



# Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей

Б.С. Ломберг

*доктор технических наук*

С.В. Овсебян

*кандидат технических наук*

М.М. Бакрадзе

*кандидат технических наук*

И.С. Мазалов

Июнь 2012

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более, чем в 30-ти научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в 4-х филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках Международных салонов в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат Государственных премий СССР и РФ, академик РАН Е.Н.Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в юбилейном научно-техническом сборнике «80 лет. Авиационные материалы и технологии» (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»).

Электронная версия доступна по адресу: [www.viam.ru/public](http://www.viam.ru/public)

## **Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей**

Б.С. Ломберг, С.В. Овсеян, М.М. Бакрадзе, И.С. Мазалов

*Всероссийский институт авиационных материалов.*

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  $\gamma'$ -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).

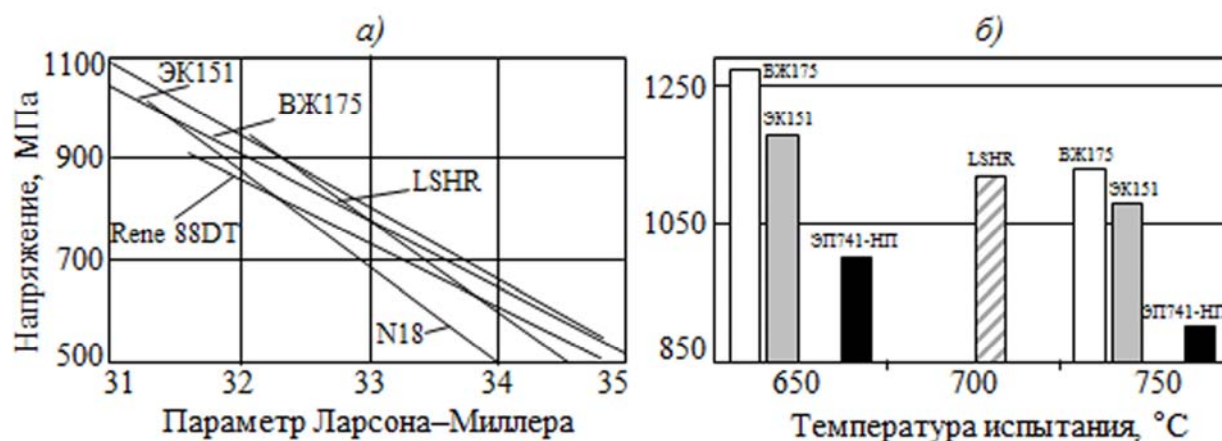


Рисунок 1. Свойства жаропрочных никелевых сплавов для дисков турбины: *а* – длительная прочность при 650°C; *б* – малоцикловая усталость на базе  $10^4$  циклов при  $R=0,1, f=1$  Гц

В 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*).



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

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).

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  $\gamma'$ -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<br>$d$ , кг/м <sup>3</sup> | Кратковременная<br>прочность при 20°С |                |              | Жаропрочность<br>$\sigma$ , МПа, на базе, ч |     |      | Малоцикловая<br>усталость<br><br>$\sigma$ , МПа,<br>при $N=10^4$ цикл,<br><br>$f=1$ Гц<br><br>(гладкие<br>образцы) |      |
|--------|--------------------------------------|---------------------------------------|----------------|--------------|---|-----|------|--|------|
|        |                                      | $\sigma_B$                            | $\sigma_{0,2}$ | $\delta$ , % | 100   |     | 1000 |  |      |
|        |                                      | МПа                                   |                |              | при температуре, °С                         |     |      |  |      |
|        |                                      |                                       |                |              | 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.

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  $-3\sigma$ . 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 600–700°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 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).

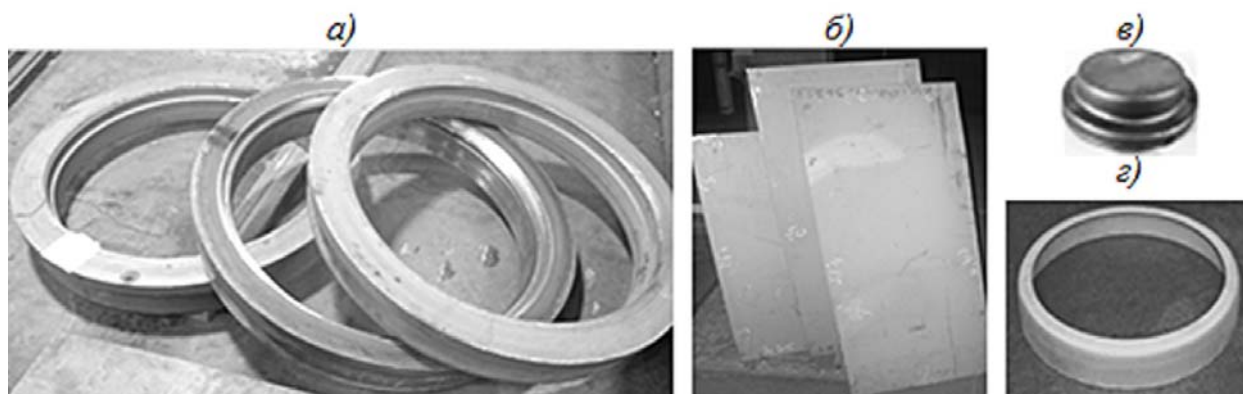


Рисунок 3. Полуфабрикаты и детали из сплава ВЖ172: *а* – цельнокатаные кольцевые заготовки массой 240 кг; *б* – листы; *в* – штамповка детали «фланец» камеры сгорания; *г* – деталь «обечайка» камеры сгорания

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<br><br>полуфабриката          | $\sigma_B$ | $\sigma_{0,2}$ | $\delta$ ,<br>% | $\sigma_{100}^{600^{\circ}}$ | $\sigma_{100}^{700^{\circ}}$ |
|----------|-----------------------------------|------------|----------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|
|          |                                   | 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    | Кованный 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 термочувствительностью. 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-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 150–200°C, чем у серийных материалов аналогичного применения. При температурах до 1100°C его жаропрочность выше в 3–4 раза.

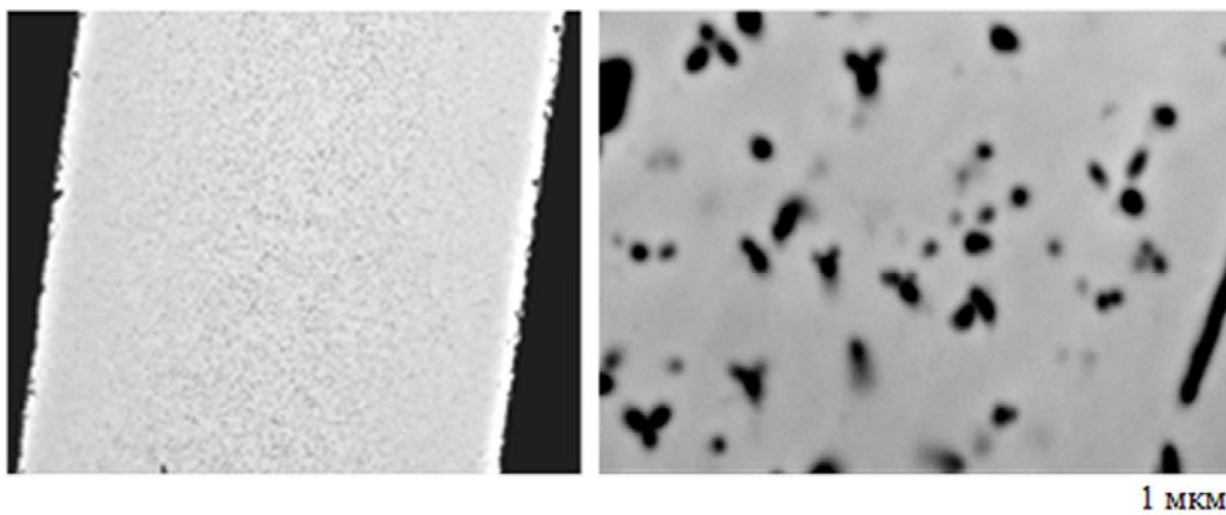


Рисунок 4. Микроструктура (*a* –  $\times 100$ , *б* –  $\times 10000$ ) сплава ВЖ171

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  $600^{\circ}\text{C}$ ) разработан высокопрочный листовой свариваемый сплав на никель-железкобальтовой 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 In 907 (зарубежный) по прочности – на 10–25% и жаропрочности – на 15–20%. Сплав ВЖ176 обладает низким температурным коэффициентом линейного расширения ( $\alpha=11,8 \cdot 10^{-6}$  в диапазоне температур  $20\text{--}600^{\circ}\text{C}$ ).