

УДК 669.018.44:669.245

Д.Е. Каблов<sup>1</sup>, В.В. Сидоров<sup>1</sup>, П.Г. Мин<sup>1</sup>, Ю.А. Пучков<sup>2</sup>**ВЛИЯНИЕ ЛАНТАНА НА КАЧЕСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЖС36-ВИ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-2-2

*Установлено отрицательное влияние серы и фосфора на жаропрочные свойства монокристаллов сплава ЖС36-ВИ при испытании на длительную прочность на больших базах испытаний (500 и более часов), а также на среднее количество циклов до разрушения при испытании на малоцикловую усталость (МЦУ). Исследована возможность снижения содержания или нейтрализации вредного влияния примесей серы и фосфора при микролегировании сплава лантаном, что положительно влияет на восстановление свойств сплава. Предложен механизм введения лантана для нейтрализации вредного влияния этих примесей, при котором сера удаляется из расплава в виде тугоплавких сульфидов лантана путем их адгезии на стенках плавильного тигля при плавке и на пенокерамическом фильтре при разливке. В отличие от серы, тугоплавкие фосфиды с лантаном из расплава не удаляются. Приведено сравнение свойств монокристаллов сплава, отлитых на установках низко- и высокоградиентной направленной кристаллизации – УВНК-9А и УВНС-5.*

**Ключевые слова:** монокристалл, жаропрочные никелевые сплавы, вакуумно-индукционная плавка, примеси, сера, фосфор, активные металлы, лантан, выход годного продукта.

*The harmful influence of sulfur and phosphorus on heat resistant properties of ZhS36-VI alloy during stress rupture test on long base testing (500 and more hours) as well as on middle quantity of cycles to rupture upon MCF was determined. The possibility to reduce the content of harmful influence of sulfur and phosphorus impurities or their neutralization through microalloying by lanthanum that positively influence on alloy properties recovery was investigated. The mechanism of lanthanum addition for neutralization of these impurities harmful influence was suggested whereby sulfur removes from the melt as refractory lanthanum sulfides by their adhesion on crucible walls during melting and on foam filter during casting. In contrast to sulfur the refractory phosphides with lanthanum don't remove from the melt. The properties comparison of single crystal alloy cast on units of low- and high gradient direct solidification UVNK-9A and UVNS-5 is presented.*

**Keywords:** single crystal, nickel-base superalloy, vacuum induction melt, impurities, sulfur, phosphorus, active metals, lanthanum, yield.

<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

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана [Bauman Moscow State Technical University] E-mail: bauman@bmstu.ru

**Введение**

В настоящее время монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС) нашли широкое применение в авиационной промышленности в качестве материала рабочих лопаток современных газотурбинных двигателей [1–11]. К этим сплавам

предъявляются повышенные требования по обеспечению их ультравысокой чистоты по вредным примесям, в частности – по сере и фосфору, что гарантирует бездефектный рост монокристаллов с заданной кристаллографической ориентацией, получение высокого уровня свойств, отсутствие образования ТПУ фаз, стабильность их микроструктуры при длительной эксплуатации лопаток в двигателе [12–23].

Примеси серы и фосфора могут переходить в сплавы из применяемых при плавке шихтовых материалов, а также из керамических материалов плавильного тигля и литейной формы [24–26].

Для снижения и нейтрализации вредного влияния серы и фосфора в ЖНС используют редкоземельные металлы (РЗМ) [27–30], в частности лантан. При выборе этого элемента учитывали опыт микролегирования ряда поликристаллических ЖНС [31], а также его особые физико-химические свойства. Лантан – первый элемент в группе лантаноидов, имеющих  $4f^{2-14}5d^{0-1}6s^2$  электронную конфигурацию. Участие  $4f$ -электронов в образовании химической связи обусловлено предварительным возбуждением на уровень  $5d$ . Энергия возбуждения одного электрона невелика, поэтому обычно лантаноиды проявляют степень окисления 3.

Лантаноиды весьма реакционноспособны и легко взаимодействуют с примесными элементами ЖНС: кислородом, серой, фосфором, азотом, углеродом и кремнием. Химическая активность лантаноидов в ряду La–Lu несколько снижается из-за увеличения заряда ядра, сжатия атома и увеличения силы связи валентных электронов с ядром атома. По способности оттягивать электроны от других атомов, т. е. электроотрицательности  $\chi$ , большинство примесных элементов превосходят такие активные элементы, как кальций, магний, РЗМ (лантан, лантаноиды, иттрий), гафний, водород. По отношению к примесным элементам щелочной Na, щелочноземельные Ca и Mg, РЗМ, а также используемый при микролегировании ЖНС гафний являются восстановителями. Электроотрицательность определяется положением элемента в Периодической системе и, следовательно, его электронным строением. Чем ниже и левее в Периодической системе находится элемент, тем ниже его электроотрицательность. Для сравнения эффективности восстановительных процессов в ЖНС целесообразно сравнивать разности электроотрицательностей примесного  $\chi_{\text{пр}}$  и активного  $\chi_{\text{Ме}}$  элемента

$$\Delta\chi_{\text{Ме}} = \chi_{\text{пр}} - \chi_{\text{Ме}}$$

В табл. 1 приведены значения этих разностей. По уменьшению относительной электроотрицательности  $\chi$  примеси, активные металлы, приведенные в табл. 1, расположены соответственно слева направо и снизу вверх. Поэтому наибольшую разность электроотрицательностей имеют пары элементов в верхнем левом углу, а наименьшую – в нижнем правом углу таблицы. Видно, что наибольшей восстановительной способностью обладает натрий, наименьшей – водород. Восстанавливать кислород легче активными металлами, а кремний и серу – сложнее остальных примесей. Вероятно, существует и определенная последовательность в восстановлении примесей. По восстановительной способности лантан уступает только натрию и кальцию и превосходит церий, иттрий, гафний, магний и водород.

В отличие от натрия и кальция, лантан, имея более высокую температуру сублимации и более низкую упругость пара, меньше улетучивается при плавке. Сравнительно небольшое различие в плотностях сплава и лантана способствует равномерному распределению этого элемента в сплаве.

Таблица 1

Разность электроотрицательностей  $\chi$  активных и примесных элементов в ЖНС

Активные элементы (деактиваторы примесей)	Примеси					
	$^{16,0}_{8}\text{O}$	$^{14,0}_{7}\text{N}$	$^{12}_{6}\text{C}$	$^{31,0}_{15}\text{P}$	$^{32,1}_{16}\text{S}$	$^{28,1}_{14}\text{Si}$
$^{23,0}_{11}\text{Na}$	2,62	2,22	1,73	1,37	1,25	1,08
$^{40,1}_{20}\text{Ca}$	2,44	2,04	1,55	1,19	1,07	0,90
$^{138,9}_{57}\text{La}$	2,34	1,94	1,45	1,09	0,97	0,80
$^{190,1}_{58}\text{Ce}$	2,32	1,92	1,43	1,07	0,95	0,78
$^{88,9}_{39}\text{Y}$	2,22	1,82	1,33	0,97	0,85	0,68
$^{178,5}_{72}\text{Hf}$	2,14	1,74	1,25	0,89	0,77	0,60
$^{24,3}_{12}\text{Mg}$	2,13	1,73	1,24	0,88	0,76	0,59
$^1_1\text{H}$	1,24	0,84	0,35	-0,01	-0,13	-0,3

В работе [32] определены температурные зависимости поверхностного натяжения чистого никеля и никеля, содержащего примеси серы и фосфора. Установлено, что поверхностная активность серы выше, чем у фосфора, что облегчает ее удаление из расплава.

Известно [33], что РЗМ являются хорошими десульфураторами металла; величина энергии Гиббса у сульфидов РЗМ при температурах плавки даже ниже, чем у кальция. Эффективность десульфурации металла с введением РЗМ исследовали с использованием литейного жаропрочного никелевого сплава, % (по массе): менее 0,02 С; 10 Cr; 5 Co; 5,4 Al; 0,9 Ti; 0,10 Hf; 10 W; 4 Ta; Ni – основа. Металл изучали в равноосном состоянии непосредственно после литья, а также с направленной структурой, полученной направленной кристаллизацией, после испытаний на длительную прочность. Авторы работы [33] пришли к выводу, что РЗМ, связывая серу в тугоплавкие соединения, способствуют уменьшению концентрации свободной серы в объеме сплава. Применение РЗМ позволяет не только связать свободную серу в тугоплавкие соединения, но также понизить ее концентрацию в сплаве в 1,5–2 раза. При этом методом Оже-спектроскопии установлено, что с увеличением концентрации РЗМ в металле общее количество сульфидов церия, лантана и иттрия в изломе образцов уменьшается. Наиболее вероятно, что удаление серы из расплава в виде сульфидов с РЗМ происходит путем всплывания, поскольку плотность сульфидов РЗМ ниже, чем плотность расплава. Показано также, что в сплаве, легированном РЗМ, снижается не только общее содержание серы, но и ее содержание на поверхности пор и включений, где она присутствует в виде устойчивых соединений.

В работе [34] исследовано влияние микролегирования лантаном на состав и жаропрочные свойства монокристаллического сплава ВЖМ4-ВИ. Исследование состава показало, что после присадки лантана снизилось содержание серы. Обнаружены включения на основе лантана и никеля, содержащие до 60% лантана, в состав которых входит сера и фосфор. Таким образом, лантан связывает серу и фосфор в термически прочные тугоплавкие соединения, тем самым устраняя их вредное влияние. По данным качественного анализа в состав неметаллических включений на основе лантана входят также кислород и углерод.

Целесообразность микролегирования лантаном подтверждена для поликристаллических ЖНС, однако результаты исследования влияния микролегирования этим элементом на содержание примесей, механизм и степень влияния на свойства монокристаллических ЖНС в научно-технической литературе практически отсутствуют.

Цель данной работы – изучение влияния лантана на снижение содержания или нейтрализацию вредного влияния примесей серы и фосфора в жаропрочном монокристаллическом никелевом сплаве ЖС36-ВИ, а также исследование механизма и степени влияния лантана на механические свойства этого сплава и выход годной продукции.

### Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран серийный безуглеродистый литейный ренийсодержащий жаропрочный никелевый сплав второго поколения ЖС36-ВИ, который в настоящее время применяется для изготовления рабочих лопаток ГТД. Состав сплава приведен в табл. 2.

Таблица 2

#### Химический состав жаропрочного никелевого сплава ЖС36-ВИ

Содержание элементов, % (по массе)								
Ni	Cr	Co	Mo	W	Re	Nb	Al	Ti
Основа	3,5–4,5	5–9	1–2,2	11–12,5	1,8–2,3	0,7–1,5	5,5–6,2	0,7–1,5

Особенности технологии выплавки сплава ЖС36-ВИ с добавками примесей серы и фосфора приведены в табл. 3. Сплав выплавляли в вакуумной индукционной печи ВИАМ-2002 в тигле емкостью 20 кг.

Таблица 3

#### Особенности технологии выплавки монокристаллического сплава ЖС36-ВИ с различным содержанием серы и повышенным содержанием фосфора

Условный номер режима плавки	Особенности технологии выплавки на установке ВИАМ-2002	Получено примеси, % (по массе)
1	+0,01% S с фильтрацией	0,0085 S
2	+0,005% S; Mg; La с фильтрацией	0,0013 S
3	То же	0,0005 S
4	+0,017% P	0,018 P
5	+0,017% P; Mg; La	0,017 P
6	+0,017% P; Mg; La с фильтрацией	0,018 P

Для снижения содержания примесей в сплаве ЖС36-ВИ при выплавке в печи ВИАМ-2002 последовательно вводили магний и непосредственно перед разливкой расплава – лантан, с последующей фильтрацией через пенокерамический фильтр. Разливку металла проводили в стальную трубу  $\varnothing 90$  мм.

Содержание примеси серы определяли на газоанализаторе CS-600 фирмы Leco [35]. Содержание лантана и примеси фосфора определяли масс-спектрометрическим методом на установке iCAPQ фирмы Thermo Fisher Scientific [36].

Для исследования влияния лантана на структуру и свойства монокристаллов сплава ЖС36-ВИ (КГО [001]) с различным содержанием серы и повышенным содержанием фосфора проведено по шесть плавов на низкоградиентной установке направленной кристаллизации УВНК-9А\* и на высокоградиентной установке УВНС-5\*\* с кристаллографической ориентацией  $\langle 001 \rangle$  с применением затравок из сплава системы Ni–W с заданной ориентацией. Величина теплового градиента на установке УВНК-9А составляла  $70^\circ\text{C}/\text{мм}$ , тогда как на высокоградиентной установке УВНС-5 она составляла  $150^\circ\text{C}/\text{мм}$ , т. е. в  $\sim 2$  раза больше.

\* Плавки проводили под руководством В.В. Герасимова.

\*\* Плавки проводили под руководством Ю.А. Бондаренко.

Из термически обработанных монокристаллических заготовок изготовили образцы и провели испытания на растяжение при различных температурах на машине ИР-5113, на длительную прочность – на машине ZST2/3-ВИЭТ, на малоцикловую усталость – на машине LFV 100НН.

### Результаты

Установлено, что введение магния и лантана в сплав ЖС36-ВИ в условиях вакуумно-индукционной плавки в печи ВИАМ-2002, а также применение фильтрации снижает содержание серы с 0,0085 до 0,0013 и 0,0005% (по массе) соответственно в плавках 2 и 3 (табл. 3). При этом наблюдается увеличение выхода годного продукта и улучшение комплекса механических свойств монокристаллов, отлитых на установках УВНК-9А и УВНС-5 (рис. 1–5). При испытании на растяжение (рис. 1) при 900°С наблюдается увеличение относительного удлинения  $\delta$  как на низкоградиентной (УВНК-9А), так и на высокоградиентной (УВНС-5) установках (с 21,5 до 29% и с 26 до 37,5% соответственно) и относительного сужения  $\psi$  (с 20,5 до 29% и с 25 до 37,5% соответственно). При испытаниях на длительную прочность (рис. 3) при 975°С и напряжении  $\sigma=320$  МПа время до разрушения практически одинаковое, а при испытании на более длительной базе при 1000°С и напряжении  $\sigma=185$  МПа с уменьшением содержания серы в сплаве время до разрушения увеличивается с 274 до 418 ч на установке УВНК-9А и с 395 до 454 ч – на установке УВНС-5.

При испытаниях на малоцикловую усталость (рис. 4) при 900°С с амплитудой напряжений 980 МПа количество циклов до разрушения увеличивается с 463 до 1737 (установка УВНК-9А), а с амплитудой напряжений 950 МПа – с 1798 до 2302 (установка УВНС-5).

Однако при испытаниях на кратковременную прочность при температурах 20 и 1100°С не наблюдается отрицательного влияния повышенного содержания серы в сплаве ЖС36-ВИ на его пластичность.

Установлено, что введение лантана в сплав в условиях вакуумно-индукционной плавки в печи ВИАМ-2002 и применение фильтрации практически не понижает содержания фосфора в сплаве, однако при этом улучшается комплекс механических свойств монокристаллов, отлитых как в установке УВНК-9А, так и в установке УВНС-5. При испытаниях на длительную прочность на небольших базах ( $\geq 40$  ч) при 975°С и напряжении  $\sigma=320$  МПа время до разрушения образцов, отлитых на обеих установках, практически не изменяется, а при испытаниях на базе 500 ч при 1000°С и напряжении  $\sigma=185$  МПа время до разрушения увеличивается с 319 до 383 ч на установке УВНК-9А и с 255 до 375 (плавка 5) и 369 (плавка 6) – на установке УВНС-5 (рис. 3).

При испытаниях на малоцикловую усталость при 900°С с амплитудой напряжений 950 МПа количество циклов до разрушения увеличивается с 1903 до 3304 (плавка 5) и 2834 (плавка 6) на установке УВНК-9А и с 1634 до 2150 – на установке УВНС-5 (рис. 4).

С введением лантана в сплавы, содержащие примеси серы и фосфора, в условиях вакуумно-индукционной плавки и применением фильтрации наблюдается тенденция к увеличению выхода годной продукции (рис. 5).

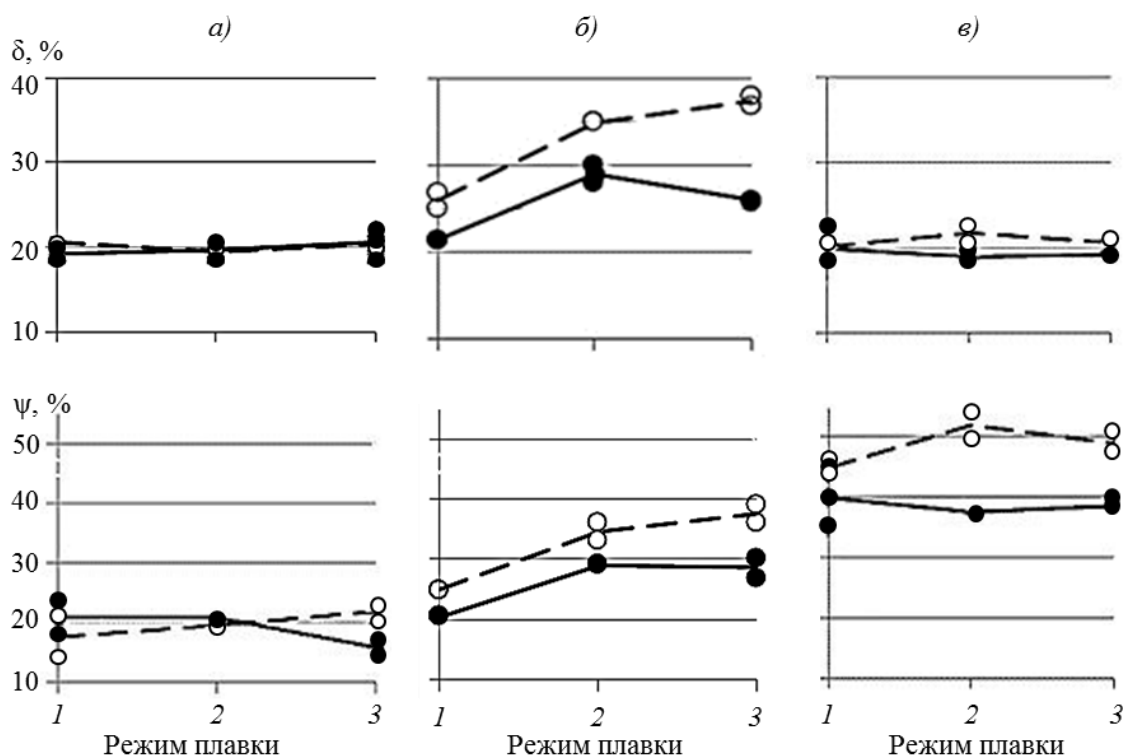


Рис. 1. Результаты испытания на растяжение при 20 (а), 900 (б) и 1100°С (в) монокристаллов сплава ЖС36-ВИ МОНО (001) с примесями серы, отлитых по режимам 1–3 (см. табл. 3) низкоградиентным способом на установке УВНК-9А (—) и высокоградиентным способом на установке УВНС-5 (---)

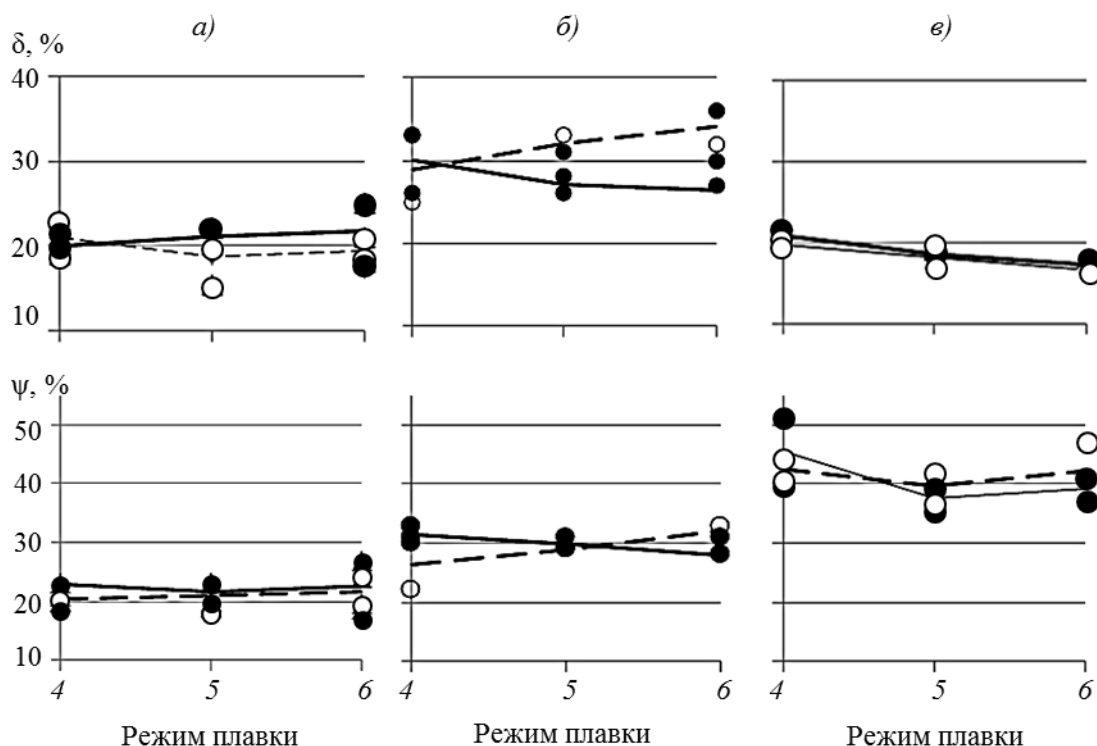


Рис. 2. Результаты испытания на растяжение при 20 (а), 900 (б) и 1100°С (в) монокристаллов сплава ЖС36-ВИ МОНО (001) с примесями фосфора, отлитых по режимам 4–6 (см. табл. 3) низкоградиентным способом на установке УВНК-9А (—) и высокоградиентным способом на установке УВНС-5 (---)

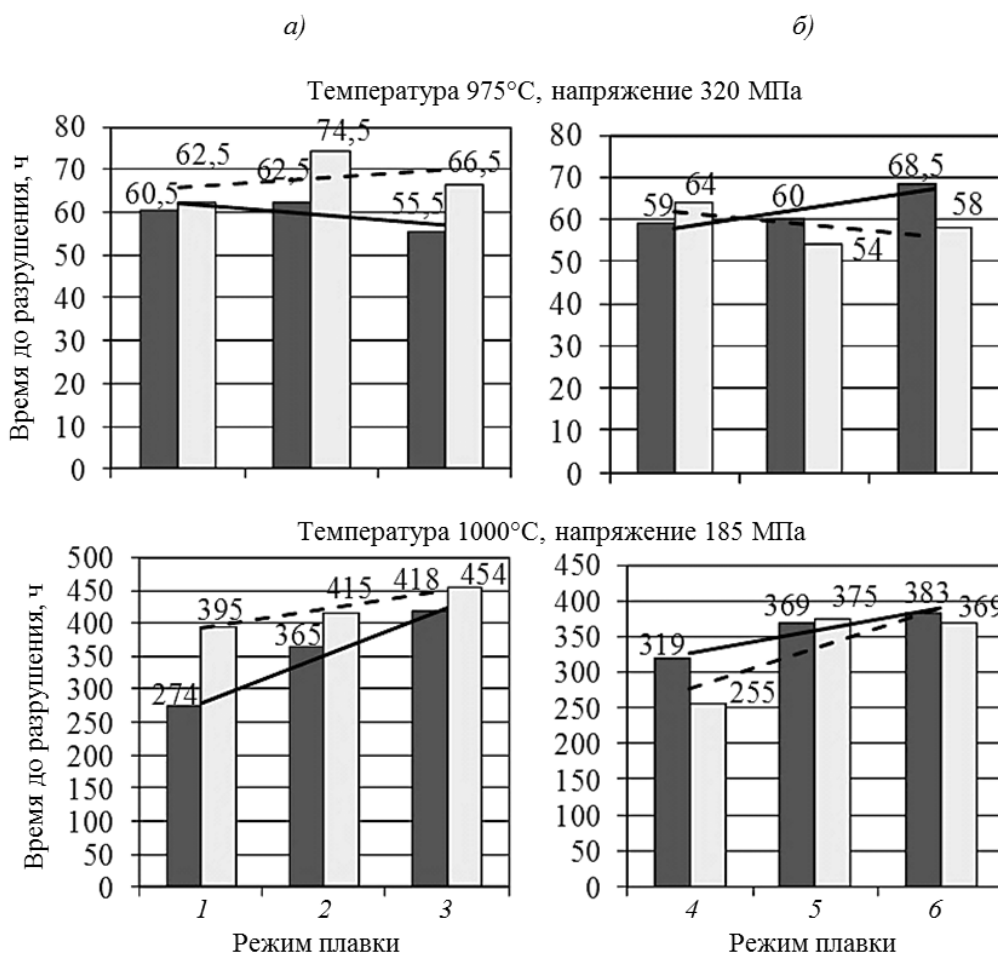


Рис. 3. Влияние серы (а) и фосфора (б) на время до разрушения при испытании на длительную прочность монокристаллов сплава ЖС36-ВИ, отлитых по режимам 1–6 (см. табл. 3) низкоградиентным способом на установке УВНК-9А (■) и высокоградиентным способом на установке УВНС-5 (▣)

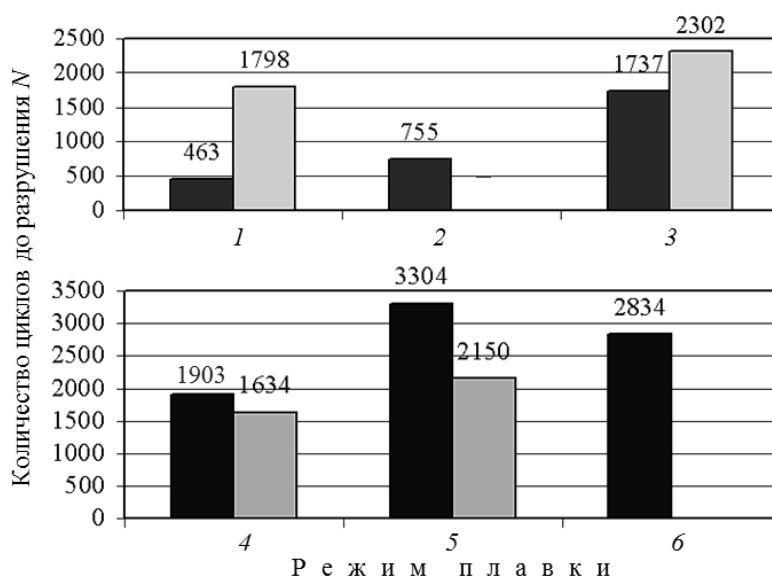


Рис. 4. Результаты испытаний на малоцикловую усталость при 900°C монокристаллов сплава ЖС36-ВИ, отлитых по режимам 1–6 (см. табл. 3) низкоградиентным способом на установке УВНК-9А (■) и высокоградиентным способом на установке УВНС-5 (▣)

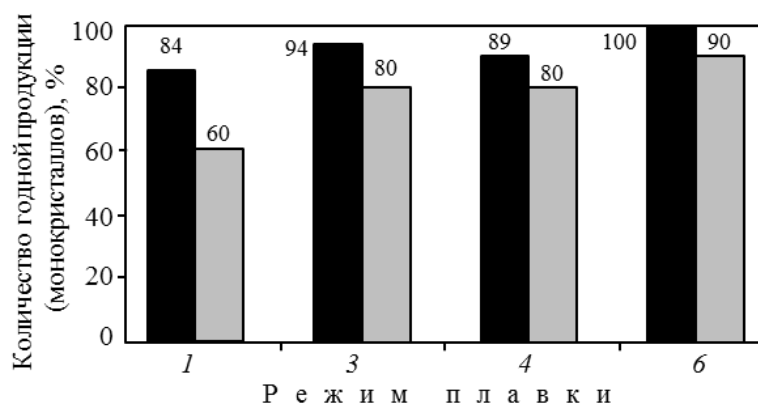


Рис. 5. Влияние режимов выплавки монокристаллов сплава ЖС36-ВИ на выход годной продукции с примесями серы и фосфора, отлитых по режимам 1, 3, 4 и 6 (см. табл. 3) низкоградиентным способом на установке УВНК-9А (■) и высокоградиентным способом на установке УВНС-5 (■)

При испытаниях на кратковременную прочность при температурах 20, 900 и 1100°C не наблюдается влияния повышенного содержания фосфора в сплаве ЖС36-ВИ на его пластичность независимо от присутствия лантана.

### Обсуждение полученных результатов

С учетом данных табл. 1 и результатов квантомеханических расчетов, выполненных в работах [37, 38], для объяснения полученных результатов приведена гипотетическая схема влияния примесей и лантана на силу межатомной связи и диффузионную подвижность компонентов ЖНС (рис. 6). Несмотря на небольшое процентное содержание, примеси и лантан оказывают существенное влияние на силу межатомной связи. Верхняя часть рис. 6 иллюстрирует влияние примесей (на примере серы), нижняя часть – влияние лантана.

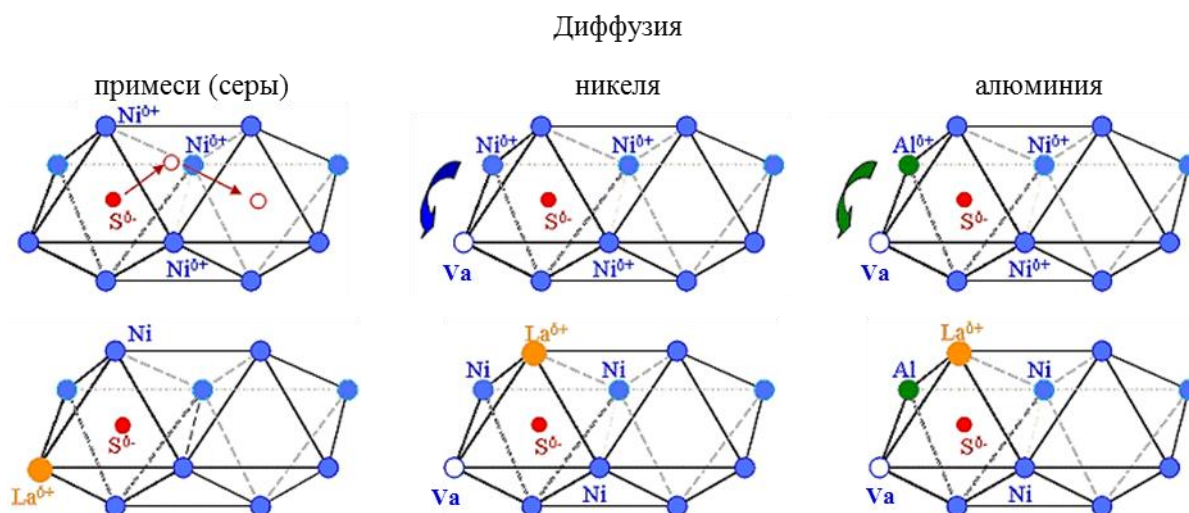


Рис. 6. Влияние примесей (на примере серы) и лантана на силу межатомной связи и диффузионную подвижность компонентов жаропрочного никелевого сплава

Примесные элементы (O, S, N, P, C), являясь соответственно элементами VI, V и IV групп Периодической системы Д.И. Менделеева и обладая повышенной электроотрицательностью, оттягивают электроны и уменьшают электронную плотность между

близлежащими атомами основных компонентов монокристаллических ЖНС, снижают силу связи между ними и, увеличивая их диффузионную подвижность, ускоряют развитие ползучести и усталости. В частности, взаимодействуя с алюминием, сера и фосфор ослабляют силу его связи с никелем, увеличивают диффузионную подвижность алюминия, способствуя коагуляции  $\gamma'$ -фазы, развитию рафтинга.

Являясь поверхностно-активными элементами, сера и фосфор сегрегируют на поверхности пор, снижают силу связи между атомами основных компонентов сплава, облегчая в результате ползучести и усталости образование трещин на поверхности пор.

Лантан является элементом III группы Периодической системы, имеет низкую электроотрицательность и высокое химическое сродство к большинству примесных элементов (O, S, N, P, C), образуя с последними термодинамически устойчивые тугоплавкие соединения, что позволяет снизить содержание этих примесей в твердом растворе. образуя с серой и кислородом соединения с низкой плотностью, лантан позволяет удалять серу и кислород из сплава в шлак.

Лантан взаимодействует с серой, отдавая электроны, увеличивает электронную плотность вокруг ее атомов и тем самым уменьшает ее способность оттягивать электроны и понижать электронную плотность и силу связи между близлежащими атомами основных компонентов. Имея большой ковалентный радиус, лантан ( $r_{La}=0,171$  нм), являясь наряду с серой и фосфором поверхностно-активным элементом, образует устойчивые наноструктуры (кластеры и зоны на межфазных границах) и фазы, образование которых снижает термодинамическую и диффузионную активность атомов, замедляет массообмен на границах  $\gamma/\gamma'$ ,  $\gamma$ /карбидов,  $\gamma$ /ТПУ фаз и деградацию структуры монокристаллических ЖНС, тем самым замедляя развитие ползучести, усталости и коррозионного разрушения.

Сродство серы к лантану выше, чем к никелю, поэтому термодинамически вероятно образование сульфидов лантана, а не соединений лантана с никелем и сульфидов никеля. Эволюция структуры должна происходить от соединений лантана с никелем к образованию сульфидов лантана.

Микролегирование лантаном оказывает положительное влияние и на микроструктуру ЖНС. В работе [27] приведены результаты исследования ренийсодержащего сплава ЖС32-ВИ, микролегированного редкоземельными металлами – лантаном и иттрием. Анализ микроструктуры показал, что с увеличением в сплаве содержания лантана измельчается дендритная структура. Иттрий также измельчает дендритную структуру, однако присадка тех же количеств лантана более эффективна. Одновременно с измельчением дендритной структуры измельчается морфология выделений первичной избыточной  $\gamma'$ -фазы в междендритных участках.

Комплексный подход, включающий: использование шихты с пониженным содержанием примесей, вакуумное рафинирование, микролегирование лантаном, фильтрацию расплава, – кроме повышения эксплуатационных характеристик монокристаллов сплава ЖС36-ВИ позволяет снизить вероятность образования паразитных зерен и увеличить выход годной продукции.

### Заключение

Микролегирование лантаном и фильтрация расплава с применением пенокерамического фильтра являются эффективными приемами снижения содержания примеси серы и нейтрализации вредного влияния примеси фосфора в жаропрочном никелевом сплаве ЖС36-ВИ, что позволяет увеличить значения длительной прочности, малоцикловой усталости и выход годной продукции по монокристаллам.

## 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.
2. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б. и др. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных и интерметаллидных сплавов с монокристаллической структурой //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP. С. 20–25.
3. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Каблов Д.Е. Особенности структуры и жаропрочных свойств монокристаллов <001> высокорениевого никелевого жаропрочного сплава, полученного в условиях высокоградиентной направленной кристаллизации //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 25–31.
4. 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. 47–54.
5. 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.
6. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Василенок Л.Б., Морозова Г.И. Рений в жаропрочных никелевых сплавах для лопаток газовых турбин (продолжение) //Материаловедение. 2000. №3. С. 38–43.
7. 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. Екатеринбург: Наука Сервис. 2011. Т. 1. С. 31–38.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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. №1. 2014. С. 86–90.
17. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Горюнов А.В., Мин П.Г. Ресурсосберегающая технология переработки некондиционных отходов литейных жаропрочных сплавов //Металлург. №5. 2014. С. 35–39.
18. 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. 2014. №6. Ст. 01 (viam-works.ru).

19. Improved low sulfur nickel-base single crystal superalloy with ppm additions of lanthanum and yttrium: pat. 2415888 EU; publ. 14.10.2010.
20. Zhuanggi HU, Hongwei SONG, Shouren GUO, Wenru SUN and Dezhong LU. Effects of Phosphorus on Microstructure and Creep Property of IN718 Superalloy //J. Mater. Sci. Technol. 2005. V. 21. Suppl. P. 73–76.
21. 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.
22. 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 (720). С. 55–59.
23. 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. 2014. №2. Ст. 03. (materialsnews.ru).
24. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Филонова Е.В., Тимофеева О.Б. Структурные исследования и свойства монокристаллов сплавов ВЖМ4-ВИ и ВЖМ5-ВИ, содержащих повышенное количество фосфора //Труды ВИАМ. 2014. №3. Ст. 02 (viam-works.ru).
25. Сидоров В.В., Мин П.Г. Рафинирование сложнолегированного никелевого расплава от примеси серы при плавке в вакуумной индукционной печи (часть 1) //Электротехнология. 2014. №3. С. 18–23.
26. 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.
27. Мин П.Г., Сидоров В.В. Рафинирование отходов жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ от примеси кремния в условиях вакуумной индукционной плавки //Труды ВИАМ. 2014. №9. Ст. 01 (viam-works.ru).
28. 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.
29. Сидоров В.В., Мин П.Г., Фоломейкин Ю.И., Вадеев В.Е. Влияние скорости фильтрации сложнолегированного никелевого расплава через пенокерамический фильтр на содержание примеси серы в металле //Электротехнология. 2015. №5. С. 12–15.
30. Сидоров В.В., Мин П.Г. Рафинирование сложнолегированного никелевого расплава от примеси серы при плавке в вакуумной индукционной печи (часть 2) //Электротехнология. 2014. №5. С. 26–30.
31. Каблов Е.Н., Сидоров В.В. Микролегирование РЗМ – современная технология повышения свойств литейных жаропрочных никелевых сплавов //Перспективные материалы. 2001. №1. С. 23–24.
32. Филиппов К.С., Бурцев В.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е. Исследование поверхностного натяжения и плотности расплавов никеля, содержащего примеси серы, фосфора и азота //Физика и химия обработки материалов. 2013. №1. С. 52–56.
33. Литые лопатки газотурбинных двигателей /Под ред. Е.Н. Каблова. М: Наука. 2006. 632 с.
34. 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.
35. Механик Е.А., Мин П.Г., Гундобин Н.В., Растегаева Г.Ю. Определение массовой доли серы в жаропрочных никелевых сплавах и сталях в диапазоне концентраций от 0,0001 до 0,0009% (по массе) //Труды ВИАМ. 2014. №9. Ст. 12 (viam-works.ru).
36. Якимович П.В., Алексеев А.В., Мин П.Г. Определение низких содержаний фосфора в жаропрочных никелевых сплавах методом ИСП-МС //Труды ВИАМ. 2014. №10. Ст. 02 (viam-works.ru).
37. Megchiche E.H., Amarouche M., Mijoule C. First-principle calculations of the diffusion of atomic oxygen in nickel: thermal expansion contribution //Journal of Physics: Condensed Mater. 2007. V. 19. №29. P. 296201.
38. Zachery C.L. A computational investigation of the effect of alloying elements on the thermodynamic and diffusion properties of FCC Ni alloys with application to the creep rate of delute Ni-X alloys: dissertation for the degree of DF. Pennsylvania University. 2012.