

УДК 669.018:669.245

Е.И. Разуваев¹, М.В. Бубнов¹, М.М. Бакрадзе¹, С.А. Сидоров¹**ГИП И ДЕФОРМАЦИЯ ГРАНУЛИРОВАННЫХ
ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-80-86

Представлена информация о развитии и применении технологического процесса изготовления дисков и других деталей авиационных ГТД из жаропрочных труднодеформируемых никелевых гетерофазных сплавов с использованием порошковой (гранульной) металлургии.

Рассмотрено влияние различных технологических факторов на формирование структуры, технологические и служебные характеристики изделий, изготовленных из гранулированных отечественных и зарубежных сплавов. Показано определяющее влияние структуры на свойства изделий, компактированных методом горячего изостатического прессования (ГИП).

Результаты исследования качества заготовок, изготовленных из гранул сплава ЭП741НП, проведенного авторами, подтверждают целесообразность применения комплексной технологии, включающей операции ГИП и последующую горячую пластическую деформацию с преобладанием сдвигового механизма, которая обеспечивает повышение уровня и стабильности служебных характеристик изделия.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы, гранулы, технологический процесс, горячее изостатическое прессование, горячая пластическая деформация, диски газотурбинных двигателей.

The article presents information about development and application of technological process of manufacturing discs and other aviation gas turbine engines parts from difficult-to-form heterogeneous nickel-based superalloys using powder (granules) metallurgy.

The article describes influence of different technological factors on structure formation, technological and service characteristics of products made from domestic and foreign nickel-based superalloy powder. Decisive influence of structure on properties of products compacted by the hot isostatic pressing (HIP) is presented.

The results of EP741NP superalloy powder particles quality examination confirm expedience of complex technology including HIP followed by hot forming with prevailing shear movement which enhance performance properties and stability of the product performance characteristics.

Keywords: heat resistant nickel alloys, granules, technological process, hot isostatic pressing, hot plastic deformation, disks of gas-turbine engines.

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

Введение

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10.2. «Изотермическая деформация на воздухе нового поколения гетерофазных труднодеформируемых жаропрочных сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Усложнение химического и фазового состава жаропрочных никелевых сплавов с целью достижения более высоких служебных характеристик вызывает значительные трудности при изготовлении из таких композиций деформированных заготовок дисков и других деталей с применением традиционных технологий [2].

Присутствие в структуре большого количества мелкодисперсных частиц упрочняющих фаз, сохраняющих термостабильность при температурах, близких к температуре солидуса, способствует

резкому снижению технологической пластичности сплавов. В структуре сплавов, применяемых для дисков ГТД нового поколения, содержание основной упрочняющей γ' -фазы составляет 50–60% [3]. Высокая температура растворения γ' -фазы резко ограничивает температурный интервал деформации сплавов в состоянии однородного твердого раствора – особенно в условиях контакта деформируемой заготовки с менее нагретым инструментом. Выделение при этом мелкодисперсных частиц γ' -фазы из пересыщенного твердого раствора вызывает охрупчивание сплава и повышает чувствительность к скорости деформации [4]. Склонность высоко- и сложнoleгированных сплавов к образованию ликвационной неоднородности ограничивает возможность выплавки бездефектных слитков диаметром более 350–400 мм, что значительно усложняет процесс изготовления крупных дисков.

Возникшие трудности явились стимулирующим фактором разработки новых эффективных технологий изготовления горячедеформированных заготовок дисков и других деталей из гетерофазных труднодеформируемых сплавов. Важным достижением в развитии таких технологий явилась разработка процессов термомеханической обработки сплавов, обеспечивающих формирование регламентированной мелкозернистой структуры с оптимальной морфологией частиц упрочняющей γ' -фазы, которая проявляет высокую технологическую пластичность и сверхпластичность при деформации в гетерофазном состоянии [5, 6]. Впервые такой процесс нашел практическое применение при изготовлении деформированных лопаток ГТД из сплава ЖС6-КП, являющегося по химическому и фазовому составу аналогом литейной композиции. Дальнейшее развитие и промышленное применение новая технология получила при изготовлении дисков из сплавов ЭП741, ЭП742, ЭП975, ЭК79 и ЭК151 [7, 8]. Специализированные прессы с регулируемой скоростью рабочего хода и высокотемпературный нагрев штамповой оснастки обеспечивают осуществление процесса деформации по заданной программе в изотермических условиях при оптимальных температурно-скоростных и деформационных параметрах [9] (рис. 1). Известны аналогичные разработки ряда зарубежных фирм [10].



Рис. 1. Специализированный гидравлический пресс с усилием 1600 тс с регулируемой скоростью рабочего хода

Другим направлением, получившим широкое развитие в зарубежной и отечественной практике изготовления дисков из труднодеформируемых никелевых сплавов, является процесс с приме-

нием порошковой (гранульной) металлургии. Процесс основан на твердофазном соединении (компактировании) частиц (гранул), представляющих собой микрослитки. В качестве основного способа компактирования применяется горячее изостатическое прессование (ГИП).

Ограниченный объем расплавленного металла и высокая скорость охлаждения обеспечивают формирование в гранулах однородной мелкозернистой структуры и отсутствие ликвационной неоднородности в отличие от крупных слитков. Это позволяет изготавливать диски крупных размеров и сложной формы с однородной по химическому составу и размерам зерна структурой. Превращение литой структуры гранул в рекристаллизованную в процессе компактирования ГИП зависит от температуры, давления и выдержки под давлением. Использование для компактирования гранул с герметичной оболочкой (капсулы), имеющей форму и размеры, максимально приближенные к окончательному изделию, позволяет изготавливать экономичные заготовки деталей сложной формы. Однако при определении формы и размеров капсул необходимо учитывать величину уплотнения (усадки) гранул в каждом конструктивном элементе в процессе ГИП. Для достижения высокой точности заготовки возможно также применение калибровки в штампе, которая наряду с устранением дефектов формы и размеров способствует повышению свойств детали.

Важной особенностью применения ГИП является возможность изготовления изделий с конструктивными элементами из гранул разного химического состава с получением неразъемного соединения в результате сварки давлением или применения расплавляемой прокладки.

Начиная с 70-х годов прошлого века диски и другие детали из гранулированных жаропрочных никелевых сплавов находят широкое применение в зарубежных и отечественных ГТД.

Состояние проблемы

В 1971 г. фирма Pratt & Whitney использовала диски из гранулированного сплава IN100 в двигателе F-100-PW, а в 1977 г. – из сплава Астролой в двигателе JT8D [11–14].

В 1978 г. диски из гранулированного сплава Rene 95, изготовленного с помощью ГИП, были применены фирмой General Electric в двигателях F101 и T-700 [15, 16], а с применением деформации после ГИП – в двигателях F404 и CFM 56-3 [17]. Начиная с 1979 г. диски из гранулированных сплавов используются в двух вариантах: после ГИП и с последующей горячей пластической деформацией [12]. По данным авторов работ [18, 19] в 1995 г. процесс изготовления зарубежными фирмами ~90% дисков для авиационных ГТД из гранул жаропрочных никелевых сплавов включал изотермическую штамповку заготовки, подверг-

нутой прессованию (экструзированию) после ГИП. Авторы работ [19–23] отмечают, что применение дисков из гранул, изготовленных ГИП без последующей деформации, крайне ограничено.

Необходимость применения последующей деформации после ГИП деформации подтвердили результаты исследования причин преждевременного разрушения дисков из сплава Rene 95 на двигателе F404 фирмы General Electric в 1980 г. [24]. Более высокие эксплуатационные свойства дисков, изготавливаемых ГИП с применением последующей деформации, показаны в работах [11, 17, 24]. Одновременно было предложено ограничить размер гранул 100 мкм вместо 250 мкм.

Базовый процесс изготовления дисков из гранулированных никелевых сплавов, применяемый зарубежными фирмами, включает операцию прессования (экструзирования) компактированной ГИП заготовки и окончательную штамповку [20–22]. Компактированная ГИП заготовка Ø427 мм подвергается прессованию на пруток диаметром 165–230 мм. Последующая штамповка мерных заготовок осуществляется на гидравлических прессах (табл. 1) в изотермических условиях или в горячих штампах, нагретых на 200–400°C ниже температуры заготовки [25]. Ультрамелкозернистая структура позволяет осуществлять сверхпластическую деформацию сплавов [10, 20, 26].

В процессе освоения гранульной технологии выявлено влияние целого ряда технологических факторов на качество изделий. Доказано, что, наряду с температурой, давлением и продолжительностью выдержки под давлением, большое влияние на развитие диффузионных процессов и, соответственно, на прочность межгранульных связей и формирование структуры изделий оказывают состояние поверхности и размеры гранул, наличие неметаллических примесей и др.

Процесс изготовления гранул сопровождается загрязнением их неметаллическими включениями в виде частиц шлака, возгонов, оксидов, керамики, затрудняющих межгранульный контакт при компактировании. Присутствие газонасыщенного слоя и оксидной пленки также способствует повышенному содержанию неметаллических включений в структуре, затрудняет диффузионный процесс соединения гранул при ГИП и последующих

операциях деформации и термической обработки.

Присутствие обособленных гранул в структуре изделий, изготавливаемых ГИП, обусловлено барьерным эффектом таких включений. Показано [27], что количество обособленных гранул в первую очередь зависит от количества карбидов, поэтому возникла необходимость ограничения содержания углерода в гранулируемых сплавах. Образование сетки карбидов на наследственных границах гранул способствует снижению ударной вязкости и других свойств.

Существенным дефектом изделий, изготавливаемых ГИП, является наличие внутригранульной пористости, которая способствует образованию рассеяной пористости в изделии.

Особенностью процесса ГИП является осуществление компактирования гранул в условиях приложения гидростатического давления при крайне ограниченной величине внутригранульной сдвиговой деформации и межгранульного проскальзывания. Давление при ГИП, соизмеримое с сопротивлением деформации материала гранул, передается пластичной оболочкой (капсулой) при длительной выдержке. При этом уплотнение и закрытие пор в основном происходит по механизму ползучести. Такая схема обеспечивает уплотнение и сближение контактных поверхностей гранул, способствуя активизации диффузионных процессов. Однако ограничение величины сдвиговой деформации и отсутствие значительного межгранульного проскальзывания исключают возможность интенсивного обновления контактных поверхностей, более полного устранения пористости, снижают эффективность диффузионных процессов на границах зерен и динамической рекристаллизации.

Прессование является наиболее эффективным процессом деформации малопластичной компактированной ГИП заготовки, обеспечивающим достижение большой степени деформации (до 70–80%) с преобладанием сдвигового механизма и формирование регламентированной мелкозернистой структуры, проявляющей сверхпластичность ($\delta=600\text{--}800\%$) при последующей изотермической штамповке.

Вместе с тем значительный практический интерес представляет процесс изготовления деформированных изделий из компактированной ГИП заготовки с применением операции осадки и объ-

Таблица 1

Характеристика вакуумно-штамповочного оборудования ведущих фирм США для производства дисков из никелевых сплавов

Фирма	Усилие пресса, МН	Диаметр изделия, мм	Масса изделия, кг	Год освоения
Wyman-Gordon	18	460	70	1970
	30	610	140	1980
	80	915	340	1983
Pratt & Whitney	16,5	460	70	1970
	30	610	140	1975
	80	900	340	1982
Ledish	40	700	360	1972
	100	1220	450	1975

мною штамповки – например, при изготовлении крупных дисков.

Основной причиной, сдерживающей применение такого процесса, является низкая технологическая пластичность металла после компактирования с помощью ГИП, обусловленная наличием микропористости, слабыми межгранульными связями, а также выделением в процессе деформации мелкодисперсных частиц γ' -фазы на границах зерен. Низкая технологическая пластичность при испытании на осадку в интервале температур 1000–1150°C компактированных с помощью ГИП сплавов марок ЭП741П, ЭП741НП, ЭП962П и ЭП975П отмечена авторами работ [28–31]. Развитие внутренней пористости при осадке начинается на ранней стадии деформации и особенно при достижении деформации более 15–20%, достигая 15% и более [30, 31].

Опыт изготовления деформированных заготовок дисков и других деталей из малопластичных гетерофазных никелевых сплавов, изготовленных по слитковой технологии, показал возможность повышения технологической пластичности таких композиций в результате термомеханической обработки, обеспечивающей формирование мелкозернистой структуры с оптимальной морфологией частиц γ' -фазы. Поэтому целью данного исследования явилась разработка процесса термомеханической обработки компактированной ГИП заготовки, обеспечивающей формирование структуры, проявляющей достаточно высокую пластичность и исключая развитие дефектов (пористости и трещин) при деформации.

Материалы и методы

В работе использовались компактированные ГИП заготовки из сплава ЭП741НП, содержащего 54,3% γ' -фазы с температурой полного растворения $T_{п.р\gamma'}=1185^\circ\text{C}$. Компактирование заготовок $\varnothing 125 \times 135$ мм проводили в газостате при температуре 1194–1203°C и давлении 142 МПа в стальной оболочке толщиной 7 мм. Для компактирования использовали гранулы размером 140 мкм и ≤ 100 мкм. Формирование различных типов структуры в компактированных заготовках достигалось в результате отжига при различных температурно-временных параметрах и скоростях охлаждения.

Испытание образцов на осадку и растяжение проводили в изотермических условиях в интервале температур 1000–1200°C. Осадку со степенью деформации по высоте образца с 30 ± 2 и до 52% (для определения допустимой деформации) осуществляли на машине MTS 810-500 со скоростью 10^{-1} c^{-1} , растяжение – на машине 1231У-10 со скоростью деформирования 2,8 мм/мин. Осадку заготовок на гладких бойках проводили на гидравлическом прессе 6,3 МН (630 тс), штамповку модельных дисков – на прессе 16 МН (1600 тс) со скоростью рабочего хода 2 мм/с с нагревом бойков и штампов до температуры 950–975°C.

Результаты

Результаты исследования показали, что гомогенизирующий отжиг при температуре $1200 \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 6 ч с охлаждением на воздухе практически не изменяет структуру, сформированную в результате ГИП. Наиболее эффективным оказался отжиг, осуществленный с учетом критических температур фазовых и структурных превращений сплава ЭП741НП. Такой отжиг включает: нагрев до 950°C со скоростью не более $80^\circ\text{C}/\text{ч}$, выдержка 1 ч \rightarrow нагрев до $1200 \pm 10^\circ\text{C}$ со скоростью не более $80^\circ\text{C}/\text{ч}$, выдержка 6 ч \rightarrow охлаждение с печью до $1160 \pm 10^\circ\text{C}$ со скоростью не более $15^\circ\text{C}/\text{ч}$, выдержка 4 ч \rightarrow охлаждение с печью до $1130 \pm 10^\circ\text{C}$ со скоростью не более $15^\circ\text{C}/\text{ч}$, выдержка 4 ч \rightarrow охлаждение с печью до $900\text{--}1000^\circ\text{C}$ со скоростью не более $30^\circ\text{C}/\text{ч}$, выдержка 1 ч \rightarrow охлаждение на воздухе [32]. Отжиг обеспечивает формирование мелкозернистой структуры с размером зерна не более 10 мкм и коагуляцию мелкодисперсных частиц γ' -фазы до 2,75 мкм внутри зерен и до 5,76 мкм на границах зерен (рис. 1). При испытании на осадку образцы с такой структурой деформировались без разрушения и образования внутренней пористости. Деформация сплава ЭП741НП в интервале температур $1075\text{--}1125^\circ\text{C}$ сопровождается динамической рекристаллизацией, которая способствует формированию ультрамелкозернистой структуры, обеспечивающей сверхпластическую деформацию в изотермических условиях при оптимальных температурно-скоростных параметрах.

Осадка образцов из компактированных ГИП заготовок, не подвергнутых отжигу, сопровождалась порообразованием на границах рекристаллизованных в процессе ГИП зерен – особенно в зонах интенсивного течения металла (ковочного креста) с образованием трещин, что указывает на низкую прочность границ после ГИП.

При испытании на растяжение образцы из компактированных ГИП заготовок в диапазоне температур 1000–1150°C разрушались с удлинением и сужением $< 1\%$. Образцы после отжига, проведенного по оптимальному режиму в указанном интервале температур, деформировались с удлинением 9% и сужением 11% (рис. 2). Повышение температуры в интервале 1000–1150°C не оказывает влияния на пластичность, что обусловлено упрочнением границ зерен боридной фазой, температура растворения которой в сплаве ЭП741НП выше 1200°C . Пластичность несколько увеличивается при температурах выше температуры полного растворения γ' -фазы. Осадку заготовок после отжига по оптимальному варианту и штамповку модельных дисков осуществляли при температуре 1130°C с деформацией до 30% за нагрев и суммарной деформацией 63% (рис. 3). Деформация при температуре 1130°C сопровождается динамической рекристаллизацией и обеспечивает сохранение мелкозернистой структуры

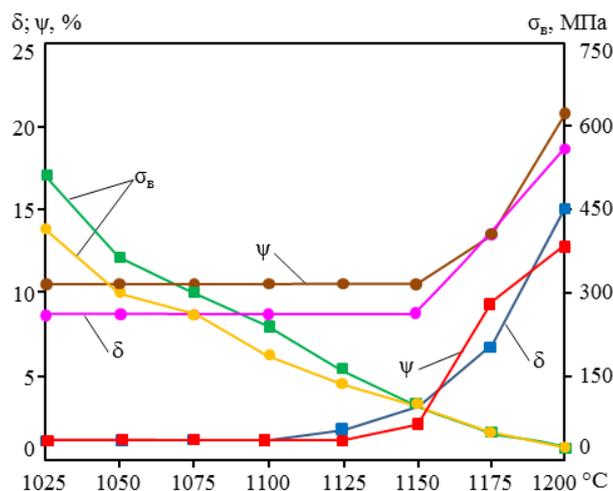


Рис. 2. Влияние температуры на свойства при растяжении сплава ЭП741НП с различным типом структуры:
 ■ – компактированная при ГИП; ● – компактированная при ГИП+отжиг

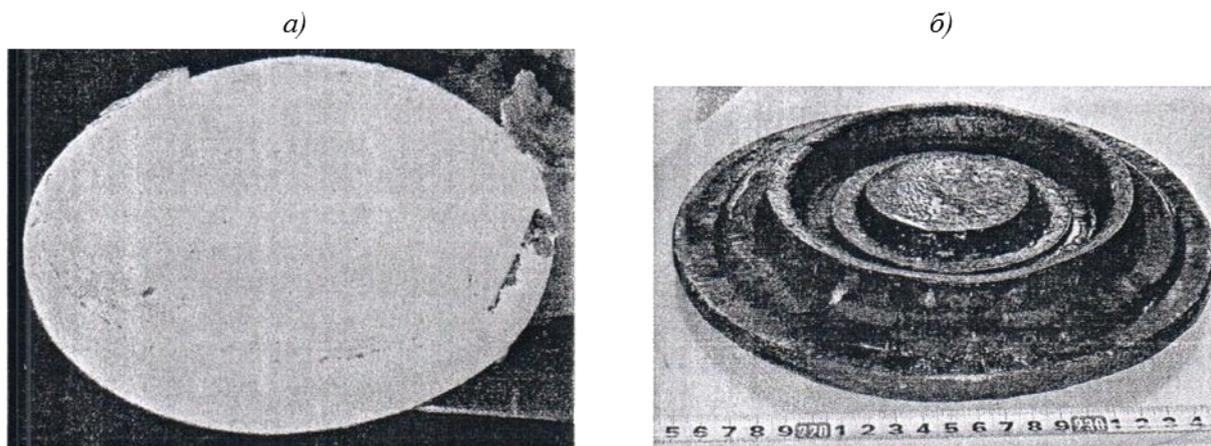


Рис. 3. Диск из гранулированного сплава ЭП741НП из компактированной с помощью ГИП и отожженной по оптимальному варианту заготовки с применением осадки (а) и штамповки (б)

с размером зерна 10 мкм независимо от размеров исходных гранул. Присутствие пористости в структуре деформированных осадкой заготовок и штамповок не выявлено при увеличении – до $\times 1000$.

Механические свойства дисков, изготовленных осадкой и штамповкой из заготовок, компактированных ГИП, после окончательной термической обработки значительно превышают требования ТУ, установленные для дисков из гранулированного сплава ЭП741НП, изготавливаемых ГИП без последующей деформации (табл. 2).

После термической обработки по ТУ размер зерна увеличился до 105 мкм в заготовках с исходным размером гранул 140 мкм и до 95 мкм – в заготовках из гранул ≤ 100 мкм, что более чем в 2 раза превышает размер зерна в термически обработанных заготовках, компактированных ГИП (60 мкм).

После окончательной термической обработки с нагревом под закалку ниже температуры $T_{п.р}'$ размер зерна увеличился с 10 до 45 мкм в заго-

товках из гранул размером 140 мкм и до 48 мкм – в заготовках из гранул размером ≤ 100 мкм (рис. 4).

Более высокую длительную прочность показали образцы из заготовок с исходным размером гранул 140 мкм, а сопротивление малоциклового усталости гладких образцов при температуре 650°C на базе $5 \cdot 10^3$ и 10^4 циклов оказалось выше для заготовок из гранул размером ≤ 100 мкм (рис. 5).

Обсуждение и заключения

Процесс твердофазного соединения гранул с применением ГИП обеспечивает возможность изготовления изделий (дисков и других деталей) из композиций жаропрочных никелевых сплавов, которые вызывают значительные трудности при применении слитковой технологии и традиционных способов обработки давлением.

Результаты многочисленных исследований и опыт применения дисков ГТД, изготовленных из гранулированных жаропрочных никелевых сплавов, подтвер-

Таблица 2

Механические свойства дисков из сплава ЭП741НП, изготовленных по схеме ГИП+деформация

Термическая обработка	Размер гранул, мкм	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	τ , ч (при 650°, $\sigma=996,6$ МПа)
		МПа		%		
Режим 1*	140	1383–1387	966–980	25,8–26,6	24,7	200 (без разрушения)
	≤100	1390–1420	934–980	25,6–26,0	22,7–25,5	122–141
Режим 2**	140	1513–1550	1103–1115	18,4–22,4	19,4–22,4	105–121
	≤100	1555–1572	1005–1090	20,0–21,6	20,2–20,8	124–130
Требования по ТУ (после ГИП)	–	≥1352	≥882	≥17	≥19	≥100

* Нагрев до 1200±10°C, охлаждение на воздухе+старение при 870±10°C в течение 2 ч, охлаждение на воздухе.

** Нагрев до 900°C, выдержка 0,5 ч, подогрев до 1180±10°C со скоростью 80°C/ч, выдержка 4 ч, охлаждение на воздухе+старение при 750±10°C в течение 24 ч, охлаждение на воздухе+старение при 800°C в течение 24 ч, охлаждение на воздухе.

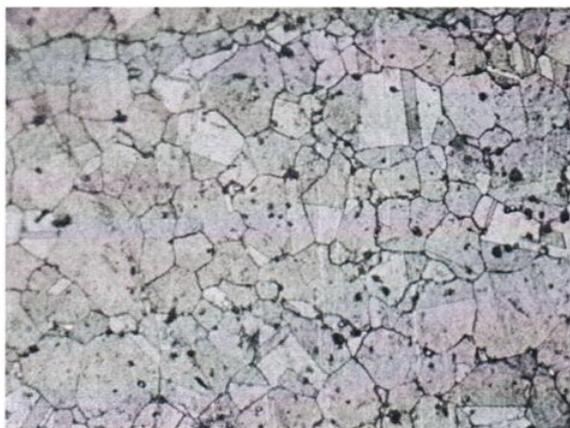


Рис. 4. Микроструктура заготовок после термической обработки при температуре ниже $T_{п,рy}$

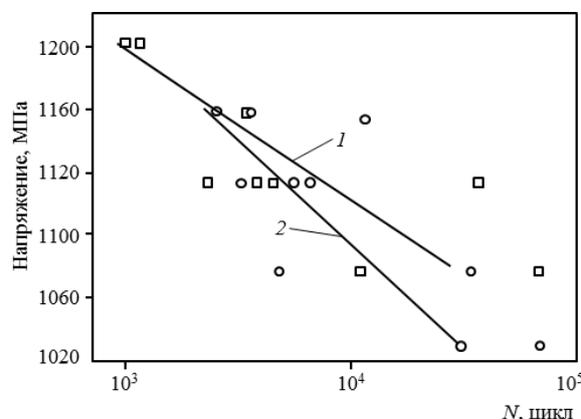


Рис. 5. Сопротивление малоциклового усталости при 650°C гладких образцов с размером гранул ≤100 (1) и 140 мкм (2) из малоразмерных заготовок дисков сплава ЭП741НП, изготовленных методом ГИП+деформация после термической обработки с закалкой при температуре ниже $T_{п,рy}$

дрили повышение уровня и стабильности служебных характеристик в результате последующей горячей пластической деформации компактированных ГИП заготовок с преобладанием сдвигового механизма – преимущественно методом прессования.

Сдвиговая деформация компактированных ГИП заготовок обеспечивает обновление контактных поверхностей гранул и интенсивное межгранульное проскальзывание, что способствует активизации процессов диффузии и сварки давлением, повышению прочности границ зерен и уменьшению пористости.

Разработан процесс термической обработки заготовок, компактированных ГИП, обеспечивающий формирование мелкозернистой структуры с оптимальной морфологией частиц γ' -фазы, допускающей деформацию осадкой и штамповкой без развития внутренней пористости и образования трещин. Возможность применения осадки компактированной ГИП заготовки значительно упрощает изготовление крупных изделий по сравнению с мерной заготовкой из прессованного прутка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 36–52.

3. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бақрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 52–57.
4. Разуваев Е.И., Моисеев Н.В., Капитаненко Д.В., Бубнов М.В. Современные технологии обработки металлов давлением // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №2. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 05.04.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-3-3.
5. Складов Н.М. Путь длиною в 70 лет. М.: МИСиС–ВИАМ. 2002. С. 317–319.
6. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012. С. 245–248.
7. Складов В.Г., Воробьев Н.А. Механические свойства крупногабаритной штамповки диска из сплава ЭК79ИД // *Технология металлов*. 2003. №2. С. 9–12.
8. Бақрадзе М.М., Овсепян С.В., Шугаев С.А., Летников М.Н. Влияние режимов закалки на структуру и свойства штамповок дисков из жаропрочного никелевого сплава ЭК151-ИД // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №9. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.04.2016).
9. 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. №S. С. 129–141.
10. Бондарев А.А., Ерманок М.З., Соболев Ю.П. Штамповка гранулированных жаропрочных никелевых сплавов (обзор зарубежной литературы за 1980–1983 гг.) // *Технология легких сплавов*. 1984. №6. С. 70–77.
11. Гессингер Г.Х. Порошковая металлургия жаропрочных сплавов. Челябинск: Металлургия, 1988. С. 283–284.
12. Lindskog P.F., Bocchini G.F. Development of High Strength P/M Precision Components in Europe // *International Journal of Powder Metallurgy & Powder Technology*. 1979. Vol. 15. No. 3. P. 199.
13. Kerr J. *The Engineer*. 1980. Vol. 250. №6487. P. 544–546.
14. Mayfield J. Promises Of Cost Savings Motivate Innovative Technique // *Aviation Week and Space Technology*. 1978. Vol. 109. P. 44–45.
15. Ferguson B. *Lynn Aerospace Applications: metals handbook*. 9th ed. ASM Metals Park, Ohio, USA, 1984. Vol. 7. Powder Metallurgy. P. 646–650.
16. Chandler H.E. *Metal Progress*. 1979. Vol. 109. P. 44–55.
17. Malley D.R., Stulga I.E., Ondercin R.I. Production of Near Net Shapes by Hot Isostatic Pressing of Superalloys Powder // *National Powder Metallurgy Conference Proceedings*. 1983. Vol. 38. P. 229–246.
18. William B. Eisen. PM – Past, Present and Future: report. Crucible Research. Pittsburg, PA. 1996. P. 23–27.
19. William B. Eisen. The Current Status of as-HIP Superalloy in Aircraft Engines // *Proceeding of International Techno-Business Conference on the Superalloys Industry «Superalloys for Gas Turbine»*. Tampa, Florida, USA. 1998. P. 73–84.
20. Banik A., Lindsley B., Mourer D.P., Zimmer W.H. Alternative processing for the production of powder metal superalloy billet // *Advanced Materials and Processes for Gas Turbines*. Warrendale, PA: The Minerals, Metals and Materials Society (TMS). 2003. P. 227–236.
21. Kearsy R.M., Koul A.K., Beddoes J.C., Cooper C. Development and Characterization of a Damage Tolerant Microstructure for a Nickel Base Turbine Disc Alloy // *Superalloys–2000*. P. 117–126.
22. Locq D., Marty M., Caron P. Optimisation of Mechanical Properties of a New Superalloys for disk Application // *Ibid*. P. 395–403.
23. Hunt D.W., Skelton D.K., Knowles D.M. Microstructural Stability and Crack Growth Behaviour of a Polycrystalline Nickel Base Superalloy // *Ibid*. P. 795–802.
24. Порошковая металлургия. Аннотация зарубежных материалов. М.: ВИЛС. 1982. №1 (41). С. 8.
25. Kolcum E.H. New Production Methods Gain // *Aviation Week and Space Technology*. 1978. Vol. 109. No. 16. P. 46–47.
26. Фаткуллин О.Х., Еременко В.И., Колесников Ю.Н. и др. Особенности формирования структуры в процессе деформации и термической обработки гранулируемого сплава ЭП741НП // *Технология легких сплавов*. 1991. №12. С. 71–78.
27. Фаткуллин О.Х., Гарибов Г.С., Некрасов В.А., Кононов И.А. Разработка перспективных технологий для жаропрочных сплавов // *Технология легких сплавов*. 1999. №3. С. 53–61.
28. Ерманок М.З., Соболев Ю.П., Бондарев А.А. Пластическая деформация гранулированных жаропрочных никелевых сплавов. Обзорная информация // *Обработка цветных металлов и сплавов*. 1985. №1. С. 1–53.
29. Аношкин Н.Ф., Ерманок М.З., Клешев А.С. и др. Штамповка дисков из предварительно профилированных компактов жаропрочных сплавов // *Металлургия гранул*. 1983. №1. С. 259–265.
30. Гельман А.А., Герасимова Л.П., Годованец М.А. и др. Некоторые особенности деформации и разрушения при температурах обработки давлением литых и гранулируемых никелевых сплавов // *Металлургия гранул*. 1993. №6. С. 272–282.
31. Способ изготовления диска из высоколегированного жаропрочного сплава: пат. 2256721 Рос. Федерация; заявл. 02.04.04; опубл. 20.07.05.