

Н.В. Лопатин¹, М.В. Бубнов¹, А.М. Роголев¹, Н.В. Коробова², А.А. Сидоров²

ИЗОТЕРМИЧЕСКАЯ ШТАМПОВКА ЗАГОТОВОК ДИСКА ИЗ СПЛАВА ЭП741-НП, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Рассмотрены процесс газостатирования заготовки из сплава ЭП741-НП и влияние пластической деформации в изотермических условиях на структуру и свойства штамповки диска. Проведено компьютерное моделирование процессов газостатирования и пластической деформации, изучена кинетика изменения плотности заготовки. Проведены исследования макро- и микроструктуры заготовки диска после штамповки, а также оценка механических свойств. Установлено, что штамповка заготовок, полученных методами порошковой металлургии, способствует повышению предела текучести заготовок сплава на 10%, длительной прочности в 2 раза и пластичности на 47% по сравнению с требованиями ТУ.

Ключевые слова: никелевый сплав ЭП741-НП, газостатирование, штамповка, математическое моделирование.

Hot isostatic pressing of EP741-NP alloy billet and an effect of plastic deformation under isothermal conditions on structure and properties of the forged disc were considered. A computer simulation of hot isostatic pressing and plastic deformation processes was carried out to study kinetics of density evolution in the billet. Analysis of macro- and microstructure of the forged disc billet was carried out and its mechanical properties were estimated. It was stated that forging of billets produced by powder metallurgy methods promotes an improvement of yield strength and ductility of billets by 10% and 47% respectively, rupture strength was increased 2 times as compared to the values stated in Specifications.

Keywords: EP741-NP nickel-based superalloy, hot isostatic pressing, forging, computer simulation.

¹Федеральное 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

²Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
[Moscow State Technological University «STANKIN»] E-mail: rector@stankin.ru

Введение

Никелевые жаропрочные сплавы широко применяются в отечественном двигателестроении в качестве материалов для дисков турбины газотурбинных двигателей (ГТД). В настоящее время диски турбины ГТД изготавливаются из деформируемых жаропрочных никелевых сплавов [1–11], а также с применением гранулированных сплавов [12–17]. Ограниченная технологическая пластичность жаропрочных никелевых сплавов обуславливает необходимость применения гранул для изготовления роторных деталей ответственного назначения типа дисков и валов. Высокая скорость охлаждения гранул при кристаллизации позволяет получить высокую микрооднородность химического состава никелевого сплава. Однако особенности границ зерен спеченных гранул оказывают негативное влияние на эксплуатационные свойства изделий, в частности увеличивается интервал значений характеристик при испытаниях на малоцикловую и многоцикловую усталость, длительную прочность [16]. С одной стороны, в работах [15, 16] показано положительное влияние пластической деформации на эксплуатационные свойства дисков из заготовок, полученных с применением технологий металлургии гранул, с дру-

гой – исследователи утверждают, что с увеличением степени деформации плотность компактного материала снижается, т. е. в результате деформации ослабляется связь между гранулами, вследствие чего образуются поры и происходит дальнейшее разрушение материала [14].

В связи с тем, что существуют противоречия между литературными данными о влиянии пластической деформации на качество деталей ответственного назначения, проведены теоретические и экспериментальные исследования структуры и свойств заготовок из сплава ЭП741-НП после газостатирования и пластической деформации.

Материалы и методы

Одним из широко применяемых сплавов для изготовления дисков в отечественном двигателестроении является сплав ЭП741-НП, который выбран в качестве материала для исследования. Деформацию проводили на предварительно спеченных заготовках диаметром 140 мм и высотой 110 мм, изготовленных с применением газостатирования (рис. 1). Для изготовления заготовки использованы гранулы сплава ЭП741-НП (размер фракции 140±50 мкм). Химический состав заготовок из сплава ЭП741-НП, изготовленных на пред-

Таблица 1

Химический состав заготовок из сплава ЭП741-НП

Содержание элементов, % (по массе)									
C	Cr	Co	Mo	Ni	W	Al	Ti	Nb	Hf
0,04	9,0	15,75	3,85	56,31	5,35	5,05	1,8	2,6	0,25

приятии ОАО «ВИЛС» по стандартной технологии, приведен в табл. 1.

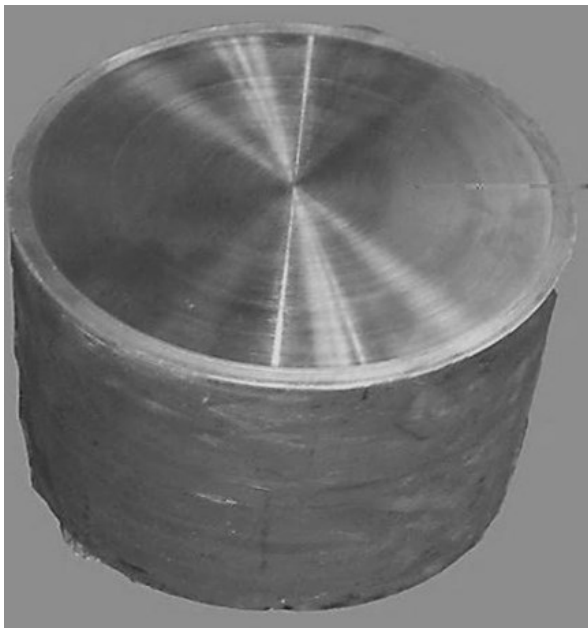


Рис. 1. Внешний вид заготовки после газостатирования

Для изучения влияния деформации на структуру и свойства заготовки из сплава ЭП741-НП при ее изготовлении методом ГИП (по стандартному режиму) и последующей деформации, проведено математическое моделирование технологического процесса изготовления. Решение задачи пластического течения было выполнено с использованием уравнений, описывающих механику деформации некомпактных пористых тел, на компьютере с применением программы Deform2D и разработанных процессорных пользовательских процедур на языке Fortran.

Математическое моделирование пластического течения и изменения напряженно-деформированного состояния некомпактного пористого материала осуществляется при помощи континуальной модели материала:

$$F = AJ_2' + BJ_1^2 = Y_R^2 = (\delta Y_0)^2, \quad (1)$$

где A , B и δ – функции пористости (коэффициенты уравнения, зависящие от плотности некомпактного материала); Y_R – напряжение текучести некомпактного материала; Y_0 – напряжение текучести полностью консолидированного материала; J_2' – второй инвариант девиатора напряжений; J_1 – первый инвариант тензора напряжений; $\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \frac{J_1}{3}$ – девиатор напряжений; δ_{ij} – символ Кронекера; σ_{ij} – тензор напряжений.

Определение функций пористости выполнено с применением уравнения Доравелю и других [15]. Уравнения (2–4) описывают изменение поверхности пластического течения в зависимости от плотности некомпактного материала при пластической деформации:

$$A = 2(1 + \nu), \quad (2)$$

где $\nu = aR^3 + bR^2 + cR + d$ – условный (для некомпактных материалов) коэффициент Пуассона; a , b , c и d – коэффициенты аппроксимирующих полиномов.

В случае полной консолидации некомпактного материала уравнение (1) преобразуется в классическое уравнение пластичности Губера–Мизеса. Таким образом, параметр $B = (3 - A)/3$:

$$\delta = hR^3 + kR^2 + gR + q, \quad (3)$$

где R – относительная плотность некомпактного материала; h , k , g и q – коэффициенты аппроксимирующих полиномов.

Относительная плотность сжимаемого материала рассчитывается по формуле

$$R = R_0 \exp(-\Delta \epsilon_V), \quad (4)$$

где R_0 – начальная относительная плотность некомпактного материала; $\Delta \epsilon_V$ – изменение величины объемной деформации некомпактного материала.

Расчет процесса изготовления заготовки диска из сплава ЭП741-НП проводили в соответствии с технологическими особенностями процессов газостатирования (ОАО «ВИЛС») и пластической деформации в изотермических условиях (ВИАМ) на прессах с усилием 630 и 1600 тс. При моделировании технологического цикла разделен на последовательность операций: нагрев заготовки до температуры деформации (газостатирования), перенос заготовки и установка в штамп (в случае расчета газостатирования перенос заготовки в газостат не учитывался), пластическая деформация и охлаждение на воздухе. Математическая модель трения при деформации некомпактного материала построена на основе уравнения гибридного закона трения, сочетающего две модели трения: Амантона–Кулона и Прандтля–Зибеля. Реологическая модель некомпактного материала построена по результатам экспериментов при осадке заготовок диаметром 15 мм и высотой 20 мм в интервале температур от 900 до 1250°C и при скорости деформации от 0,001 до 1 с⁻¹.

Экспериментальные исследования по влиянию деформации на плотность предварительно спеченной заготовки из сплава ЭП741-НП проводили на прессах с усилием 630 и 1600 тс с применением

установок УИДИН 500 и УИДИН 250 и штамповой оснастки для изотермической деформации.

Исследование микроструктуры проводили на образцах, вырезанных из центральной зоны заготовки и зоны, прилегающей к внешней боковой поверхности осажденной заготовки. Шлифовку образцов проводили с применением наждачной бумаги зернистостью от 100 до 1500. Выявление зеренной микроструктуры проводили с использованием электрополировки и химического травления. Электрополировку проводили с применением реактива состава: 150 мл метиловый спирт + 50 мл H_2SO_4 + 25 мл глицерин, по режиму: напряжение 60 В, плотность тока 1,5–2,5 А/см², продолжительность 1–2 с при 20°C. Химическое травление проводили (ватным тампоном) с применением реактива состава: 100 мл HCl + 20 г $CuSO_4$ + 100 мл этилового спирта, по режиму: продолжительность 90 с при 20°C.

Структуру исследовали на оптическом микроскопе МИМ-8М.

Результаты и обсуждение

Анализ напряженного состояния и пористости при газостатировании и пластической деформации заготовок из сплава ЭП741-НП

Заготовки, полученные методом ГИП, характеризуются наличием остаточной пористости, вели-

чина которой зависит от геометрической формы капсулы, режимов нагрева, давления и продолжительности выдержки в газостате [16]. Теоретические исследования в области пластической деформации некомпактных материалов показывают, что распределение плотности в материале после пластической деформации зависит от особенностей его пластического течения и величины среднего нормального давления [18]. Механические свойства дисков зависят от плотности материала после ГИП [12]. С целью оценки плотности заготовки после ГИП и пластической деформации проведены расчеты математических моделей методами конечных элементов.

Распределение плотности в заготовках после ГИП и деформации показано на рис. 2. Видно, что распределение плотности в заготовке после газостатирования неоднородно. На периферии заготовки относительная плотность составляет 0,990 (99%), в центральной части заготовки плотность составляет 0,974 от плотности компактного материала. Характер пластической деформации, происходящей в материале после ГИП, приводит к увеличению плотности деформированной заготовки в центральной части до величины плотности компактной заготовки. В области периферии заготовки плотность снижается до 0,979 (97,9%).

Кинетика изменения плотности для точек, расположенных в центре заготовки и на периферии, приведена на рис. 3. Показано, что плотность за-

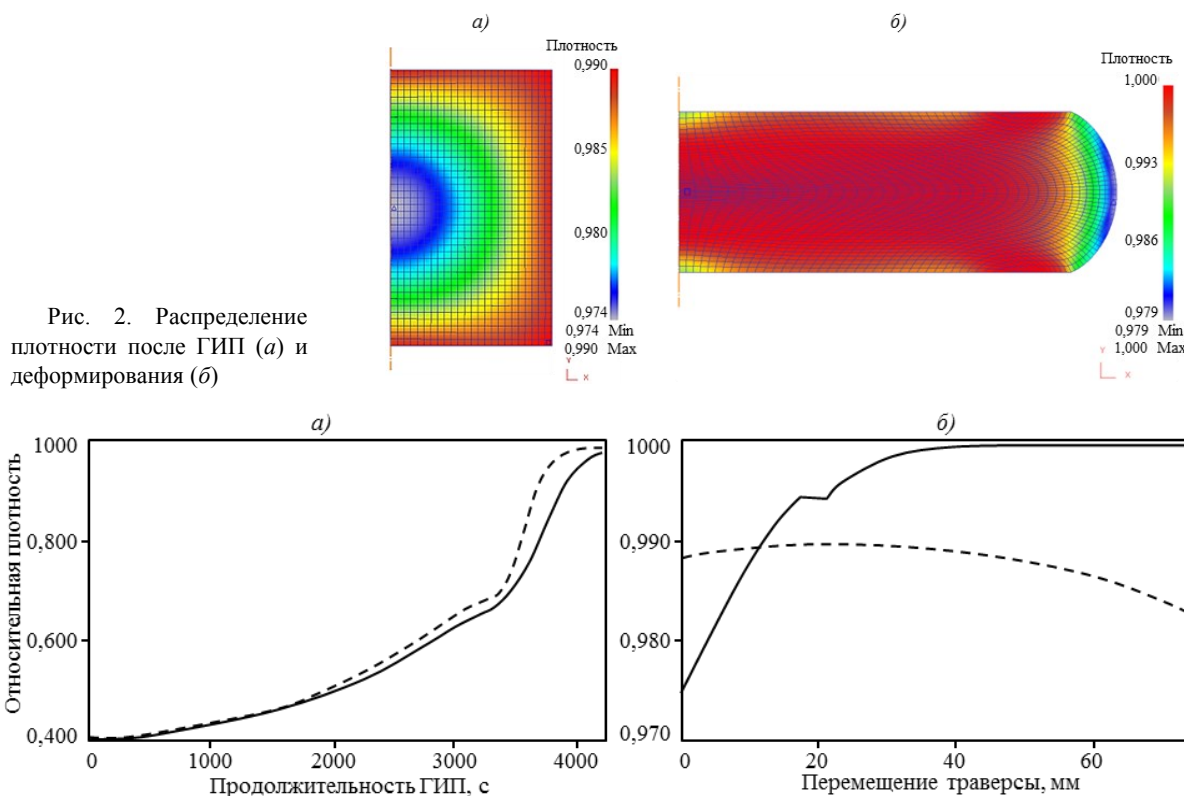


Рис. 2. Распределение плотности после ГИП (а) и деформирования (б)

Рис. 3. Кинетика изменения плотности в точках, расположенных в центре (---) и на периферии заготовки (—), при ГИП (а) и в процессе деформирования (б)

готовки при газостатировании плавно увеличивается с ростом температуры и давления в газостате. Максимальная скорость увеличения плотности наблюдается при приближении давления в газостате к напряжению течения гранул сплава ЭП741-НП в режиме ползучести. При этом градиент температур, характерный для процесса нагрева заготовки, приводит к формированию разницы между значениями плотности в центральной точке и на периферии заготовки в процессе ГИП (см. рис. 3, а). Установлено, что значения плотности в центральной точке заготовки при пластической деформации плавно увеличиваются при повышении нагрузки при деформации на прессе. На периферии заготовки наблюдается снижение плотности, что связано с особенностями напряженного состояния на периферии образца (см. рис. 3, б).

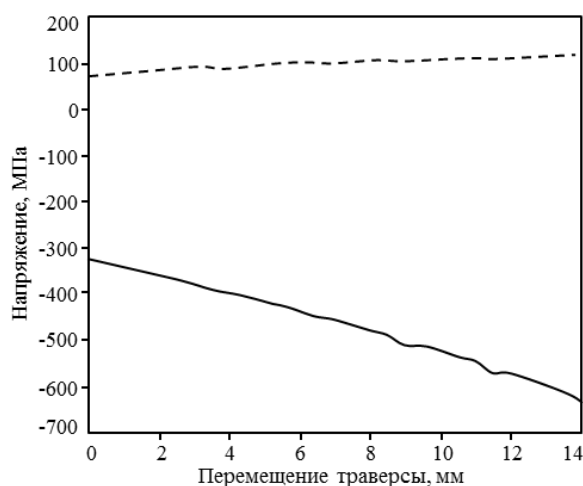


Рис. 4. Кинетика изменения среднего нормального давления на последнем переходе деформирования в точках, расположенных в центре (—) и на периферии заготовки (- -)

С целью оценки влияния напряженного состояния на кинетику изменения плотности материала проведен расчет изменения среднего нормального давления при деформации (рис. 4). Видно, что кинетика изменения плотности заготовки на периферии хорошо коррелирует с кинетикой изменения среднего нормального давления. Увеличение среднего нормального давления и его положительное значение на периферии заготовки свидетельствуют о тенденции к растяжению в этой области и, соответственно, к уменьшению относительной плотности материала. Уменьшение среднего нормального напряжения и его отрицательное значение в центре характеризуют тенденцию к сжатию и увеличению плотности материала.

Анализ микроструктурного состояния и свойств заготовок из сплава ЭП741-НП после газостатирования и пластической деформации

Микроструктура образцов, вырезанных из центральной части заготовки, в состоянии поставки представлена на рис. 5. Видно, что размер зерен матрицы (γ -фазы) соответствует размерам гранул, используемых при газостатировании. По границам бывших гранул наблюдаются выделения γ' -фазы размером $\sim 5\text{--}10$ мкм. Выделившаяся по границам бывших гранул γ' -фаза сфероидизирована и разделена материалом матрицы. Внутри бывших гранул распределение γ' -фазы было равномерным, размер γ' -фазы составлял ~ 2 мкм. На микроструктуре заготовки видны отдельные поры размером >1 мкм, объемная доля которых составляет $<0,02 \pm 0,02$ ($2 \pm 2\%$) (см. рис. 5, а). Объемная доля пор в образцах, вырезанных из периферии заготовки, составила $0,03 \pm 0,02$ ($3 \pm 2\%$). Сопоставление полученных результатов с результатами расчета плотности в заготовках после ГИП пока-

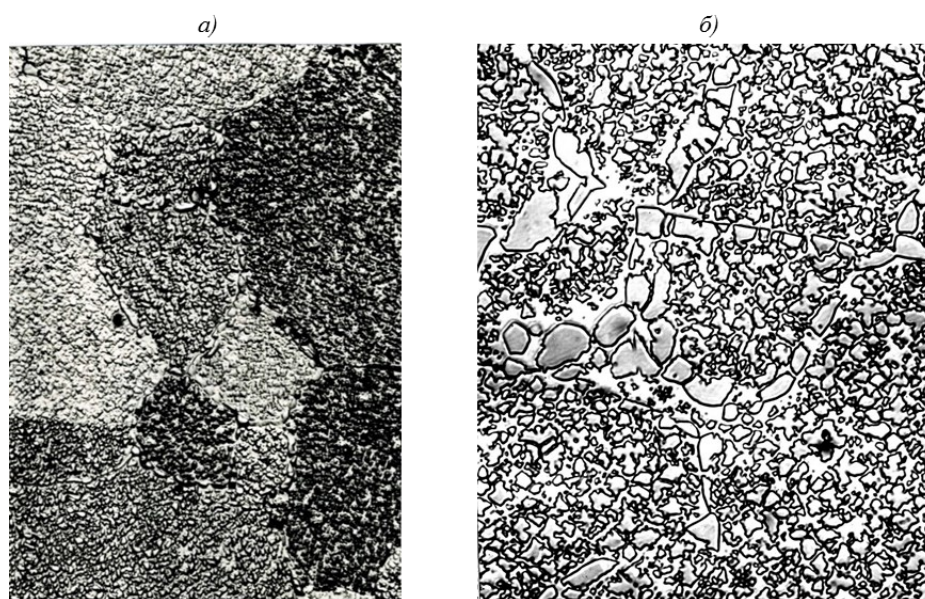


Рис. 5. Микроструктура (а — $\times 500$, б — $\times 1000$) заготовки из сплава ЭП741-НП после газостатирования по стандартному режиму

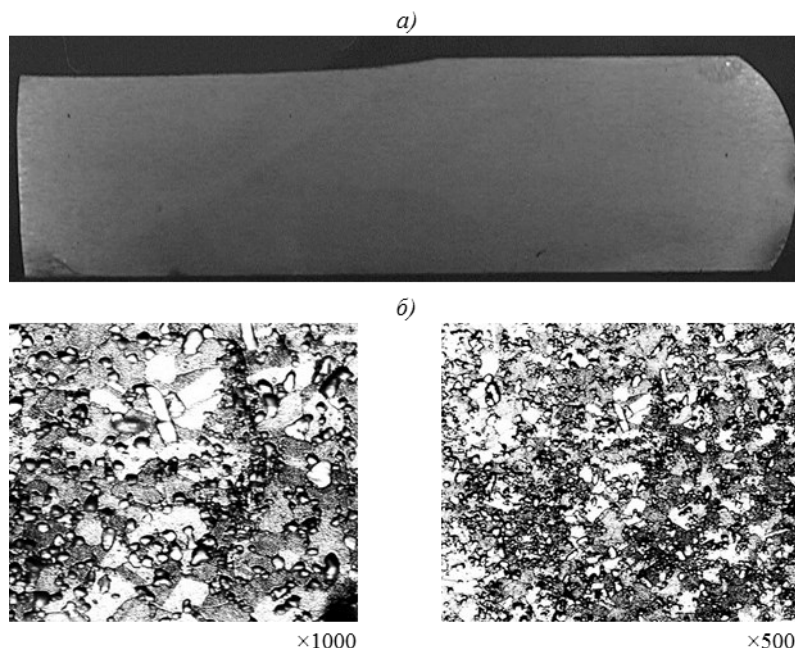


Рис. 6. Макро- (а) и микроструктура (б) заготовки из сплава ЭП741-НП после деформации

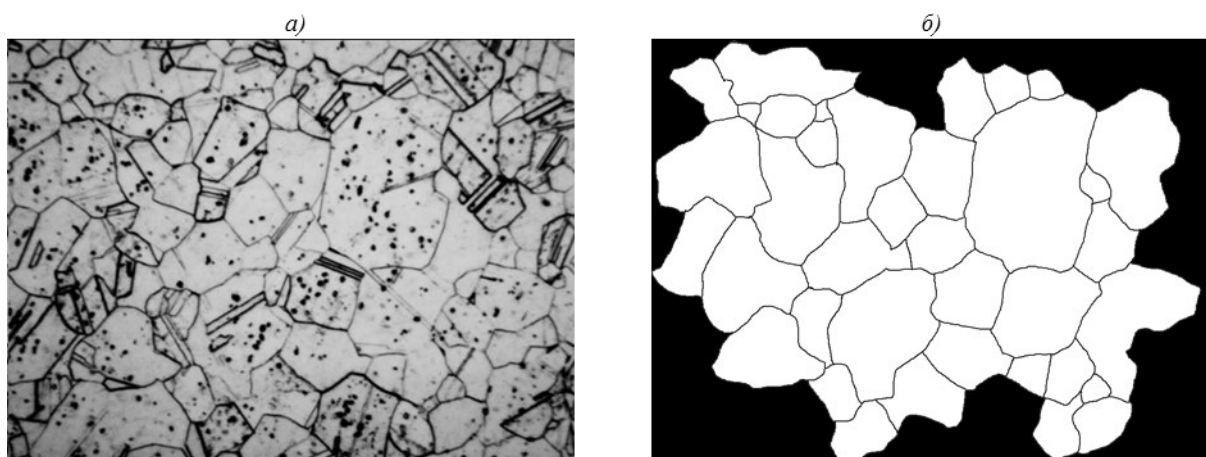


Рис. 7. Микроструктура (а) и схема расположения зерен (б) в экспериментальных малоразмерных заготовках дисков после стандартного режима термической обработки

зало высокую точность результатов компьютерного моделирования. Следует отметить, что ошибка при измерении плотности методом металлографического анализа не позволяет провести количественную оценку теоретических результатов.

Макроструктуры заготовки после деформации представлены на рис. 6. Видно, что после деформации макроструктура однородная, мелкозернистая, области локализованного пластического течения и застойные зоны, характерные для деформированных никелевых сплавов, не обнаружены. Отметим, что на периферии заготовки видны единичные поры размером $>0,1$ мм. В центральной зоне пор не обнаружено.

Анализ микроструктуры деформированной заготовки показал, что при деформации прошла динамическая рекристаллизация зерен γ -фазы. Средний размер зерен γ -фазы составляет 12 мкм.

На микроструктуре бывшие гранулы не идентифицируются, распределение γ' -фазы однородное. Средний размер зерна γ' -фазы составляет 5 мкм. Анализ микроструктуры образцов, вырезанных из периферии заготовки, показал, что структура частично рекристаллизованная, распределение зерен γ -фазы имеет бимодальный характер, средний размер зерна составляет 50 мкм. На образце, вырезанном из области, расположенной на поверхности деформированной заготовки, видны следы разрушения по границам зерен. Сопоставление результатов экспериментального исследования с результатами математического моделирования подтверждает снижение плотности на периферии заготовки.

Для оценки уровня механических свойств проведена термическая обработка заготовки диска по стандартному режиму. Микроструктура заготовки

Таблица 2

**Механические свойства экспериментальных образцов из сплава ЭП741-НП
после стандартной термической обработки**

Условный номер образца	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	Длительная прочность при 650°C (гладкие образцы)	
	МПа		%		σ , МПа	τ , ч
1	1387	980	26,6	24,7	999,6	200 (снят до разрушения)
2	1383	966	25,8	24,7	999,6	200 (снят до разрушения)
По ТУ для дисков после ГИП (без деформации)	≥ 1352	≥ 882	≥ 17	≥ 19	≥ 980	≥ 100

после термической обработки представлена на рис. 7. Средний размер зерна увеличился с 10 (в состоянии после деформации) до 104,90 мкм (3–4 балл зерна по ГОСТ 5639–65). Эти значения более чем в 1,5 раза превышают размер зерна в заготовках из сплава ЭП741-НП после ГИП без деформации, термообработанных по аналогичному режиму [14].

Механические свойства экспериментальных образцов из сплава ЭП741-НП после стандартной термической обработки приведены в табл. 2. По результатам испытаний образцов после стандартной термической обработки видно, что пластическая деформация заготовок из сплава ЭП741-НП, изготовленных методом металлургии гранул, позволяет повысить предел текучести заготовок сплава на 10%, длительную прочность – в 2 раза, пластичность – на 47% по сравнению с требованиями ТУ.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что:

– распределение плотности в заготовке после газостатирования неоднородно. На периферии заготовки из сплава ЭП741-НП относительная плотность составляет 0,990 (99%). В центральной части заготовки плотность составила 0,974 от плотности компактного материала;

– пластическая деформация приводит к увеличению плотности деформированной заготовки в центральной части до величины плотности компактной заготовки. В области периферии вследствие значительного влияния растягивающих напряжений плотность снижается до 0,979 (97,9%);

– пластическая деформация заготовок из сплава ЭП741-НП, изготовленных методом металлургии гранул, позволяет повысить предел текучести заготовок сплава на 10%, длительную прочность – в 2 раза, пластичность – на 47% по сравнению с требованиями ТУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. 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.
3. Оспенникова О.Г., Бубнов М.В., Капитаненко Д.В. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 141–147.
4. Каблов Е.Н., Морозов Г.А., Крутиков В.Н., Муравская Н.П. Аттестация стандартных образцов состава сложнелегированных сплавов с применением эталона //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 9–11.
5. Ломберг Б.С., Разуваев Е.И., Моисеев Н.В., Пономаренко Д.А. Изотермическая штамповка труднодеформируемых жаропрочных никелевых сплавов //Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2013. №5. С. 26–29.
6. Пономаренко Д.А., Моисеев Н.В., Скугорев А.В. Эффективная технология изготовления деформированных заготовок дисков ГТД из жаропрочных никелевых сплавов //Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2010. №1. С. 13–16.
7. Ломберг Б.С., Бубнов М.В., Бакрадзе М.М., Арбина В.П. Изготовление штамповок дисков ГТД из сплава ВЖ175. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2013. №9. С. 21–23.
8. Пономаренко Д.А., Моисеев Н.В., Скугорев А.В. Штамповка дисков ГТД из жаропрочных сплавов на изотермических прессах //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 13–16.
9. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 36–52.
10. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Елютин Е.С. Монокристаллические жаропрочные сплавы для газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 38–52.

11. Каблов Е.Н., Бунтушкин В.П., Поварова К.Б., Базылева О.А., Морозова Г.И., Казанская Н.К. Малолегированные легкие жаропрочные высокотемпературные материалы на основе интерметаллида Ni_3Al //Металлы. 1999. №1. С. 58–65.
12. Катуков С.А., Дарьин В.В. Исследование диска I ступени турбины высокого давления двигателя ПС-90А после наработки сверх назначенного ресурса //Технология легких сплавов. 2012. №1. С. 51–56.
13. Гарибов Г.С., Гриц Н.М., Востриков А.В., Федоренко Е.А., Егоров Д.А. Повышение характеристик прочности и сопротивления МЦУ гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов за счет снижения крупности гранул //Технология легких сплавов. 2012. №3. С. 56–63.
14. Ларкин В.А. Влияние пластической деформации на структуру и свойства заготовок дисков из порошкового жаропрочного никелевого сплава ЭП741-НП //Технология металлов. 2011. №9. С. 33–35.
15. Поклад В.А., Гейкин В.А., Самойлов О.И., Бурлаков И.А., Онищенко А.К. Пути повышения ресурса гранульных дисков ГТД из сплава ЭП741-НП //Заготовительные производства в машиностроении. 2010. №5. С. 20–22.
16. Гарибов Г.С., Гриц Н.М., Востриков А.В., Федоренко Е.А. Эволюция технологии, структуры и механических свойств гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов, изготовленных методом ГИП //Технология легких сплавов. 2010. №3. С. 31–35.
17. Бубнов М.В., Складенко В.Г. Формирование регламентированной структуры при деформации гранулированного сплава ЭП741-НП //Технология легких сплавов. 2007. №2. С. 54–55.
18. Doraivelu S.M., Gegel H.L., Gunasekera J.S., Malas J.C., Morgan J.T., Thomas J.F. A new yield function for compressible P/M materials //Int. J. Mech. Sci. 1984. V. 26. P. 527–535.