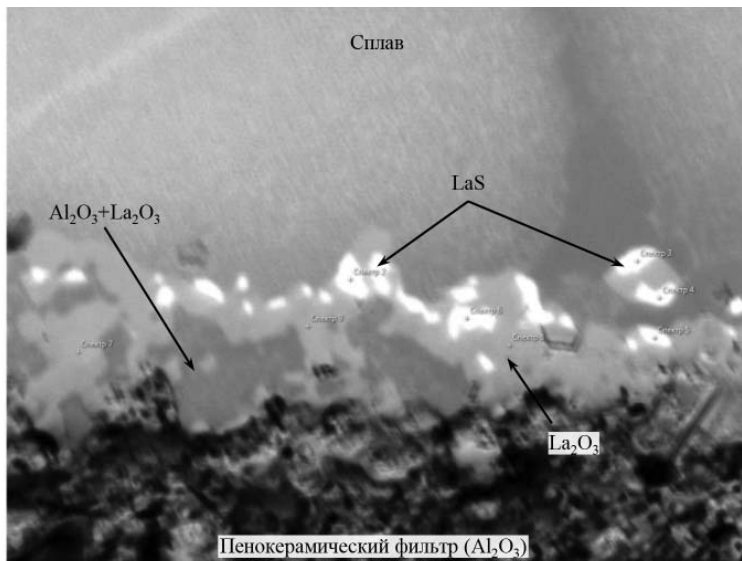


Рис. 3. Адгезия сульфидов лантана на пенокерамическом фильтре при разливке сплава ЖС36

вок содержание серы составило 0,0027% (по массе), то после окончания плавки оно увеличилось до 0,045% (по массе); содержание серы в материале фильтра после окончания плавки также повысилось с 0,0005 (до фильтрации) до 0,0013% (по массе) (после фильтрации). Содержание серы в металле, взятом из материала фильтра, после проведения плавки (0,029% (по массе)) и особенно в керамике со стенок тигля (1,29% (по массе)) в несколько раз превышает содержание серы в готовом металле (0,0005–0,0009% (по массе)) [27, 28].

В отличие от серы, при микролегировании сплава ЖС36 лантаном, фосфор не удаляется как при плавке, так и при разливке через пенокерамический фильтр. При этом образуются тугоплавкие соединения лантана с фосфором, тем самым нейтрализуется вредное влияние фосфора на служебные свойства монокристаллов [29–31].

Исследовали влияние примесей и микролегирующих добавок на служебные характеристики монокристаллов сплава ЖС36, отлитых на установках УВНК-9А и УВНС-5. Установлено, что свойства сплава при кратковременном разрыве при температурах 20; 900 и 1100°C с определением  $\sigma_{\text{в}}$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ ,  $\psi$  на всех плавках, содержащих примеси серы, фосфора, углерода, кислорода, азота и свинца, практически одинаковые.

При испытании металла этих же плавок на длительную прочность по ТУ1-595-4-473 (при 975°C,  $\sigma=320$  МПа,  $\tau \geq 40$  ч) значения долговечности плавок с пониженным и повышенным уровнем примеси серы приблизительно одинаковы, однако при испытаниях на базе 500 ч (при 1000°C,  $\sigma=185$  МПа) долговечность повышается при снижении содержания серы в сплаве после присадки лантана – с 0,0072 до 0,0007% (по массе), особенно на металле, полученном на установке УВНК-9А (рис. 4).

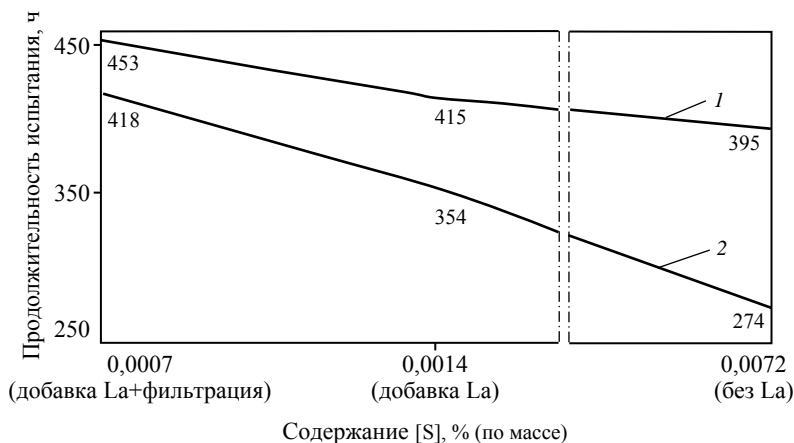


Рис. 4. Влияние переменного содержания серы на долговечность монокристаллов <001> сплава ЖС36 (при 1000°C,  $\sigma=185$  МПа), отлитого на установках УВНС-5 (1) и УВНК-9А (2)

Аналогичные результаты получены при испытании на длительную прочность монокристаллов сплава ЖС36 с примесью фосфора. Если при испытании по ТУ1-595-4-473 на базе 40 ч значения долговечности сплава как без лантана, так и с присадкой лантана, приблизительно одинаковые, то при испытании на бóльших базах (500 и более часов) заметно влияние присадки лантана, что позволило нейтрализовать влияние фосфора и повысить долговечность [32–37].

Проведены испытания на длительную прочность монокристаллов сплава ЖС36 при температуре 1000°C на базах 100; 500 и 1000 ч с прогнозом до 5000 ч. Расчеты показали, что путем нейтрализации влияния фосфора и образования тугоплавкого соединения LaP при присадке лантана, предел длительной прочности повышается: на базе 100 ч – на 5 МПа, на базе 500 и 1000 ч – на 10 МПа, на базе 5000 ч – на 20 МПа, т. е. при увеличении длительности испытания эффект от чистоты металла на свойства увеличивается (рис. 5).



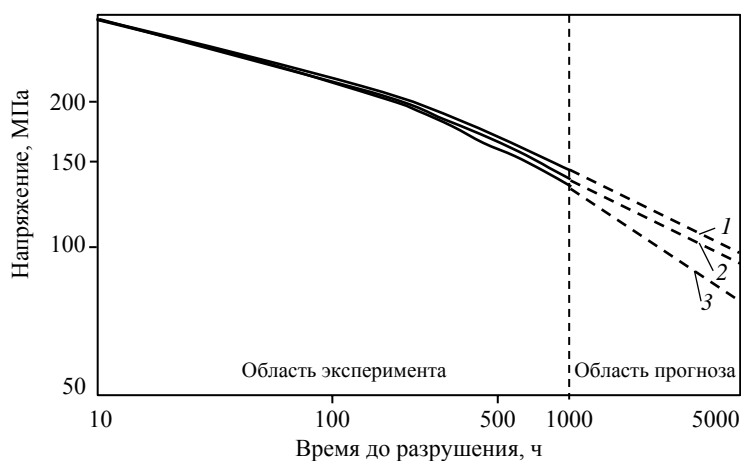


Рис. 5. Зависимость пределов длительной прочности при 1000°С монокристаллов сплава ЖС36 от чистоты металла по фосфору, % (по массе):  
 1 – 0,018 P+0,2 La; 2 – 0,0013 P+0,2 La; 3 – 0,018 P, без La

Исследовали влияние кратности переплава в вакууме на изменение химического состава и свойства монокристаллов. Исследование проводили на сплаве ВЖМ5 с повышенным содержанием фосфора (0,014% (по массе)) – см. таблицу. На втором переплаве в металл присадили лантан; за счет нейтрализации фосфора с образованием фосфида лантана долговечность повысилась в ~2 раза. На третьем переплаве лантан не присаживали и долговечность снизилась. На четвертом переплаве в металл опять присадили такое же количество лантана, однако долговечность не повысилась, а даже снизилась по отношению к третьему переплаву.

Анализ данных таблицы показал, что после каждого переплава изменяется химический состав сплава – в основном по алюминию, хрому и титану, поэтому в металле четвертого переплава содержание алюминия по отношению к первичному содержанию в сплаве снизилось на 0,3% (по массе), хрома – на 1,0% (по массе), тантала – на 0,5% (по массе), в результате долговечность снизилась даже после присадки лантана.

Проведенное исследование показало, что, при многократном использовании образующихся литейных отходов в собственном производстве при отливке деталей, возможно снижение жаропрочных свойств сплавов вследствие изменения химического состава отходов. Для восстановления жаропрочности до первоначального уровня необходимо проводить долегирование сплава до его оптимального состава путем присадки макро- и микролегирующих металлов.

**Влияние кратности переплава на изменение химического состава и жаропрочные свойства монокристаллов <001> сплава ВЖМ5**

Кратность переплава	Особенности ВМП	Долговечность*, ч	Содержание элементов, % (по массе)										
			Al	Cr	Co	W	Mo	Ti	Ta	Re	La	P	
1	Сплав с добавкой 0,01% P	318; 417	6,0	4,4	8,5	5,9	1,9	0,75	5,7	4,2	0,0002	0,014	
2	Присадка 0,20% La	596,5	5,9	4,4	8,8	5,8	1,9	0,85	5,7	4,2	0,0030	0,014	
3	Переплав без присадки La	367; 401	5,9	3,6	8,5	6,0	1,9	0,75	5,5	4,2	0,0002	0,014	
4	Присадка 0,20% La	219; 258; 246	5,7	3,4	8,2	5,7	1,85	0,73	5,2	4,1	0,0080	0,013	
Изменение химического состава			-0,3	-1,0	-0,3	-0,2	-0,05	-0,02	-0,5	-0,1	–	–	
По паспорту и ТУ на сплав			≥500	5,7–6,2	4–5	8–10	5,5–6,5	1,6–2,2	0,6–1	5,5–6,5	3,6–3,9	–	≤0,01

\* При 1100°С;  $\sigma=115$  МПа.

При испытании на длительную прочность (на базе 500 ч) монокристаллов сплава ЖС36 с повышенным содержанием углерода (0,023% (по массе)) и кислорода (0,002% (по массе)) значения долговечности снизились соответственно в 1,4 и 1,25 раза по отношению к металлу, содержащему 0,0053% (по массе) углерода и 0,0009% (по массе) кислорода, что связано с образованием в металле карбидов и оксидов, которые являются источником зарождения трещин в процессе высокотемпературной ползучести.

Анализ первичных кривых ползучести монокристаллов сплава ЖС36 показывает, что при уменьшении содержания углерода в сплаве с 0,023 до 0,0053% (по массе) увеличивается продолжительность накопления деформации ползучести, т. е. повышается сопротивление ползучести и увеличивается долговечность с 256 до 363 ч (при 1000°С,  $\sigma=185$  МПа).

Время до разрушения образцов при испытаниях на длительную прочность (при 975°С,  $\sigma=320$  МПа) на базе 40 ч для металла с низким (0,0002% (по массе)) и повышенным (0,0010% (по массе)) содержанием азота практически одинаковое. Однако при испытаниях на базе 500 и особенно 1000 ч с увеличением содержания азота в сплаве долговечность снижается.

Методом МРСА установлено, что свинец образует с лантаном тугоплавкие, химически стойкие соединения LaPb и La<sub>2</sub>Pb с температурой плавления соответственно 1246 и 1315°С. Исследовали сплав ЖС36 с повышенным содержанием свинца (0,00069% (по массе)), т. е. выше требований ТУ на сплав (не более 0,0005% (по массе)), в который дополнительно присадили лантан. В результате связывания свинца в соединение и нейтрализации его вредного влияния на длительную прочность, долговечность сплава не снизилась, а сохранилась на уровне долговечности металла, содержащего 0,0000095% (по массе) свинца.

Исследовали влияние примесей серы и фосфора на характеристики малоциклового усталости (МЦУ) монокристаллов при температуре 900°С, отлитых на установках УВНК-9А и УВНС-5. Установлена прямая зависимость

между содержанием серы в металле и средним числом циклов до разрушения: со снижением содержания серы среднее число циклов до разрушения увеличивается (рис. 6), особенно для металла, отлитого на установке УВНК-9А. Поскольку лантан нейтрализует вредное влияние фосфора в сплаве, среднее число циклов до разрушения при введении лантана в металл, содержащий повышенное количество фосфора, также увеличивается [38].

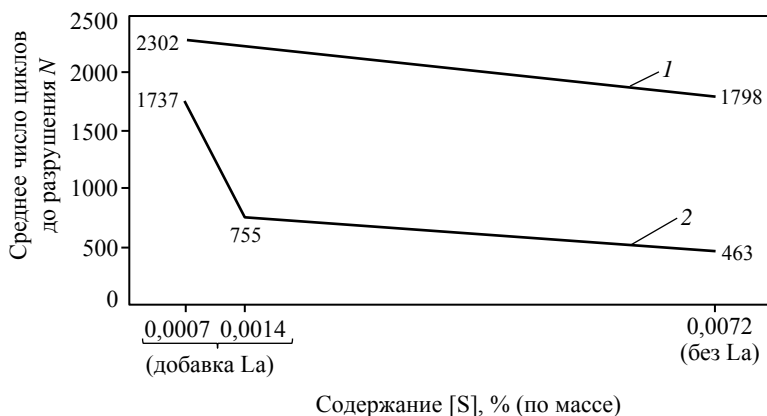


Рис. 6. Влияние серы на МЦУ монокристаллов сплава ЖС36 (МОНО <001>, при 900°С), отлитых на установках УВНС-5 (1) при  $\sigma=950$  МПа и УВНК-9А (2) при  $\sigma=980$  МПа

При проведении испытаний на малоцикловую усталость монокристаллов с повышенным (0,023% (по массе)) содержанием углерода, отмечается большой разброс полученных значений циклов до разрушения и сниженное (почти в 2 раза) среднее число циклов до разрушения.

Одним из главных требований, предъявляемых к сплавам, применяемым для изготовления рабочих лопаток ГТД, является их высокая жаростойкость или сопротивление газовой коррозии. Сопротивление поверхности литых лопаток высокотемпературному окислению является неперменным условием их высокой эксплуатационной надежности.

Исследовали влияние переменного содержания серы (0,0072; 0,0014; 0,0007 и 0,0002% (по массе)) на изотермическую жаростойкость монокристаллов сплава ЖС36 с защитным ионно-плазменным покрытием при температуре 1150°С. Состав покрытий (% (по массе)): сплав СДП-41 (содержащий 10 Cr, 11 Al, 3 Ta, 1 Re, 1 Hf, 0,5 Y, остальное Ni)+сплав ВСДП-16 (содержащий 15 Ni, 1,5 Y, остальное Al).

Установлено отрицательное влияние повышенного содержания серы в металле на жаростойкость монокристаллов (рис. 7). На образцах с покрытием с повышенным (0,0072% (по массе)) содержанием серы после 300 ч

испытаний на изотермическую жаростойкость происходит значительная потеря удельной массы, что свидетельствует о начале процесса разрушения поверхностной зоны образца с защитным покрытием [39, 40].

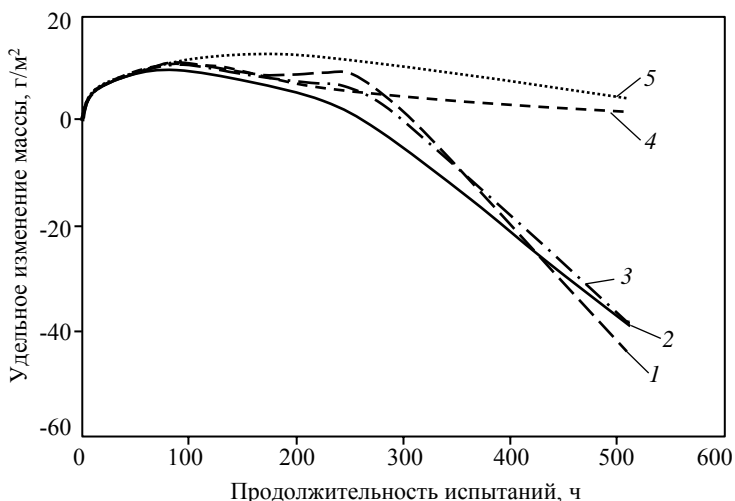


Рис. 7. Зависимости удельного изменения массы монокристаллических образцов из сплава ЖС36 с жаростойким покрытием СДП-41 (70 мкм)+ВСДП-16 (50 г/м²) от продолжительности испытаний на изотермическую жаростойкость при температуре 1150°С с La (1, 3, 4) и без La (2, 5), с содержанием серы 0,0014 (1); 0,0072 (2); 0,0007 (3) и 0,0002% (по массе) (4, 5)

Экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что свободная (не связанная в соединение с лантаном) сера в сплаве при испытании на жаростойкость диффундирует из объема образца к его поверхности и способствует образованию пор и разрушению (отслоению) покрытия сплава, тем самым ухудшая его жаростойкость.

Анализ данных, представленных на рис. 7, свидетельствует, что образцы 1, 2, 3, содержащие соответственно 0,0014; 0,072 и 0,0007% (по массе) серы, даже с добавкой лантана, показали пониженную жаростойкость. Следует отметить, что повышение жаростойкости монокристаллов с покрытием достигается благодаря получению металла, ультрачистого по содержанию серы (0,0002% (по массе)), при этом лантан не оказал положительного влияния на повышение жаростойкости.

Таким образом, проведенные исследования по рафинированию сплава ЖС36 от серы с применением РЗМ (в частности, лантана) совместно с фильтрацией расплава показали, что для получения гарантировано высоких характеристик длительной и усталостной прочности монокри-

сталлов, а также наносимых на них жаростойких покрытий необходимо ограничить в монокристаллических сплавах содержание примеси серы в пределах 0,0002–0,0005% (по массе).

В результате выполненного комплекса научно-исследовательских работ по разработке технологии выплавки монокристаллических высокожаропрочных сплавов нового поколения рассмотрены и решены следующие задачи:

– определены научно-технологические закономерности процессов рафинирования расплава, позволяющие получать монокристаллические заготовки с ультранизким содержанием, % (по массе): <0,001 азота, <0,001 кислорода, <0,0005 серы, <0,005 фосфора, <0,005 углерода и <0,00001 свинца, с повышенными параметрами жаростойкости при 1150°C, малоциклового усталости при 900°C и длительной прочности при 1000°C на базе 500–1000 ч;

– определены условия эффективного удаления из расплава углерода, кислорода, серы, фосфора, свинца различными способами: управлением температурой и продолжительностью рафинирования расплава, введением химически высокоактивных добавок РЗМ – La, Ce, Y и др., применением пенокерамических фильтров для осаждения соединений примесей с рафинирующими добавками.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. №3. С. 1–8.
3. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения // Крылья Родины. 2012. №3–4. С. 34–38.
4. 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.
5. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия / под общ. ред. Е.Н. Каблова. 2-е изд. М.: Наука, 2006. 631 с.
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., Ригин В.Е., Горюнов А.В., Мин П.Г. Опыт переработки в условиях ФГУП «ВИАМ» литейных отходов жаропрочных сплавов, образующихся на моторостроительных и ремонтных заводах // *Металлург*. 2014. №1. С. 86–90.
8. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Горюнов А.В., Мин П.Г. Инновационная технология производства жаропрочного сплава ЖС32-ВИ с учетом переработки всех видов отходов в условиях сертифицированного серийного производства ФГУП «ВИАМ» // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №6. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.10.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-1-1.
9. Мин П.Г., Вадеев В.Е., Крамер В.В. Рафинирование некондиционных отходов деформируемых никелевых сплавов в вакуумной индукционной печи // *Технология металлов*. 2015. №4. С. 8–13.
10. Оспенникова О.Г., Мин П.Г., Вадеев В.Е., Калицев В.А., Крамер В.В. Ресурсосберегающая технология переработки некондиционных отходов деформируемого сплава ВЖ175 для дисков ГТД // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.10.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-1-1.
11. Мин П.Г., Вадеев В.Е., Крамер В.В. Ресурсосберегающая технология получения деформируемого никелевого жаропрочного сплава ВЖ175 с применением некондиционных отходов // *Металлург*. 2016. №9. С. 88–94.
12. Мин П.Г., Вадеев В.Е., Калицев В.А., Крамер В.В. Ресурсосберегающая технология выплавки деформируемого сплава ВЖ175 с использованием некондиционных отходов // *Современные жаропрочные деформируемые никелевые и интерметаллидные сплавы, методы их обработки: матер. конф. М.: ВИАМ, 2015. С. 9–14.*
13. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Мин П.Г., Ригин В.Е. Ресурсосберегающие технологии выплавки перспективных литейных и деформируемых супержаропрочных сплавов с учетом переработки всех видов отходов // *Электрометаллургия*. 2016. №9. С. 30–41.
14. Мин П.Г., Горюнов А.В., Вадеев В.Е. Современные жаропрочные никелевые сплавы и эффективные ресурсосберегающие технологии их изготовления // *Технология металлов*. 2014. №8. С. 12–23.
15. Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Мин П.Г., Вадеев В.Е. Рафинирование сложнолегированного никелевого сплава ЖС32-ВИ от примеси кремния и фосфора путем однонаправленного затвердевания расплава при малых скоростях перемещения фронта кристаллизации // *Технология металлов*. 2016. №3. С. 2–7.
16. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Елютин Е.С. Монокристаллические жаропрочные сплавы для газотурбинных двигателей // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение*. 2011. №SP2. С. 38–52.

17. 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.
18. 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. 2012. №4. № 77-30569/377177. URL: <http://technomag.edu.ru> (дата обращения: 04.10.2016).
19. 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.
20. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г. Закономерности поведения азота при получении монокристаллов жаропрочного никелевого сплава ЖС30-ВИ и его влияние на эксплуатационные свойства // МиТОМ. 2014. №1. С. 8–12.
21. Сидоров В.В., Мин П.Г. Рафинирование сложнолегированного никелевого расплава от примеси серы при плавке в вакуумной индукционной печи (часть 1) // Электromеталлургия. 2014. №3. С. 18–23.
22. Сидоров В.В., Мин П.Г. Рафинирование сложнолегированного никелевого расплава от примеси серы при плавке в вакуумной индукционной печи (часть 2) // Электromеталлургия. 2014. №5. С. 26–30.
23. Сидоров В.В., Мин П.Г., Фоломейкин Ю.И., Вадеев В.Е. Влияние скорости фильтрации сложнолегированного никелевого расплава через пенoкерамический фильтр на содержание примеси серы в металле // Электromеталлургия. 2015. №5. С. 12–15.
24. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Мин П.Г., Фоломейкин Ю.И. Исследование процессов рафинирования в вакууме сложнолегированных никелевых расплавов от примеси серы // Металлы. 2015. №6. С. 37–43.
25. Мин П.Г., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Вадеев В.Е. Исследование серы и фосфора в литейных жаропрочных никелевых сплавах и разработка эффективных способов их рафинирования // Технология металлов. 2015. №12. С. 2–9.
26. Сидоров В.В., Мин П.Г., Бурцев В.Т., Каблов Д.Е., Вадеев В.Е. Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование реакций рафинирования в вакууме сложнолегированных ренийсодержащих никелевых расплавов от примесей серы и кремния // Вестник РФФИ. 2015. №1 (85). С. 32–36.
27. Каблов Д.Е., Мин П.Г., Сидоров В.В. Повышение свойств монокристаллов сплава ЖС36-ВИ путем рафинирования от примесей серы и фосфора при микролегировании лантаном // Матер. VIII Всерос.

- конф. по испытаниям и исследованиям свойств материалов «Тест-Мат-2016» / ВИАМ. М., 2016. URL: [conf.viam.ru/conf/1901/proceedings](http://conf.viam.ru/conf/1901/proceedings) (дата обращения: 28.11.2016).
28. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г. Повышение эксплуатационных характеристик монокристаллов сплава ЖС36-ВИ путем его рафинирования от примеси серы // III Всерос. науч.-исслед. конф. «Роль фундаментальных исследований при реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»: сб. тр. М.: ВИАМ, 2016. С. 13–18.
  29. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Мин П.Г., Фоломейкин Ю.И., Тимофеева О.Б., Филонова Е.В., Исходжанова И.В. Влияние примесей на структуру и свойства высокожаропрочных литейных сплавов и разработка эффективных методов устранения их отрицательного влияния // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №2. Ст. 03. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 05.10.2016).
  30. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Мин П.Г., Фоломейкин Ю.И. Влияние фосфора и кремния на структуру и свойства высокожаропрочных литейных сплавов и разработка эффективных методов устранения их отрицательного влияния // МиТОМ. 2015. №6. С. 55–60.
  31. Мин П.Г., Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Вадеев В.Е. Закономерности поведения примесей при получении монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов и разработка эффективных способов их рафинирования // Матер. VII конф. молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий». М.: ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, 2016. С. 36–37.
  32. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г., Герасимов В.В., Бондаренко Ю.А. Влияние примесей серы и фосфора на свойства монокристаллов жаропрочного сплава ЖС36-ВИ и разработка эффективных способов его рафинирования // Авиационные материалы и технологии. 2015. №3 (36). С. 3–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-3-9.
  33. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г., Вадеев В.Е. Влияние примесей и лантана на эксплуатационные свойства сплава ЖС36-ВИ // Металлургия машиностроения. 2015. №6. С. 19–23.
  34. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г., Пучков Ю.А. Влияние лантана на качество и эксплуатационные свойства монокристаллического жаропрочного никелевого сплава ЖС36-ВИ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №12. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.10.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-2-2.
  35. Мин П.Г., Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Вадеев В.Е. Влияние примесей на структуру и свойства монокристаллических жаропрочных литей-



- ных никелевых сплавов и разработка эффективного метода их рафинирования // Сб. тез. докл. Всеросс. науч.-технич. конф. «Авиадвигатели XXI века». М.: ЦИАМ им. П.И. Баранова, 2015. С. 662–664.
36. Мин П.Г., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Ригин В.Е., Вадеев В.Е. Влияние примеси на структуру и механические свойства литейных никелевых жаропрочных сплавов и разработка эффективных способов их рафинирования // Перспективные направления развития авиадвигателестроения: сб. докл. науч.-техн. конф. «Климовские чтения–2015». СПб.: Скифия-принт, 2015. С. 275–283.
37. 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.
38. Каблов Д.Е., Беляев М.С., Сидоров В.В., Мин П.Г. Влияние примесей серы и фосфора на малоцикловую усталость монокристаллов жаропрочного сплава ЖС36-ВИ // Авиационные материалы и технологии. 2015. №4 (37). С. 25–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-25-28.
39. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Будиновский С.А., Мин П.Г. Влияние примеси серы на жаростойкость монокристаллов жаропрочного сплава ЖС36-ВИ с защитным покрытием // Авиационные материалы и технологии. 2016. №1 (40). С. 20–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-20-23.
40. Мин П.Г., Сидоров В.В., Будиновский С.А., Вадеев В.Е. Влияние серы на жаростойкость монокристаллов жаропрочного никелевого сплава системы Ni–Al–Co–Re–Ta–Mo–W–Ru–Cr // Материаловедение. 2016. №7. С. 9–12.