



УДК 669.245.018.44:629.7

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЗАКАЛКИ НА СТРУКТУРУ И
СВОЙСТВА ШТАМПОВОК ДИСКОВ ИЗ
ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЭК151-ИД**

М.М. Бакрадзе

кандидат технических наук

С.В. Овсебян

кандидат технических наук

С.А. Шугаев

М.Н. Летников

Сентябрь 2013

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 тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех 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 и международных салонах 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, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Труды ВИАМ»,
№9, 2013 г.

М.М. Бакрадзе, С.В. Овсепян, С.А. Шугаев, М.Н. Летников

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЗАКАЛКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ШТАМПОВОК ДИСКОВ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЭК151-ИД

Выявлены закономерности влияния режимов закалки на структуру и свойства высоколегированного жаропрочного деформируемого никелевого сплава ЭК151-ИД. Приведен анализ статистики промышленного производства в условиях ФГУП «ВИАМ» штамповок дисков малогабаритных ГТД из сплава ЭК151-ИД. Определен режим термической обработки для повышения уровня механических свойств.

Ключевые слова: жаропрочный сплав, механические свойства, структура, статистика, термообработка, γ' -фаза.

M.M. Bakradze, S.V. Ovsepyan, S.A. Shugaev, M.N. Letnikov

THE INFLUENCE OF QUENCHING ON STRUCTURE AND PROPERTIES NICKEL-BASED SUPERALLOY EK151-ID FORGINGS

The influence of quenching on structure and properties of high-alloy nickel-based superalloy EK151-ID was investigated. The statistical data of commercial EK151-ID superalloy small-sized GTE disc's forgings under condition on FSUE «VIAM» was analyzed in this paper. The optimal heat treatment leads to increase of mechanical properties of this alloy was determined.

Key words: superalloy, mechanical properties, structure, statistics, heat treatment, γ' -phase.

Современные жаропрочные никелевые сплавы для дисков газотурбинных двигателей (ГТД) отличаются сложным легированием и обладают высоким комплексом свойств, что требует применения особых технологических приемов для изготовления полуфабрикатов из них. Усовершенствование имеющихся и разработка новых эффективных технологий производства этих сплавов является одной из ключевых задач материаловедения на ближайшую перспективу [1].

При современном подходе уровень характеристик деформируемых жаропрочных никелевых сплавов в значительной степени определяет технология их деформации и окончательной термической обработки [2–4].

При производстве штамповок дисков из сложнолегированного сплава ЭК151-ИД, одной из важнейших технологических операций является закалка. Она включает в себя отжиг на твердый раствор и охлаждение заготовки по регламентированному режиму. Особенность закалки таких сплавов, как ЭК151-ИД – необходимость учета температуры полного растворения ($T_{п.р}$) упрочняющей γ' -фазы индивидуально для каждой плавки. Объемная доля γ' -фазы и температура ее полного растворения варьируются в пределах 5% и 15°C соответственно в зависимости от фактического химического состава. В связи с этим для термической обработки таких сплавов необходимо применять оборудование с точностью поддержания температуры не ниже $\pm 5^\circ\text{C}$ с возможностью автоматического регулирования скорости нагрева и охлаждения [2].

Вопросами технологии термической обработки – в большей степени режимов закалки – занимаются все разработчики жаропрочных никелевых сплавов. Например, NASA, фирмы General Electric, Honeywell, Rolls-Royce проводят масштабные исследования для новых марок сплавов LSHR, ME3, Alloy10, RR1000, изучают влияние температуры закалки – выше и ниже растворения γ' -фазы – на зернистую структуру и свойства [5–12]; выбирают режимы закалки в зависимости от температуры работы и требуемого набора характеристик материала; разрабатывают приемы обработки для формирования градиентной структуры и свойств в заготовках [13–15].

Серийная термическая обработка отечественных сплавов, содержащих менее 45% γ' -фазы (ЭИ698-ВД, ЭП742-ИД, ЭК79-ИД), предполагает закалку из однофазной области. Для более легированного сплава ЭК151-ИД, освоенного в промышленном производстве в 80-х годах, применяется закалка вблизи температуры $T_{п.р}$ γ' -фазы. Формирование структуры и свойств материала при такой термической обработке представляет интерес.

В ВИАМ разработаны технологии и налажено серийное производство штамповок дисков диаметром до 300 мм для малоразмерных газотурбинных двигателей (МГТД) из жаропрочных деформируемых сплавов ЭИ698-ВД, ЭП742-ИД, ЭК151-ИД, ЭП975-ИД в условиях изотермической деформации на воздухе [16, 17].

Данное исследование посвящено анализу влияния режимов закалки на структуру и свойства жаропрочного никелевого сплава ЭК151-ИД при производстве штамповок дисков в условиях ВИАМ.

Материалы и методика исследований

Деформация сплава ЭК151-ИД проводилась на гидравлическом прессе с усилием 630 тс, оборудованном установкой изотермического нагрева штампов. В качестве исходных заготовок использовались пресованные прутки $\varnothing 150$ мм. Технология производства включает в себя многостадийную деформацию, промежуточные отжиги, окончательную термическую обработку и обточку. Свойства материала оценивались по результатам сдаточных испытаний на растяжение, длительную прочность и ударный изгиб (по ГОСТ 1497, ГОСТ 10145, ГОСТ 9454) на образцах, изготовленных из технологических припусков.

В работе исследовали 58 штамповок дисков четырех шифров, близких по геометрии, из 7 плавов. Для каждой плавки металлографическим методом определяли $T_{п.р}$ γ' -фазы.

Влияние режимов закалки на структуру сплава изучали на оптическом микроскопе Olympus GX51 на нескольких микрошлифах, вырезанных от каждой штамповки из технологического припуска. Измеряли не менее 1000 зерен для каждой заготовки. Обработку изображений микроструктур проводили в программе Image Expert Pro 3.

Результаты исследований

В соответствии с действующей в серийном производстве технологией, закалка заготовок дисков из сплава ЭК151-ИД проводится с температуры $(1140-1160)\pm 10^\circ\text{C}$ с учетом $T_{п.р}$ γ' -фазы и для оптимального сочетания характеристик должна быть равна $T_{п.р\gamma'}\pm 10^\circ\text{C}$.

Установлено, что для исследуемых плавов $T_{п.р}$ γ' -фазы находится в интервале от 1149 до 1162°C .

Для каждой штамповки определены различные характеристики структуры: площадь, периметр, средний диаметр и параметры формы зерен; построена гистограмма распределения зерен по размерам. Установлено, что с увеличением температуры нагрева при закалке происходит рост среднего размера зерен в пределах от 27 до 86 мкм. На рис. 1 учитывались плавки и штамповки разных шифров, где по оси абсцисс отложена разность температур $T_{п.р\gamma'}$ и закалки ($T_{зак}$).

Зависимость механических свойств от размера зерна показана на рис. 2. Штамповки из сплава ЭК151-ИД с размером зерен от 60 до 113 мкм обладают наиболее

низкими из выборки значениями прочности и пластичности, а для некоторых заготовок с крупным зерном характеристики ударной вязкости и относительного сужения находятся на нижнем пределе норм технических условий. При этом для всех исследуемых заготовок значения длительной прочности соответствуют требованиям ТУ: при температуре 650°C и постоянно приложенном напряжении 1010 МПа все образцы были сняты без разрушения после 110 ч испытаний.

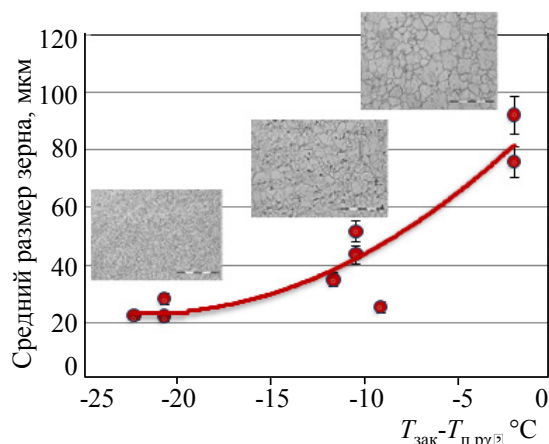


Рисунок 1. Влияние температуры закалки на размер зерна сплава ЭК151-ИД

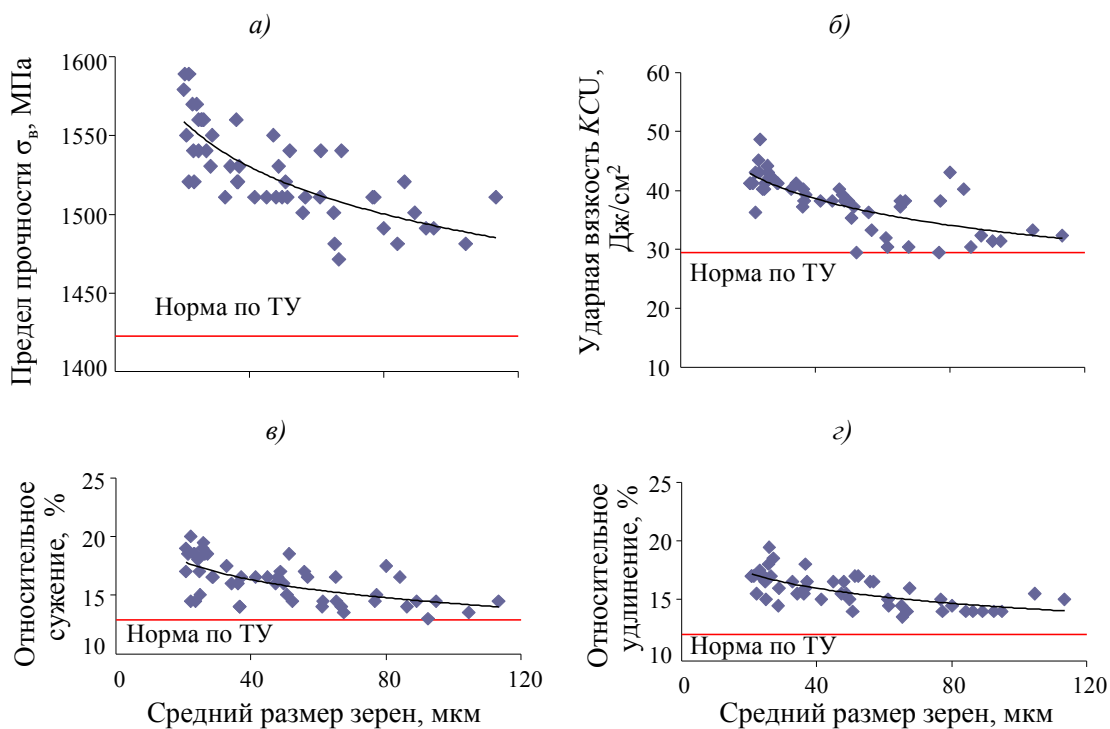


Рисунок 2. Влияние размера зерна на свойства штамповок дисков из сплава ЭК151-ИД

На рис. 3 показано, как зависят предел прочности при растяжении и ударная вязкость сплава от температуры закалки $T_{\text{зак}}$ (учитывалась разница этой температуры и $T_{\text{п.р}}$ γ' -фазы – см. рис. 1).

Полученные результаты хорошо согласуются с существующими в материаловедении представлениями. Известно, что для поликристаллических сплавов зависимость свойств от размера зерна описывается уравнением Петча–Холла:

$$\sigma = \sigma_i + K_y d^{-1/2},$$

где σ – напряжение; σ_i и K_y – константы материала; d – размер зерна.

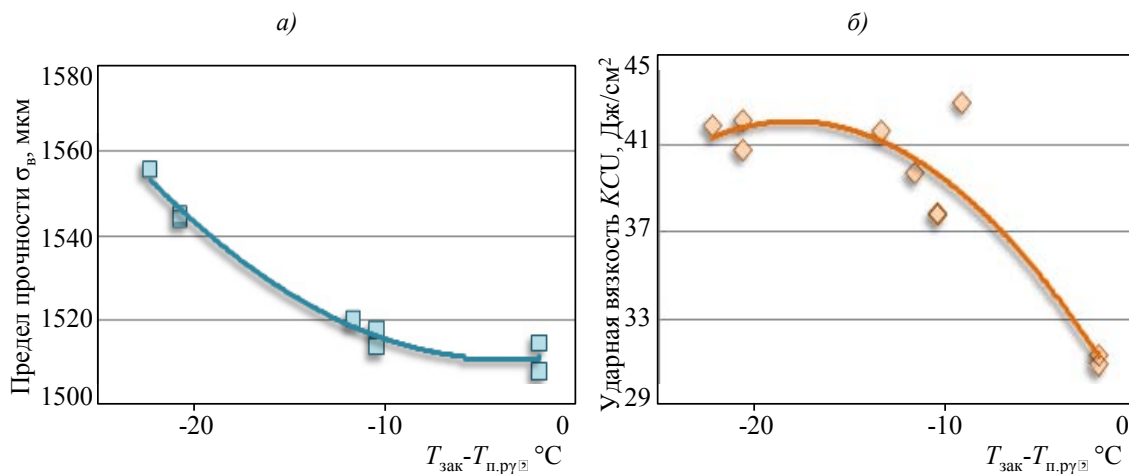


Рисунок 3. Влияние температуры закалки на свойства сплава ЭК151-ИД

С увеличением протяженности границ, т. е. при более мелком зерне, пределы текучести и прочности, а также сопротивление МЦУ повышаются.

Известно, что при уменьшении размеров зерен снижаются характеристики ползучести и длительная прочность [4–6]. Для сплава Udimet 720 эти зависимости представлены на рис. 4 [18]. В случае сплава ЭК151-ИД необходимо не допустить снижения длительной прочности ниже требований ТУ.

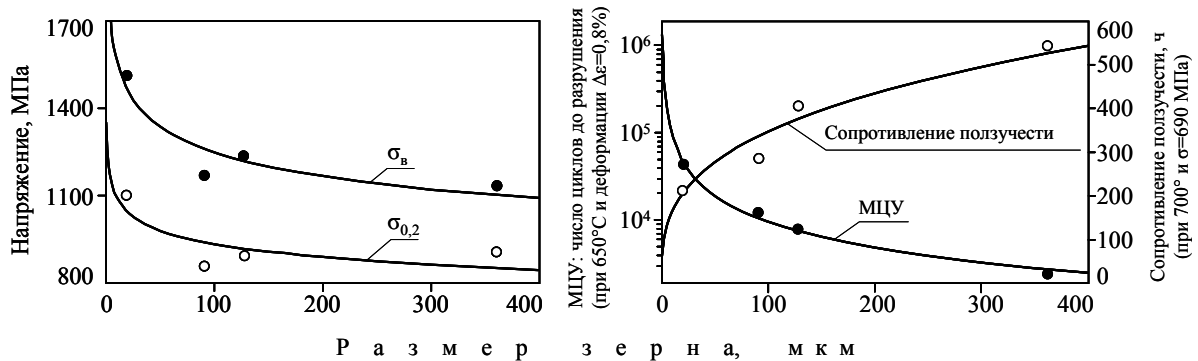


Рисунок 4. Влияние размера зерна при закалке выше и ниже температуры $T_{\text{п.р}}$ на свойства сплава Udimet 720

Температурная зависимость роста зерен носит сложный характер, зависит не только от температуры $T_{п.р}$ γ' -фазы, но и от химического и фазового состава сплава, от технологии его производства. На рис. 5 показано влияние температуры закалки (разность с температурой растворения γ' -фазы) на размер зерна и количество γ' -фазы для жаропрочного никелевого сплава NR3, близкого по легированности к сплаву ЭК151-ИД [18, 19]. Хотя зависимость такая же, как и для сплава ЭК151-ИД, видно, что рост зерен в сплаве NR3 происходит медленнее, чем в сплаве ЭК151-ИД. Аналогичные данные получены в работе [20] для гранулируемого дискового сплава ВВ751П: закалка с температуры на 10°C выше $T_{п.р}$ γ' -фазы формирует микроструктуру со средним размером зерен 35 мкм. Возможно, это связано с тем, что сплавы NR3 и ВВ751П изготавливаются методами порошковой металлургии.

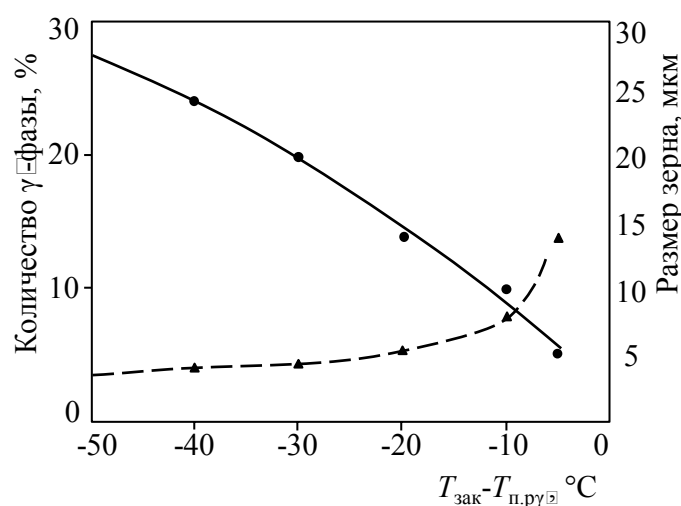


Рисунок 5. Влияние температуры закалки на количество упрочняющей γ' -фазы (—) и размер зерна (---) сплава NR3

Полученные в работе результаты показывают, что температурный интервал нагрева под закалку для сплава ЭК151-ИД должен быть сужен, перед выбором температуры закалки должна выполняться оценка микроструктуры сплава на образцах. Это позволит повысить качество продукции, увеличить стабильность свойств.

Выявлены закономерности изменения структуры и свойств от температуры закалки штамповок дисков из высоколегированного жаропрочного никелевого сплава ЭК151-ИД. Установлено, что с увеличением температуры закалки и ростом среднего размера зерна $\square 60$ мкм снижаются механические характеристики, отдельные значения которых находятся на нижней границе норм технических условий. Наиболее оптимальной для получения высокой прочности и пластичности (при сохранении жаропрочности)

является закалка в более узком температурном интервале, формирующая мелкозернистую структуру с размером зерен 20–50 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 19–36.
2. Овсепян С.В., Ломберг Б.С., Бакрадзе М.М., Летников М.Н. Термическая обработка деформируемых жаропрочных никелевых сплавов для дисков ГТД //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. Спец. выпуск. С. 122–130.
3. Ломберг Б.С., Бакрадзе М.М., Чабина Е.Б., Филонова Е.В. Взаимосвязь структуры и свойств высокожаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 25–30.
4. Reed R.C. /In: The Superalloys Fundamentals and Applications. 2006. 388 с.
5. Gabb T.P., Telesman J., Kantzos P.T., O'Connor K. Characterization of the Temperature Capabilities of Advanced Disk Alloy ME3 /NASA TM–2002-211796. August. 2002. (Электронная версия).
6. Sharpe H.J., Saxena A. Effect of Microstructure on High-Temperature Mechanical Behavior of Nickel-Base Superalloys for Turbine Disc Applications //Advanced Materials Research. 2011. V. 278. P. 259–264.
7. Gayda J. Alloy 10: A 1300F Disk Alloy /NASA TM–2000-210358. August. 2000. (Электронная версия).
8. Gabb T.P., Gayda J., Kantzos P. The Grain Size-Temperature Response of Advanced Nickel-Base Disk Superalloys During Solution Heat Treatments /NASA TM–2007-214912. December 2007. (Электронная версия).
9. Gabb T.P., Gayda J., Telesman J., Kantzos P. Realistic Subscale Evaluations of the Mechanical Properties of Advanced Disk Superalloys /NASA TM–2003-212086. January. 2003. (Электронная версия).
10. Method of Controlling and Refining Final Grain Size in Supersolvus Heat Treated Nickel-Base Superalloy: pat. 20090000706 US; заявл. 17.05.2005; опубл. 26.05.2009.
11. Method of Controlling Grain Size in Forget Precipitation-Strengthened Alloys and Components Formed Thereby: pat. 20120282106 US; заявл. 05.05.2011; опубл. 08.11.2012.
12. Local Heat Treatment for Improved Fatigue Resistance in Turbine Components: pat. 7553384 US; заявл. 25.01.2006; опубл. 30.06.2009.

13. Heffernan T.M. Spin Testing of Superalloy Disks With Dual Grain Structure /NASA CR–2006-214338. May. 2006. (Электронная версия).
14. Lemsky J. Assessment of NASA Dual Microstructure Heat Treatment Method for Multiple Forging Batch Heat Treatment /NASA CR–2004-212950. February. 2004. (Электронная версия).
15. A Method of Heat Treating a Superalloy Components and An Alloy Component: pat. EP2176436 UK; заявл. 03.08.2007; опубл. 21.04.2010.
16. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Комплексная инновационная технология изотермической штамповки на воздухе в режиме сверхпластичности дисков из супержаропрочных сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 129–141.
17. Оспенникова О.Г., Бубнов М.В., Капитаненко Д.В. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 141–147.
18. Bain K.R., Gambone M.L., Hyzakand J.M., Thomas M.C. Development of Damage Tolerant Microstructures in Udimet 720 /In: Superalloys-1988. Warrendale, PA: The Metallurgical Society. 1988. P. 13–22.
19. Locq D., Marty M., Caron P. Optimisation of the Mechanical Properties of a new PM Superalloy for Disk Applications /In: Superalloys-2000. P. 395–403.
20. Волков А.М. Исследование и разработка усовершенствованной технологии термической обработки заготовок турбинных и компрессорных дисков из гранул жаропрочного никелевого сплава для ГТД нового поколения: Автореф. дис. к.т.н. М. 2013. 23 с.