

15. *Walston S., Cetel A., MacKay R., O'Hara K., Duhl D., Dreshfield R.* Joint development of a fourth generation single crystal superalloys / In: *Superalloy 2004*, Seven Springs Mountain Resort, Champion (Pennsylvania) // Minerals, Metals & Materials Society. 2004. P. 15–24.
16. *Caron P., Diologent F., Drawin S.* Influence of chemistry on the tensile yield strength of nickel-based single crystal superalloys / In: *Euro Superalloys 2010*, Trans. Tech. Publication, Switzerland // *Advanced Materials Research*. 2011. V. 278. P. 345–350.
17. *Koizumi Y., Kobayashi T., Yokokawa T., Zhang J., Osawa M., Harada H., Aoki Y., Arai M.* Development of next-generation Ni-base single crystal superalloys / In: *Superalloys 2004*, Seven Springs Mountain Resort, Champion (Pennsylvania) // Minerals, Metals & Materials Society. 2004. P. 35–43.
18. *Harada Sato, H., Yen An-C., Kawagishi K., Kobayashi T., Koizumi Y., Yokokawa T., Zhang J.-X.* A 5th generation SC superalloy with balanced high temperature properties and processability / In: *Superalloys 2008*, Seven Springs Mountain Resort, Champion (Pennsylvania) // Minerals, Metals & Materials Society. 2008. 131–138.
19. Low density, high creep resistant single crystall superalloy for turbine airfoils: pat. 7261783 US. 2007.
20. Nickel-Basislegierung für die gießtechnische Herstellung einkristallin erstarter Bauteile: pat. 10100790 DE, 18.07.2002.
21. *Голубовский Е.Р., Светлов И.Л.* Температурно-временная зависимость анизотропии характеристик длительной прочности монокристаллов ЖНС // *Проблемы прочности*. 2002. № 2. С. 5–19.
22. *Каблов Е.Н., Петрушин Н.В.* Компьютерный метод конструирования литейных жаропрочных никелевых сплавов / В сб.: *Литейные жаропрочные сплавы*. Эффект С.Т. Кишкина. М.: Наука. 2006. С. 56–78.
23. *Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Морозова Г.И., Светлов И.Л.* Физико-химические факторы жаропрочности никелевых сплавов, содержащих рений // В сб.: *Литейные жаропрочные сплавы*. Эффект С.Т. Кишкина. М.: Наука. 2006. С. 116–130.
24. *Морозова Г.И.* Закономерность формирования химического состава γ'/γ -матрицы многокомпонентных никелевых сплавов // *ДАН СССР*. 1991. Т. 320. № 6. С. 1413–1416.
25. *Morinaga M., Yukawa N., Adachi H., Ezaki H. and Murata Y.* New PHACOMP and its application to alloy design / In: *Superalloys 1984* // The Metallurgical Society of AIME. 1984. P. 523–532.
26. *Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р.* Жаропрочность никелевых сплавов. М.: Машиностроение. 1998. 462 с.

*Б.С. ЛОМБЕРГ, С.В. ОВСЕПЯН,
М.М. БАКРАДЗЕ, И.С. МАЗАЛОВ*

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЖАРОПРОЧНЫЕ НИКЕЛЕВЫЕ СПЛАВЫ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Более 70-ти лет ВИАМ обеспечивает отечественную промышленность деформируемыми жаропрочными никелевыми сплавами и технологиями их производства. Созданные материалы применяются в авиации, космической технике и судостроении, в газоперекачивающих и энергетических станциях, в атомной промышленности.

За эти годы разработаны материалы для дисков турбины и компрессора высокого давления (КВД), лопаток турбины и КВД, свариваемых корпусов, камеры сгорания, крепежа и других деталей. Созданы технологии, восстанавливающие свойства и продлевающие ресурс ответственных деталей двигателя после наработки. Развиваются направления по разработке

жаропрочных материалов нового класса. Выполнены значимые исследования в содружестве с коллективами металлофизиков и технологов института, сотрудниками серийных металлургических и машиностроительных заводов. Важную часть работы коллектива составляет авторское сопровождение серийного производства материалов, созданных ранее, проводятся арбитражные исследования.

Жаропрочные деформируемые сплавы для дисков ГТД

В ВИАМ создан целый ряд жаропрочных никелевых сплавов – ЭИ698, ЭП742, ЭК79, ЭК151, ЭП975 – для дисков, успешно применяемых в российских газотурбинных двигателях*.

Однако для перспективных изделий требуются новые материалы, обладающие более высоким комплексом свойств.

В 2007 г. завершена разработка дискового высоколегированного сплава нового поколения ВЖ175, содержащего ~50% упрочняющей γ' -фазы. Кроме химического состава, материал принципиально отличается по структуре от отечественных серийно используемых сплавов. Сплав ВЖ175 превосходит лучшие отечественные (ЭК79-ИД, ЭК151-ИД) и зарубежные аналоги (Rene 88DT, N18, экспериментальный LSHR) по кратковременной и длительной прочности – от 4 до 25%, по усталостным характеристикам – от 10 до 30% (рис. 1). В отличие от новых сплавов, получаемых металлургией гранул, сплав ВЖ175 в интервале рабочих температур имеет более высокие значения МЦУ и стойкости к сульфидно-оксидной коррозии. Применяя новую технологию переработки сплава, включающую выплавку слитка методом высокоградиентной направленной кристаллизации (ВГНК) и деформацию в изотермических условиях, были изготовлены штамповки дисков различных шифров для малоразмерных ГТД (рис. 2, а).

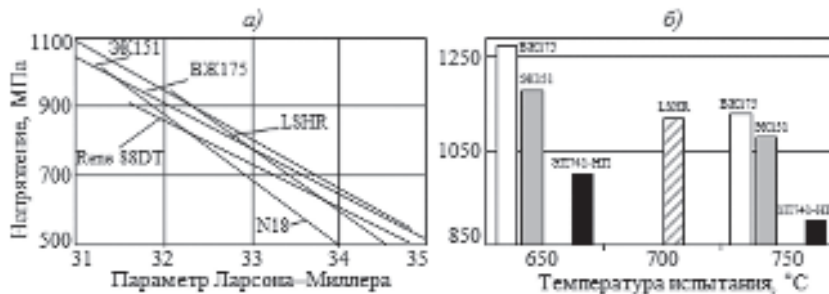


Рис. 1. Свойства жаропрочных никелевых сплавов для дисков турбины: а – длительная прочность при 650°C; б – малоцикловая усталость на базе 10^4 циклов при $R = 0,1$, $f = 1$ Гц

В соответствии с программами по освоению новых материалов для семейства двигателей ПД-14 БСМС (самолет МС-21) ОАО «Авиадвигатель» и перспективного изделия ОАО «НПО «Сатурн» была разработана промышленная технология производства штамповок дисков турбины из сплава ВЖ175-ИД разных шифров, массой до 180 кг, в том числе сложной геометрической формы (рис. 2, б).

* В работе принимали участие: М.Н. Летников, Е.Б. Чабина, Е.Н. Лимонова, Т.И. Григорьева, Н.Л. Вавилин.



Рис. 2. Штамповки из сплава ВЖ175-ИД массой 15 (а) и до 180 кг (б)

Сложнейшая задача разработки и освоения серийной технологии производства крупногабаритных штамповок из нового высоколегированного сплава была успешно решена за короткий срок в условиях металлургического завода «Электросталь» и Ступинской металлургической компании.

Реализованы решения, существенно отличающиеся от известных, в частности для сплава ЭК151-ИД. Впервые создана и отработана в промышленном производстве технология закалки крупногабаритных заготовок, при которой формируется равномерная структура зерна матрицы размером 15–40 мкм и набором частиц γ' -фазы от 7 мкм до <50 нм, а также обеспечиваются свойства материала на уровне паспортных (табл. 1).

Таблица 1
Свойства новых высокожаропрочных сплавов для дисков ГТД
(рабочая температура 800°C)

Сплав	Плотность d , кг/м ³	Кратковременная прочность при 20°C			Жаропрочность σ , МПа, на базе, ч			Малоцикловая усталость σ , МПа, при $N = 10^4$ цикл, $f = 1$ Гц (гладкие образцы)	
		σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ , %	100		1000		
		МПа			при температуре, °C				
		650	750	650	650	750			
ВЖ175	8266	1595	1147	17,5	1050	638	950	1275	1128
ВЖ175У	8400	1570	1158	15,8	1055	687	961	1177	1030

При разработке режима термической обработки проведены моделирование и расчет внутренних напряжений* для штамповки диска, в том числе сложной геометрической формы. Установлены места концентрации напряжений и оптимизированы режимы обработки.

* Работа выполнена совместно с сотрудниками Московского авиационного института (национального научно-исследовательского университета).

Для достижения высокого уровня свойств современных сложнолегированных жаропрочных никелевых сплавов для дисков ГТД необходимо применять интенсивное охлаждение заготовок сжатым воздухом, обеспечивать автоматическое регулирование скорости нагрева и охлаждения садки и выполнение заданных режимов с точностью по температуре $\pm 5^\circ\text{C}$.

На крупногабаритных штамповках (из металла промышленной выплавки) проведены квалификационные испытания с определением средних и минимальных расчетных характеристик сплава ВЖ175 на уровне -3σ . В разных зонах штамповки определены значения скорости распространения трещины усталости, длительная прочность в течение 1000 ч, ползучесть на базе испытаний до 500 ч и другие характеристики, не вошедшие в паспорт на сплав. Разработана научно-техническая документация: технологические рекомендации, производственные инструкции, технические условия, обеспечившие разработку промышленных технологий. Впервые для крупногабаритных штамповок из деформируемых жаропрочных никелевых сплавов осуществлялся ультразвуковой контроль с контрольным отражателем, соответствующим дефекту 0,8 мм.

Проведены исследования по дальнейшему совершенствованию дисковых сплавов и технологий обработки, разработан сплав ВЖ175У, отличающийся от прототипа (ВЖ175) более высокой жаропрочностью (см. табл. 1).

Изучена устойчивость структурно-фазового состояния новых дисковых сплавов с выдержкой до 2000 ч при рабочих температурах; установлено, что сплавы ВЖ175 и ВЖ175У стабильны.

Жаропрочные деформируемые свариваемые сплавы

В ВИАМ создано более 20 марок жаропрочных свариваемых сплавов на Ni и Ni-Fe основах, которые применяются для деталей газотурбинных двигателей.

За последние 5 лет проведены разработка промышленных технологий и производственное опробование ранее созданных материалов – ВЖ172, ВЖ171 и ВЖ159*.

Паспортизованный в 2007 г. высокожаропрочный свариваемый никелевый сплав ВЖ172 с рабочей температурой до 900°C превосходит все отечественные материалы аналогичного назначения (ЭП693, ЭП708, ЭП718) по значениям длительной и кратковременной прочности. По сравнению с широко применяемым за рубежом серийным сплавом In718, у сплава ВЖ172 на 200°C выше рабочая температура, на 10–25% – прочностные характеристики и на 13–55% – жаропрочность в интервале температур $600\text{--}700^\circ\text{C}$. Наряду с этим сплав ВЖ172 обладает высокой для данного класса материалов технологической пластичностью и свариваемостью, что позволяет изготавливать из него широкую номенклатуру полуфабрикатов и обеспечить высокую степень унификации материала в конструкции двигателя.

Разработаны промышленные технологии выплавки, деформации и термической обработки сплава ВЖ172 применительно к полуфабрикатам различной номенклатуры. В условиях металлургического завода «Электросталь», завода «Русполимет», ВИАМ и НПО «Сатурн» освоено

* Сплавы разработаны под руководством С.А. Моисеева и В.Б. Латышева.

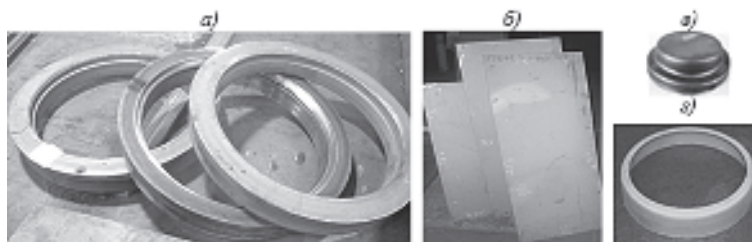


Рис. 3. Полуфабрикаты и детали из сплава ВЖ172:

a – цельнокатаные кольцевые заготовки массой 240 кг; *б* – листы; *в* – штамповка детали «фланец» камеры сгорания; *г* – деталь «обечайка» камеры сгорания

производство: листа горяче- и холоднокатаного толщиной от 12 до 1,5 мм, поковок-штанг массой до 350 кг, катаных прутков диаметром от 80 до 150 мм, колец цельнокатаных массой от 50 до 240 кг, отливок. Получены партии заготовок для корпусов и деталей камеры сгорания перспективных двигателей (рис. 3).

На металле промышленной выплавки для различных полуфабрикатов из сплава ВЖ172 проведены испытания с определением средних и минимальных расчетных характеристик. Свойства сплава (в сравнении с материалами аналогичного назначения) представлены в табл. 2.

Таблица 2

Механические свойства полуфабрикатов из свариваемых сплавов (средние значения)

Сплав	Вид полуфабриката	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ , %	$\sigma_{100}^{600^\circ}$	$\sigma_{100}^{700^\circ}$
		МПа			МПа	
ВЖ172	Холоднокатаный лист	1450	1050	25	975	630
	Литые заготовки	1030	822	7,0	700	630
	Катаное кольцо, профиль 120 × 90 мм	1416	1030	20	972	630
ЭП708-ИД	Катаный профиль 92 × 30 мм	1195	880	30	810	470
In718	Кованый профиль 50 × 100 мм	1276	1000	12	850	500

Освоено промышленное производство полуфабрикатов из высокотехнологичного свариваемого жаропрочного сплава ВЖ159 – это структурно стабильный слабостареющий материал с рабочей температурой 650–1000°C, отличающийся высокой технологичностью и термopрочностью. На металлургическом заводе «Электросталь», Ашинском металлургическом комбинате и заводе «Русполимет» изготовлены партии прутков, поковок, колец, листов, ленты для изделий НПО «Сатурн» и ГК «Росатом». Разработан новый четырехступенчатый режим старения, обеспечивающий более высокие прочность (>10%), жаропрочность и сопротивление ползучести.

Сплав ВЖ171 – принципиально новый листовой свариваемый материал, разработанный для наиболее горячих зон газотурбинного двигателя, в том числе для жаровой трубы камеры сгорания. В результате химико-

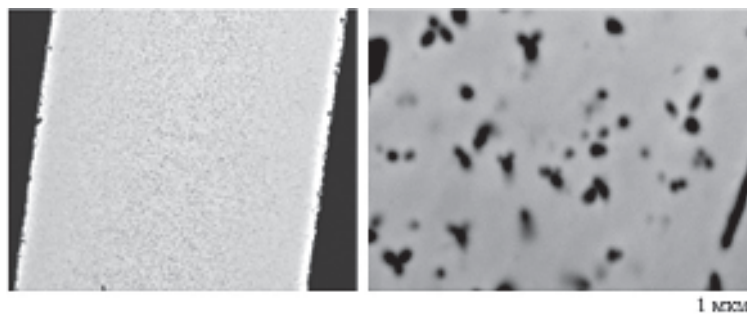


Рис. 4. Микроструктура (а – $\times 100$, б – $\times 10000$) сплава ВЖ171

термической обработки он упрочняется частицами нитридов титана, в том числе и наноразмерными, которые стабильны вплоть до температуры плавления сплава (рис. 4). Максимальная рабочая температура сплава ВЖ171 составляет 1250°C , что выше на $150\text{--}200^{\circ}\text{C}$, чем у серийных материалов аналогичного применения. При температурах до 1100°C его жаропрочность выше в 3–4 раза.

За последние годы в ВИАМ разработаны технологии производства листов из сплава ВЖ171 и химико-термической обработки деталей. Проведено опробование технологий производства жаровых труб камер сгорания для трех видов малоразмерных ГТД на серийном оборудовании НПЦ газотурбостроения «Салют», КОБМ (г. Калуга) и НПП «Аэросила» (г. Ступино). В составе одного из двигателей сплав успешно прошел эксплуатационные испытания.

Для элементов сопряжения компрессора (с рабочей температурой до 600°C) разработан высокопрочный листовая свариваемый сплав на никель-железокобальтовой основе марки ВЖ176 с прочностью: $\sigma_{\text{в}} = 1400$ МПа, $\sigma_{100}^{600^{\circ}} = 950$ МПа. Оптимизированы технологии его получения, сварки и термической обработки. В интервале температур $20\text{--}600^{\circ}\text{C}$ сплав ВЖ176 превосходит серийные сплавы: ЭП718 (отечественный) и In907 (зарубежный) по прочности – на $10\text{--}25\%$ и жаропрочности – на $15\text{--}20\%$. Сплав ВЖ176 обладает низким температурным коэффициентом линейного расширения ($\alpha = 11,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ в диапазоне температур $20\text{--}600^{\circ}\text{C}$).

О.А. БАЗЫЛЕВА, Э.Г. АРГИНБАЕВА, Е.Ю. ТУРЕНКО

ЖАРОПРОЧНЫЕ ЛИТЕЙНЫЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫЕ СПЛАВЫ

С целью повышения температуры газа перед турбиной и, как следствие, КПД двигателя создан новый класс литейных конструкционных высокотемпературных экономнолегированных материалов на основе интерметаллида Ni_3Al серии ВКНА (ВИАМ, конструкционный никель-алюминиевый), предназначенных для изготовления деталей газотурбинных двигателей, эксплуатируемых в диапазоне температур $900\text{--}1200^{\circ}\text{C}$.

Анализируя параметры механических свойств, длительной прочности и пределов усталости при создании интерметаллидных сплавов серии