
УДК 669.245:621.433

Б.С. Ломберг, С.В. Овсепян, М.М. Бакрадзе

ОСОБЕННОСТИ ЛЕГИРОВАНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ДИСКОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Разработаны и опробованы в производстве два новых высокожаропрочных никелевых сплава для дисков турбин: ВЖ175 и ЭП975А с максимальными температурами работы – до 800 и 975°С соответственно.

По комплексу свойств сплавы превосходят известные российские и зарубежные материалы аналогичного применения и могут быть использованы в газотурбинных двигателях нового поколения.

Ключевые слова: *легирование, фазовая стабильность, отжиг, закалка, структура, свойства.*

Постоянными тенденциями развития газотурбинных двигателей (ГТД) является повышение температуры и эксплуатационных нагрузок деталей ротора турбины. Для повышения параметров удельной тяги отечественных двигателей нового поколения, экономичности и ресурса, обеспечения их конкурентоспособности на мировом рынке, необходимо применять материалы, имеющие существенные преимущества по сравнению с серийными.

Трудности создания новых деформируемых сплавов, превосходящих известные сплавы по комплексу свойств, а также технологий их переработки связаны со сложностью их композиций.

Материалы и методики исследований

Вакуумно-индукционную выплавку опытных составов проводили в печи УППФ-3. Переплавление слитки массой 25 кг осуществляли на установке направленной кристаллизации УВНК-14.

Для деформации заготовок использовали прессы мощностью 630 и 1600 тс с изотермической установкой нагрева штампов УИДИН.

Микроструктуру сплавов изучали на оптическом микроскопе «Neophot-21» и растровом электронном микроскопе JSM-840. Основные характеристики микроструктуры (морфология, распределение и размеры выделений γ' -фазы) на различных стадиях переработки материала были определены методом количественного анализа (обработка изображений в компьютерных программах Leica Q550MW и Image Expert Pro 3).

Испытания на растяжение и длительную прочность проводили в соответствии с ГОСТ Р 1497 и ГОСТ Р 10145 (гладкие цилиндрические образцы с диаметром рабочей части $d=5$ мм и расчетной длиной $l=25$ мм на испытательных машинах ИР 5113 и ZST 2/3-ВИЭТ). Испытания на малоцикловую усталость (МЦУ) проводили по ГОСТ 25.502–79 в условиях циклического растяжения при коэффициенте асимметрии цикла $R=0$, при частоте нагружения 1 Гц.

Результаты исследований

Дисковые сплавы, созданные в ВИАМ: ЭИ698, ЭП742, ЭК79, ЭП975, ЭК151, – многие годы успешно применяются в ГТД различного назначения и не уступают по свойствам зарубежным материалам Inconel 718, Waspaloy, Udimet 720, Rene 88DT, N18.

За последние 5 лет ведущими фирмами GE, P&W, «Rolls-Royce», NASA разработан ряд новых дисковых сплавов с рабочими температурами до 700°С, обладающих

высокими характеристиками прочности и трещиностойкости: Rene 104 [1], LSHR [2], Alloy 10 [3], RR1000 [4], Inco718Plus [5] и др.

Однако как для серийных материалов, так и для новых зарубежных сплавов не удалось решить проблему снижения жаропрочности и ползучести при уменьшении размера зерна. Наиболее перспективные зарубежные материалы LSHR и Alloy 10 в мелкозернистом варианте имеют прочность выше 1600 МПа (рис. 1), но с увеличением температуры значительно снижается их длительная прочность (рис. 2). Кроме того, обеспечить высокие значения малоциклового усталости (рис. 3) и повысить рабочую температуру не позволяет метод производства заготовок дисков – гранулярная металлургия.

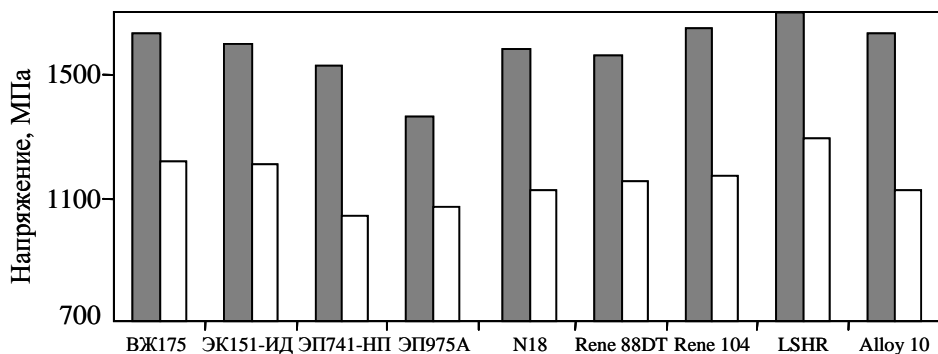


Рис. 1. Механические свойства при 20°C (■ – σ_b ; □ – $\sigma_{0.2}$) жаропрочных сплавов для дисков турбин

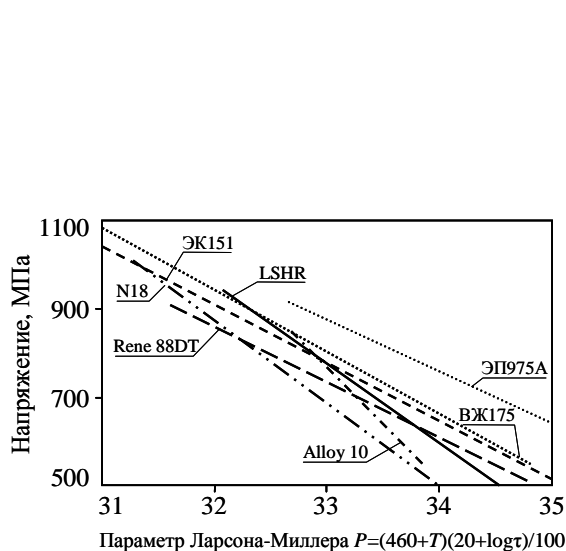


Рис. 2. Длительная прочность жаропрочных сплавов для дисков турбин (T , τ – температура и продолжительность испытаний)

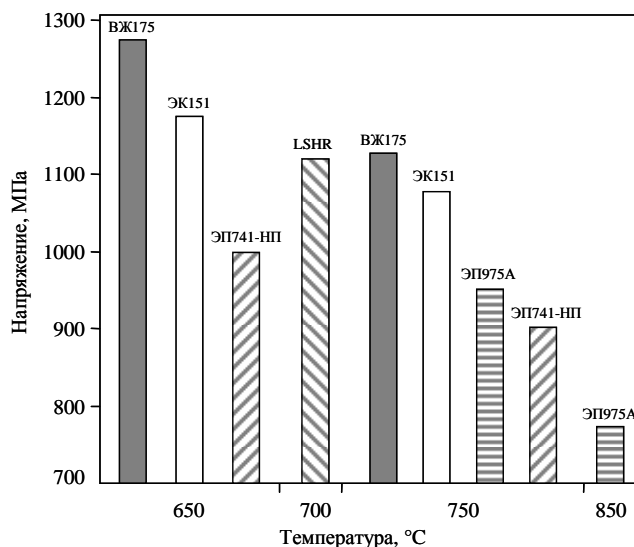


Рис. 3. Малоцикловая усталость на базе 10^4 цикл при $R=0$ жаропрочных дисковых сплавов

В настоящее время для перспективных отечественных двигателей, особенно для военной авиации, требуются дисковые сплавы с высокой прочностью, жаропрочностью, МЦУ и рабочей температурой на ободе диска до 800°C.

Создание сплава, обладающего одновременно высокой кратковременной и длительной прочностью, является весьма сложной научно-технической задачей, и решить ее можно только комплексно – оптимизацией легирования, технологии производства и термической обработки.

В результате проведенных исследований в ВИАМ были разработаны новые сплавы для дисков турбин двигателей нового поколения. Первый – ВЖ175, обладающий высокой прочностью и жаропрочностью, с максимальной рабочей температурой – до 800°C, второй – ЭП975А, работоспособный до 975°C.

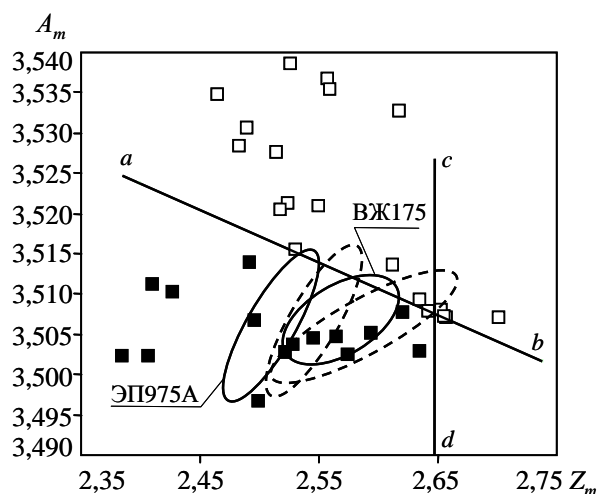
При разработке химического состава сплавов, для оценки уровня свойств и фазовой стабильности использовали физико-химическую модель на основе уравнений неполяризованных ионных радиусов (СНИР) [6]. При этом оценивали всю совокупность составов, изменяя концентрации каждого из компонентов (14 компонентов) от минимальной до максимальной величины. На рис. 4 представлена диаграмма фазового состава разработанных сплавов и прототипов. Видно, что новые составы более стабильны.

Наиболее высокие свойства обеспечиваются повышенным содержанием ниобия в сочетании с комплексным микролегированием бором, магнием, скандием, лантаном и церием.

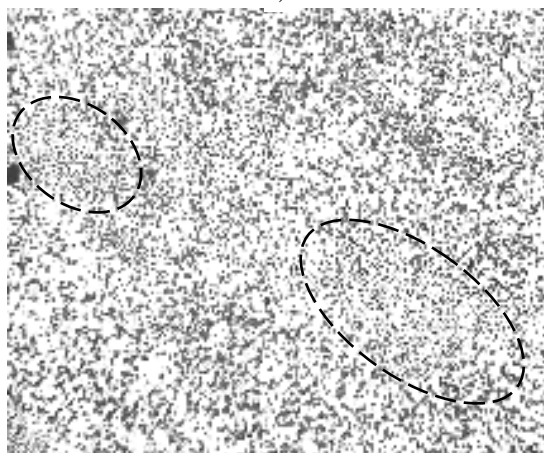
С целью обеспечения комплекса прочности, жаропрочности и сопротивления усталости, для дискового сплава ВЖ175 впервые в отечественной практике разработана термическая обработка, формирующая мелкозернистую структуру с размером зерен 15–20 мкм. В отличие от стандартной закалки – с температуры, близкой к температуре полного растворения γ' -фазы ($T_{п,\gamma'}$), – новый режим включает предварительный отжиг при температурах ниже $T_{п,\gamma'}$ и закалку из двухфазной области. Увеличение продолжительности отжига перед последней ступенью нагрева под закалку обеспечивает формирование однородного микроструктуры и равномерное распределение частиц γ' -фазы (рис. 5). Старение проводилось при 850 и 760°C.

Рис. 4. Диаграмма фазового состава жаропрочных никелевых сплавов (A_m ; Z_m – параметры твердого раствора):

□ – составы в которых обнаружены ТПУ фазы μ ; ■ – составы без ТПУ фаз; (---) – области составов прототипов; (○) – области оптимизированных составов; $a-b$, $c-d$ – границы стабильности твердого раствора по отношению к μ - и σ -фазам



а)



б)

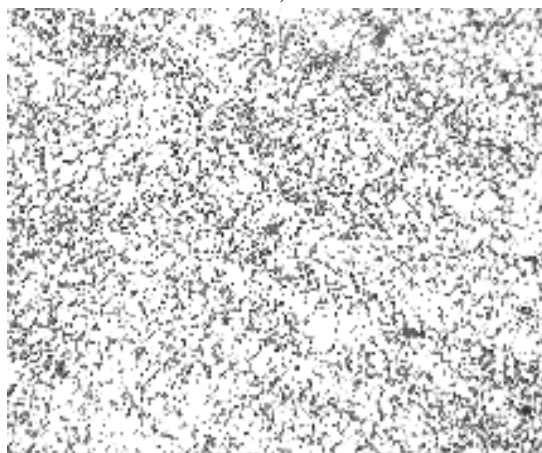


Рис. 5. Микроструктура ($\times 100$) сплава ВЖ175 после закалки из двухфазной области с предварительным отжигом:

a – отжиг по варианту 1 (---) – зоны с неравномерной структурой); b – отжиг по варианту 2 (в два раза увеличено время выдержки)

Микроструктура сплава ВЖ175 представлена на рис. 6. Упрочнение частицами γ' -фазы размером 4–7 мкм и более мелкими – от 40 до 700 нм – обеспечивает высокий уровень свойств и фазовую стабильность во всем диапазоне рабочих температур.

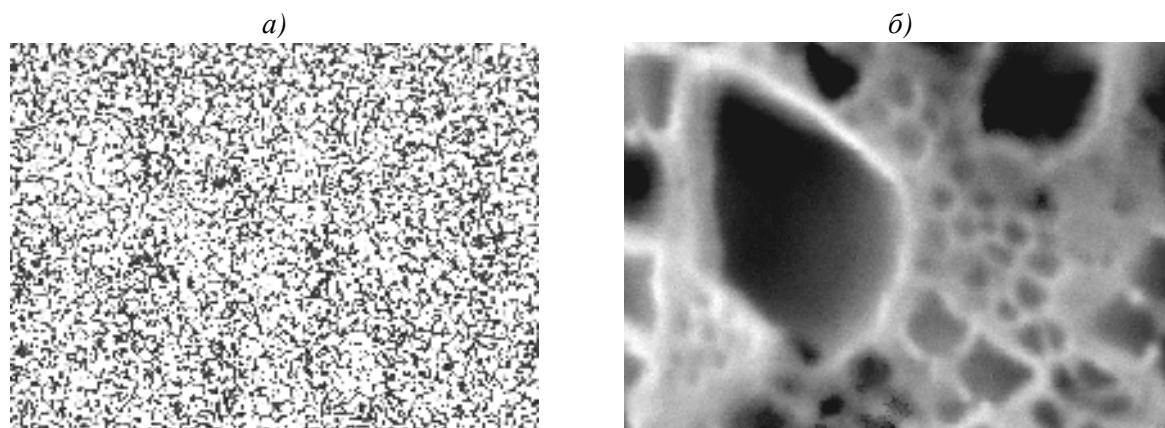


Рис. 6. Выделения γ' -фазы разных размеров в сплаве ВЖ175 после термической обработки: $a - \times 100$; $b - \times 50000$

Для сплава ЭП975А применяется отжиг в однофазной области с замедленным охлаждением до температуры ниже $T_{п.р\gamma}$ с последующей быстрой закалкой. Старение – при 920 и 850°C. В результате формируется зерно размером 90–120 мкм и частицы γ' размером 1–2 мкм и 80–300 нм (рис. 7). Такая структура обеспечивает работоспособность сплава до 975°C.

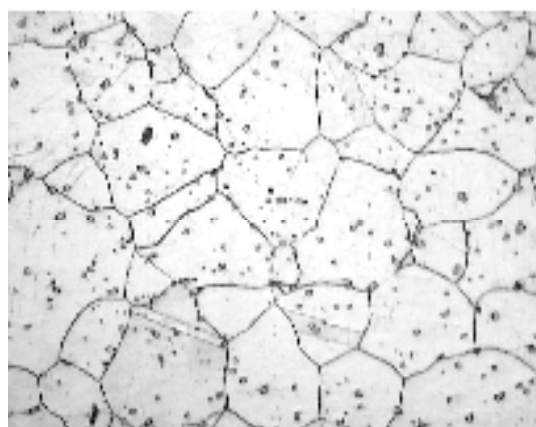


Рис. 7. Микроструктура ($\times 100$) сплава ЭП975А после термической обработки

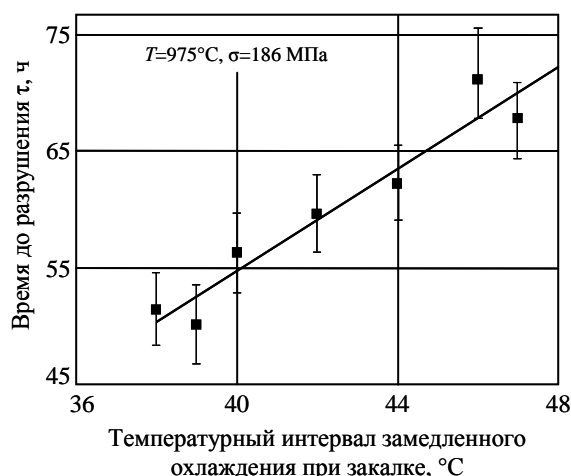


Рис. 8. Влияние режима закалки на длительную прочность сплава ЭП975А

Особенностью современных высоколегированных деформируемых никелевых сплавов является необходимость нового подхода к проведению термической обработки. Он заключается в учете температуры полного растворения γ' -фазы для каждой плавки и в применении оборудования с точностью поддержания температуры не ниже $\pm 5^\circ\text{C}$. Важна также возможность автоматического регулирования скорости нагрева и охлаждения садки. На рис. 8 показано влияние разницы между температурами отжига и выгрузки из печи при закалке на длительную прочность сплава ЭП975А. Видно, что изменение температуры всего на 10°C приводит к снижению долговечности образцов на 40%.

Представленные свойства сплавов ВЖ175 и ЭП975А (в сравнении с материалами аналогичного применения – см. рис. 1–3) показывают, что сплав ВЖ175 превосхо-

дит лучшие дисковые отечественные и зарубежные материалы по комплексу свойств, а сплав ЭП975А не имеет себе равных по жаропрочности и рабочей температуре.

Для получения из новых сплавов штамповок дисков создана не имеющая мировых аналогов технология, по которой изготовлены диски для малоразмерных ГТД – вертолетных двигателей, вспомогательных силовых установок, изделий кратковременного действия и др. (рис. 9)*. Существенными ее отличиями являются использование процесса высокоградиентной направленной кристаллизации для получения слитков и проведение обработки давлением в изотермических условиях для формирования однородной ультрамелкозернистой структуры с размером зерен менее 10 мкм в условиях контролируемой динамической рекристаллизации. По сравнению с традиционными методами новая технология обеспечивает улучшение металлургического качества заготовки, однородность структуры по сечению заготовки, повышение в 1,5–2 раза КИМ, снижение усилий при деформации (что позволяет использовать прессы малой мощности), снижение стоимости продукции, повышение эффективности производства при изготовлении малых партий заготовок и при переходе на новые изделия.

Опробование производства крупногабаритных заготовок (массой до 250 кг) из сплава ВЖ175, в том числе сложной геометрии, проводится в промышленных условиях ОАО «СМК» и ОАО «МЗ “Электросталь”».

Таким образом, в результате разработаны и опробованы в производстве два новых высокожаропрочных никелевых сплава для дисков турбин: ВЖ175 и ЭП975А – с максимальными температурами работы – до 800 и до 975°C соответственно. При оптимизации химического состава сплавов использовалось компьютерное моделирование, особенностями легирования является более высокое содержание ниобия в сочетании с микродобавками бора, магния, скандия, лантана и церия. По комплексу свойств сплавы превосходят известные российские и зарубежные материалы аналогичного применения и могут быть использованы в перспективных газотурбинных двигателях нового поколения.

Разработаны режимы термической обработки сплавов ВЖ175 и ЭП975А, обеспечивающие высокий уровень свойств и фазовую стабильность во всем диапазоне рабочих температур. Для ВЖ175 впервые в отечественной практике применен режим, формирующий структуру с размером зерна 15–20 мкм, с частицами γ' -фазы 4–7 мкм и более мелкими – от 40 до 700 нм; для ЭП975А – режим с закалкой из двухфазной области, обеспечивающий зерно 80–100 мкм и γ' -фазу размером 1–2 мкм и 100–400 нм. Особенностью термообработки современных высоколегированных деформируемых никелевых сплавов является учет температуры полного растворения γ' -фазы для каждой плавки и точность поддержания температуры не ниже $\pm 5^\circ\text{C}$.



Рис. 9. Штамповки дисков ТВД для малоразмерных ГТД (максимальный $\varnothing 280$ мм)

*Работа проведена совместно с В.В. Герасимовым, Е.М. Висик, Н.В. Моисеевым, Е.Н. Лимоновой (ВИАМ).

ЛИТЕРАТУРА

1. Gao Yong, Stolken J.S., Kumar Mukul, Ritchie R.O. High-Cycle Fatigue of Nickel-Base Superalloy Rene 104 (ME3): Interaction of Microstructurally Small Crack with Grain Boundaries of Known Character //Asta Mater. 2007. dio: 10.1016.
2. Gabb Timothy P., Gayda John, Telesman Jack, Kantzos Peter T. Thermal and Mechanical Property Characterization of the Advanced Disc Alloy LSHR //NASA/TM. 2005. 213645. June.
3. Rice D., Kantzos P., Hann B., Neumann J., Helmink R. P/M Alloy 10 – A 700°C Capable Nickel-Based Superalloy for Turbine Disk Applications. In: Superalloys 2008 //TMS. 2008. P.139–147.
4. Hardy M.C., Zirbel B., Shen G., Shankar R. Developing Damage Tolerance and Creep Resistance in a High Strength Nickel Alloy for Disc Applications. In: Superalloys 2004 //TMS. 2004. P. 83–90.
5. Besty J. Bond, Kennedy Richard L. Evaluation of Allvac® 718PLUS™ Alloy in the Cold Worked and Heat Treated Condition. In: Superalloys 718, 625, 706 and Derivatives //TMS. 2005. P. 203–211.
6. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бабурина Е.В. Расчет жаропрочности сложнолегированных никелевых сплавов с помощью уравнений системы неполяризованных ионных радиусов (СНИР) //МиТОМ. 1995. №6. С. 9–11.

УДК 669.295:669.018.44

О.С. Кашапов, Т.В. Павлова, Н.А. Ночовная

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА ДЛЯ ЛОПАТОК КВД

Рассматриваются основные факторы, определяющие свойства жаропрочных титановых сплавов псевдо- α -класса на примере сплава ВТ41М для лопаток КВД. Показано, что выбор оптимальной композиции сплава в сочетании с режимами термомеханической обработки обеспечивают наиболее эффективное сочетание твердорастворного и дисперсионного упрочнения. Установлена роль интерметаллидных фаз Ti_3Al и Ti_5Si_3 , выделяющихся при старении, на механические свойства, ударную вязкость и длительную прочность при 600°C сплава ВТ41М в отожженном и термоупрочненном состояниях. Приведены свойства прутковой лопаточной заготовки из сплава ВТ41М, в сравнении с аналогами – сплавами ВТ18У и ИМ1 834.

Ключевые слова: жаропрочные титановые сплавы, термическая обработка, механические свойства, микроструктура, интерметаллиды, силициды, длительная прочность.

Жаропрочные титановые сплавы псевдо- α -класса последнего поколения являются сложными многокомпонентными системами, основу которых составляет α -твердый раствор титана, упрочненный интерметаллидными соединениями алюминия и кремния. Для большинства зарубежных сплавов температура старения лежит в пре-