

## ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ

УДК 669.24:539.4.015

### ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ГРАДИЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В ДИСКЕ ИЗ ГРАНУЛЬНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА

© 2019 г. А. А. Ганеев<sup>а</sup>, В. А. Валитов<sup>а</sup>, Ф. З. Утяшев<sup>а</sup>, В. М. Имаев<sup>а, \*</sup>

<sup>а</sup>Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, 450001 Россия, Уфа, ул. Ст. Халтурина, 39

\*e-mail: vimayev@mail.ru

Поступила в редакцию 24.05.2018 г.

После доработки 02.10.2018 г.

Принята к публикации 06.11.2018 г.

На примере модельной заготовки из гранульного никелевого сплава ЭП741НП (EP741NP), имитирующей диск, продемонстрирована возможность получения градиентной структуры с помощью деформационно-термической обработки (ДТО). ДТО включала в себя основную деформационную обработку, обеспечившую развитие рекристаллизации и формирование мелкозернистой микроструктуры, термическую обработку в градиентном температурном поле, дополнительную деформационную и заключительную упрочняющую термическую обработку. В заготовке диска после ДТО была получена градиентная структура: структура типа “ожерелье” в периферийной части и мелкозернистая типа “микродулекс” в центральной части заготовки диска. Оценка механических свойств образцов, вырезанных на разном расстоянии от оси симметрии заготовки диска, показала, что центральная часть диска обладает повышенной прочностью и пластичностью, а периферийная часть — повышенной жаропрочностью и ударной вязкостью. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности примененного подхода для достижения градиентной структуры и градиентных механических свойств в дисках из гранульных никелевых сплавов.

*Ключевые слова:* гранульные никелевые сплавы, горячая деформация, градиентная микроструктура, механические свойства

DOI: 10.1134/S0015323019040053

#### ВВЕДЕНИЕ

В качестве материала дисков и других вращающихся деталей для газотурбинных двигателей (ГТД) в настоящее время используют высоколегированные жаропрочные никелевые сплавы, которые обычно изготавливают с помощью гранульных технологий, исключающих возникновение макро- и микросегрегаций, характерных для слитков таких сплавов. Диски ГТД относятся к высоконагруженным деталям, испытывающим знакопеременные статические и динамические нагрузки, поэтому механические свойства дисковых материалов должны отвечать требованиям одновременно высокой прочности, в том числе усталостной, высокой жаропрочности, ударной вязкости и пластичности [1–6]. Применительно к дискам ГТД следует также учесть, что их нагружение происходит неравномерно в радиальном направлении и в условиях градиентного температурного поля. В области ступицы диск испытывает повышенные механические нагрузки при пониженных температурах, а в области обода — наоборот, пониженные нагрузки при повышенных температурах [7–11]. Поэтому ступица диска должна обладать повышенной прочностью, которую обеспе-

чивает более мелкозернистая структура, а обод — повышенной жаропрочностью, которую обеспечивает более крупнозернистая структура. В связи с этим представляет значительный практический интерес изготовление диска с градиентной структурой. Его можно получить с помощью горячего изостатического прессования гранул разных фракций: мелкой фракции в ступице и относительно крупной — в обode [4, 5]. Однако использование крупных гранул может приводить к повышению дефектности материала и снижению его эксплуатационных характеристик (сопротивления малоциклового усталости и трещиностойкости) [12–15]. Поэтому механические свойства никелевых гранульных сплавов стремятся улучшить дополнительной деформационной обработкой [9–12, 16], которую сочетают с термической обработкой в градиентном температурном поле. Компактированный материал обычно подвергают горячей экструзии, последующей горячей штамповке, механической обработке для получения нужной геометрии и термической обработке в градиентном температурном поле с использованием специально разработанного метода (DMNT method) [10, 11]. Градиентная термическая обработка под-

разумеает кратковременный нагрев обода диска до температур выше температуры сольвуса, при этом центральная часть диска нагревается до температур ниже температуры сольвуса [10, 11].

Для улучшения механических свойств представляет интерес после градиентной термической обработки дополнительно деформировать диск с тем, чтобы в области обода получить частично рекристаллизованную структуру типа “ожерелье”. Согласно [9, 12, 17–22], такая структура обеспечивает наилучшее сочетание скоростей зарождения и роста трещин по сравнению с крупнозернистой, при этом снижения жаропрочности не происходит. Дополнительная деформация может быть осуществлена на небольшую степень при пониженной температуре. Следует отметить, что такого рода работы применительно к высоколегированным гранульным никелевым сплавам не проводились.

Цель работы – исследование влияния горячей деформации, последующей термической обработки в градиентном температурном поле, дополнительной деформации и заключительной упрочняющей термической обработки на формирование градиентной микроструктуры в модельной заготовке из гранульного сплава, имитирующей диск, с последующей оценкой механических свойств полученного материала. В качестве исходного материала был взят гранульный сплав ЭП741НП, широко применяемый для изготовления дисков ГТД.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исходные заготовки сплава ЭП741НП  $\varnothing 90 \times 60$  мм были изготовлены методом горячего изостатического прессования (ГИП). Химический состав сплава (вес. %): Cr – 9.3; Ti – 1.8; Al – 5.2; Mo – 4; Nb – 2.7; Co – 15.7; W – 5.4; Hf – 0.2, C – 0.04, B – 0.014, Ni – основа. Температуру сольвуса ( $T_s$ ) определяли методом пробных закалок образцов от температур 1160–1200°C, а также с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии. Она составила  $T_s = 1180 \pm 5^\circ\text{C}$ . Исходную заготовку сплава подвергали гетерогенизационному отжигу и изотермической деформационной обработке сжатием, обозначенной далее как основной, при температурах  $T = 1140\text{--}1160^\circ\text{C}$  [23]. В результате в заготовках с примерным размером  $\varnothing 150 \times 25$  мм была получена преимущественно рекристаллизованная структура типа “микро-дуплекс”. Мелкозернистые заготовки были подвергнуты градиентной термической обработке. Температура в ступичной части составляла  $T = 1130^\circ\text{C}$  в области обода –  $T = 1190\text{--}1210^\circ\text{C}$ . Далее заготовку охлаждали в печи со скоростью 80–90°C/ч, после чего деформировали при  $T = 1130^\circ\text{C}$  на степень  $\epsilon = 15\text{--}25\%$ , причем в области обода из-за разной толщины заготовки степень деформации

была наименьшей в указанном диапазоне. Деформированную заготовку подвергали заключительной упрочняющей термической обработке, включавшей в себя обработку на твердый раствор при  $T = 1150^\circ\text{C}$  (1 ч) с последующим охлаждением на воздухе и старением при  $T = 870^\circ\text{C}$  (16 ч),  $650^\circ\text{C}$  (8 ч) и  $760^\circ\text{C}$  (16 ч). Таким образом, проведенная многостадийная деформационно-термическая обработка (ДТО) включала в себя гетерогенизационный отжиг, основную деформационную обработку, градиентную термическую обработку, дополнительную деформационную и заключительную термическую обработку.

Микроструктурные исследования проводили с помощью растрового электронного микроскопа Mira-3 Tescan в режиме вторичных (SE) или обратнорассеянных (BSE) электронов. Размер и объемную долю выделений  $\gamma'$ -фазы, в том числе дисперсных, оценивали по изображениям в режиме SE, размер  $\gamma'$ -зерен – по изображениям в режиме BSE. При изучении микроструктуры использовали также метод автоматического анализа картин дифракции обратно-рассеянных электронов (EBSD-анализ) с шагом сканирования 0.5 мкм. При этом частицы  $\gamma'$ -фазы условно принимались как  $\gamma'$ -фаза, а микроструктура – как квазиоднофазная. Малоугловые границы с разориентировкой менее  $2^\circ$ , принимая во внимание погрешность EBSD-анализа, не учитывались. Высокоугловыми границами зерен (ВУГ) считали границы с разориентировкой более  $15^\circ$ .

Испытания на растяжение были выполнены на плоских образцах с размерами рабочей части  $17 \times 4.5 \times 2$  мм<sup>3</sup> при комнатной температуре со скоростью деформации  $\dot{\epsilon} \approx 5 \times 10^{-4}$  с<sup>-1</sup>. Испытания на ударный изгиб проводили на стандартных образцах с размерами  $55 \times 10 \times 10$  мм<sup>3</sup>. Для испытаний на ползучесть использовали плоские образцы с размерами рабочей части  $17 \times 3 \times 3$  мм<sup>3</sup>. Образцы для проведения механических испытаний вырезали из различных областей заготовки диска, подвергнутой ДТО, при этом измеряли расстояние  $L$  от центра рабочей части образца до оси симметрии заготовки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Структура заготовки диска после ДТО.** Исследования структуры заготовки диска после ДТО подтвердили формирование градиентной структуры по сечению заготовки (рис. 1 и 2). На рис. 3 приведены параметры микроструктуры в зависимости от расстояния от оси симметрии заготовки диска. Сечение заготовки можно разделить на две основные зоны: мелкозернистую и относительно крупнозернистую со структурой типа “ожерелье”.

В мелкозернистой зоне заготовки, расположенной до  $L \approx 0.5R$ , после упрочняющей термической обработки сохранилась микро-дуплексная

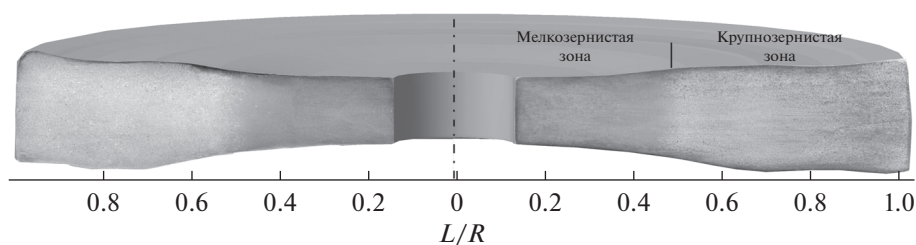


Рис. 1. Макроструктура модельной заготовки диска из сплава ЭП741НП после ДТО.

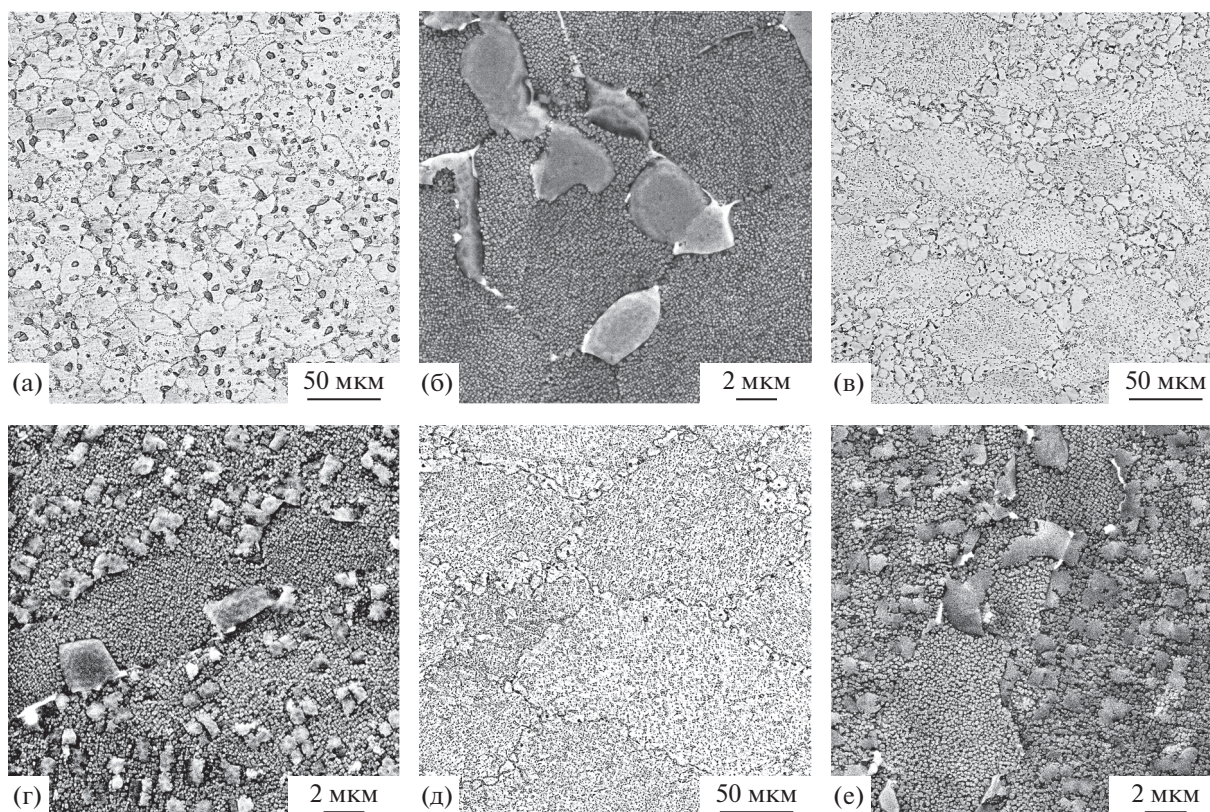


Рис. 2. Микроstructure модельного диска (а, б) в мелкозернистой зоне, соответствующей расстоянию от оси заготовки  $L \approx 0.29R$ , (в–е) в зоне “ожерелье”, соответствующей (в, г)  $L \approx 0.67R$  и (д, е)  $L \approx 0.93R$  (а, в, д – BSE, б, г, е – SE).

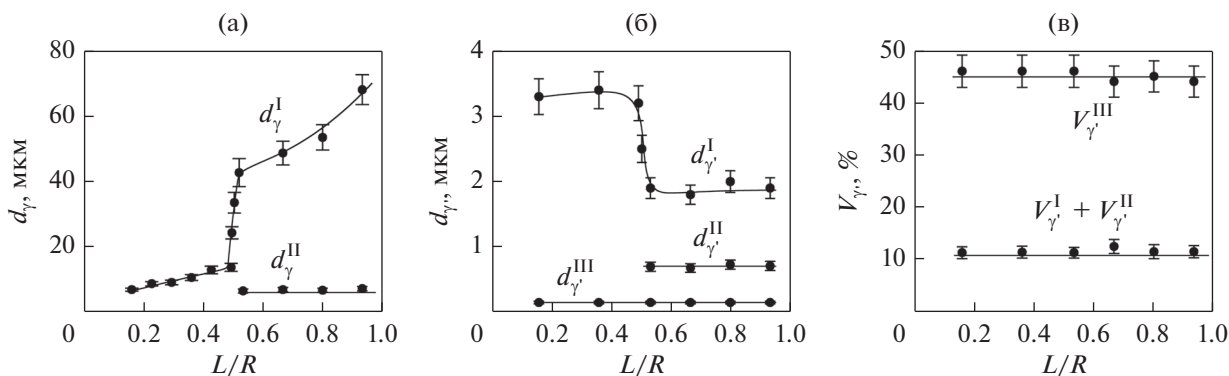
структура, полученная в результате развития динамической рекристаллизации в ходе основной и дополнительной деформационной обработки. Структура представляет собой мелкие рекристаллизованные  $\gamma$  зерна, по границам которых наблюдаются крупные частицы  $\gamma'$ -фазы, а внутри – дисперсные выделения  $\gamma'$ -фазы. По мере удаления от оси симметрии заготовки размер  $\gamma$ -зерен возрастает. Резкий рост  $\gamma$  зерен происходит в узкой переходной зоне при  $L \approx 0.5R$ : средний размер увеличивается от  $d \approx 13$  мкм до  $d \approx 45$  мкм (рис. 3а). Средний размер и объемная доля дисперсных и крупных частиц  $\gamma'$ -фазы в пределах мелкозернистой зоны практически не меняются.

EBSD-анализ (рис. 4), выполненный на расстоянии  $L \approx 0.29R$  от оси симметрии диска, пока-

зал, что формируемая в мелкозернистой зоне структура содержит в основном высокоугловые границы зерен: их доля составила 93%. Это указывает на полное прохождение рекристаллизационных процессов в результате ДТО.

В зоне “ожерелье”, расположенной на расстоянии больше  $L \approx 0.5R$ , была получена микроstructure, представляющая собой крупные  $\gamma$ -зерна, окруженные мелкими  $\gamma$  зернами. Крупные  $\gamma$ -зерна сформировались при термической обработке в градиентном температурном поле в результате развития собирательной рекристаллизации. При последующей дополнительной деформации крупнозернистая структура, в которой при замедленном охлаждении после высокотемпературного отжига была выделена дисперсная  $\gamma'$ -фаза, транс-





**Рис. 3.** Графики зависимости среднего размера зерен  $\gamma$ -фазы (а), среднего размера (б) и объемной доли (в) мелкой и крупной  $\gamma$ -фазы в зависимости от расстояния, выраженного в долях радиуса, от оси симметрии заготовки диска ( $d_{\gamma}^I$  – средний размер  $\gamma$ -зерен в мелкозернистой структуре и крупных  $\gamma$ -зерен в структуре типа “ожерелье”,  $d_{\gamma}^{II}$  – средний размер мелких  $\gamma$ -зерен в “ожерелье”,  $d_{\gamma}^I$  и  $V_{\gamma}^I$  – средний размер и объемная доля крупной зернограничной  $\gamma$ -фазы,  $d_{\gamma}^{II}$  и  $V_{\gamma}^{II}$  – средний размер и объемная доля крупной внутризеренной  $\gamma$ -фазы,  $d_{\gamma}^{III}$  и  $V_{\gamma}^{III}$  – средний размер и объемная доля дисперсной  $\gamma$ -фазы).

формировалась в частично рекристаллизованную структуру, состоящую из деформированных  $\gamma$ -зерен, по границам которых образовались мелкие рекристаллизованные зерна, образующие “ожерелье”. При этом внутри  $\gamma$ -зерен формируется субструктура, декорированная дисперсными выделениями  $\gamma'$ -фазы.

В зоне “ожерелье” крупная  $\gamma'$ -фаза наблюдается как по границам (зернограничная  $\gamma'$ -фаза), так и внутри крупных  $\gamma$  зерен (внутризеренная  $\gamma'$ -фаза). При этом зернограничная  $\gamma'$ -фаза крупнее внутризеренной –  $d_{\gamma'}^I = 1.9$  мкм против  $d_{\gamma'}^{II} = 0.7$  мкм. В сравнении с мелкозернистой зоной размер крупной  $\gamma'$ -фазы в зоне “ожерелье” заметно уменьшается, при этом суммарная объемная доля крупной внутризеренной и зернограничной  $\gamma'$ -фазы не меняется и составляет около 12% (рис. 3в). Размер и объемная доля дисперсных выделений  $\gamma'$ -фазы сохраняются примерно такими же, как и в мелкозернистой зоне –  $d_{\gamma'}^{III} \approx 0.15$  мкм и  $V_{\gamma'}^{III} \approx 46\%$  (рис. 3б, 3в). Они располагаются в объеме как крупных, так и мелких  $\gamma$  зерен.

EBSD-анализ зоны “ожерелье” ( $L \approx 0.67R$ ) обнаружил высокую долю малоугловых границ (55%), что является результатом формирования субструктуры в крупных  $\gamma$  зернах в ходе дополнительной деформационной и заключительной термической обработки (рис. 4д).

Таким образом, в заготовке диска из сплава ЭП741НП при помощи разработанных технологических приемов и режимов ДТО была достигнута градиентная микроструктура – однородная мелкозернистая с преимущественно высокоугловыми границами зерен на расстоянии до  $L \approx 0.5R$

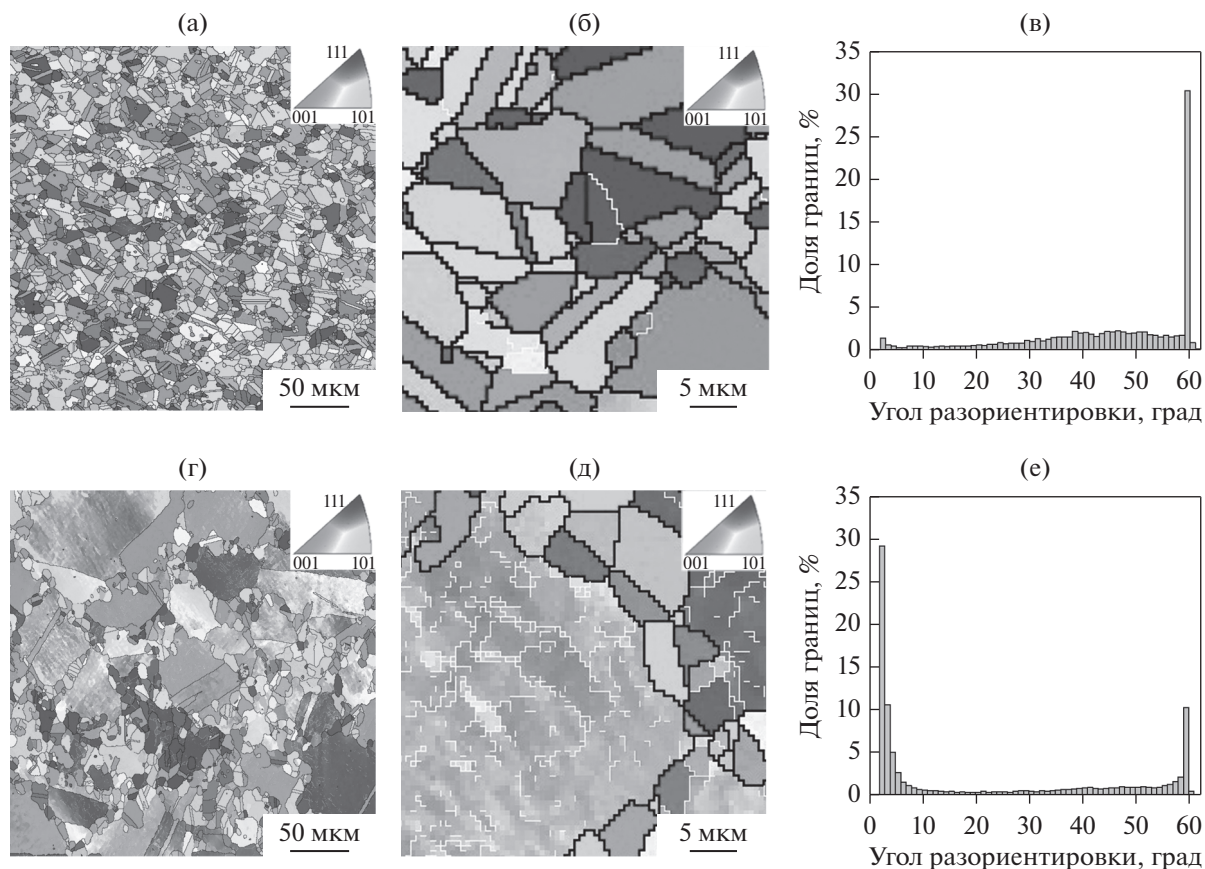
и структура типа “ожерелье” при  $L > 0.5R$ . Из разных областей заготовки диска вырезали образцы для последующих механических испытаний.

**Механические испытания.** На рис. 5 представлены механические свойства при растяжении образцов, вырезанных из различных областей заготовки диска. Видно, что при комнатной температуре прочностные свойства и пластичность максимальны в мелкозернистой зоне и постепенно снижаются с увеличением расстояния от оси симметрии заготовки диска (рис. 5). Прочность при переходе от мелкозернистой зоны к зоне “ожерелье” снижается примерно на 100 МПа, пластичность – на 3–4%.

Измерения ударной вязкости выявили немонотонную зависимость ударной вязкости от расстояния от оси симметрии заготовки диска (табл. 1). При переходе от мелкозернистой зоны к зоне “ожерелье” ударная вязкость сначала значительно возрастает (при  $L \approx 0.57R$ ), затем убывает (при  $L \approx 0.81R$ ). При этом в зоне “ожерелье” она всегда выше, чем в мелкозернистой зоне.

На рис. 6 представлены кривые ползучести для образцов, вырезанных из различных областей заготовки диска и испытанных при  $T = 650^\circ\text{C}$ . Видно, что скорость ползучести заметно меньше в зоне “ожерелье”. Остаточная деформация образцов, вырезанных из мелкозернистой зоны и разрушившихся после 66 ч, составила около 4%. Образцы, вырезанные из зоны “ожерелье”, разрушились после 254 ч, при этом остаточная деформация составила около 10%.

Таким образом, сопротивление ползучести и, в особенности, длительная прочность значительно возрастают в направлении к периферии заготовки диска. Это соотносится с изменением кратковременных свойств при растяжении, ударной



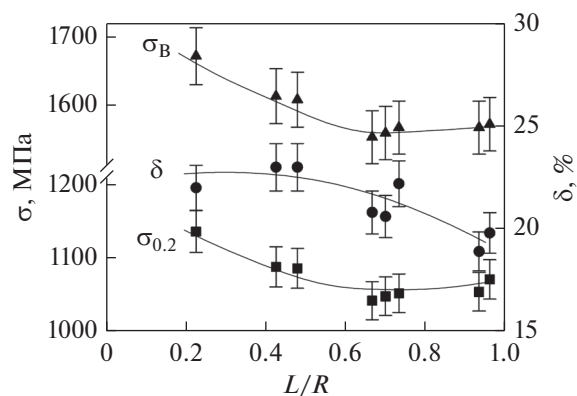
**Рис. 4.** Ориентационные EBSD-карты (а, б, г, д) и соответствующие спектры разориентировок границ зерен (в, е), полученные от образцов, вырезанных из: (а–в) – зоны диска с мелкозернистой структурой ( $L = 0.29R$ ), (г–е) – зоны диска со структурой типа “ожерелье” ( $L = 0.67R$ ); (а, б, г, д) – черным линиям соответствуют высокоугловые границы зерен, белым – малоугловые.

вязкости и обусловлено градиентной структурой, полученной в заготовке диска.

**Разрушение.** Фрактографический анализ образцов, разрушенных при испытаниях на ударный изгиб, показал, что разрушение всех образ-

цов было преимущественно транскристаллитным. При этом у образцов со структурой типа “ожерелье” поверхность разрушения оказалась рельефнее, а вторичные трещины больше по размерам и количеству. Это говорит об увеличении длины траектории распространения трещин и соответственно работы распространения трещин с увеличением размера зерен при переходе от мелкозернистой структуры к структуре типа “ожерелье”, что и обеспечивает повышение ударной вязкости. При дальнейшем увеличении размера зерен в зоне “ожерелье” снижение сопротивления зарождению трещины, вероятно, является причиной некоторого снижения ударной вязкости. По всей видимости, оптимальное сочетание высокого сопротивления зарождению и распространению трещины, обеспечивающее наибольшую ударную вязкость, достигается при размере зерен более 10 мкм, но менее 50 мкм.

Таким образом, градиентная структура, полученная в заготовке диска из гранульного сплава ЭП741НП с помощью специально разработанных технологических приемов и режимов ДТО, обеспечивает градиентные механические свойства.



**Рис. 5.** Механические свойства при растяжении, полученные для образцов, вырезанных из заготовки диска на разном расстоянии от оси симметрии заготовки.

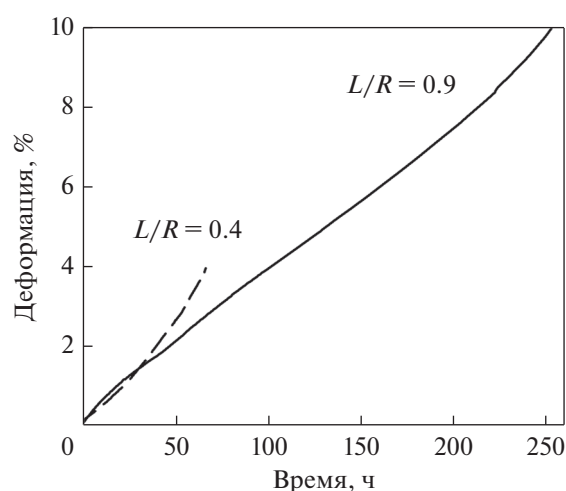
**Таблица 1.** Ударная вязкость, полученная для образцов, вырезанных из различных областей заготовки диска из сплава ЭП741НП

Расстояние от оси симметрии в долях радиуса заготовки диска, $L$	$KCU$ , МДж/м <sup>2</sup>
0.35R (мелкозернистая зона)	0.41 ± 0.02
0.57R (зона “ожерелье”)	0.58 ± 0.03
0.81R (зона “ожерелье”)	0.50 ± 0.03

**Таблица 2.** Механические свойства материала диска из сплава ЭП741НП с градиентной структурой, полученной разными способами (МЗ – мелкозернистая структура, КЗ – крупнозернистая структура)

Способ обработки	Микроструктура	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$KCU$ , МДж/м <sup>2</sup>	Длительная прочность, ч	
ДТО – наст. работа	МЗ “Ожерелье”	1086–1136	1608–1672	22–23	0.41 0.50–0.58	$T = 650^\circ\text{C}$	66
		1042–1071	1553–1572	20–21		$\sigma = 1050$ МПа	254
ГИП гранул разных фракций [4]	МЗ КЗ	1096–1113	1506–1541	18–23.6	–	$T = 750^\circ\text{C}$	109–234
		1053–1081	1369–1422	16–17.6	–	$\sigma = 700$ МПа	173–249
ТУ № 05.66.183	КЗ	931	1372	13	≥0.39	$T = 650^\circ\text{C}$ $\sigma = 980$ МПа	≥100

В направлении от оси симметрии заготовки диска к периферии пластичность и прочность снижаются при одновременном повышении жаропрочности и ударной вязкости. Это объясняется переходом от микродуплексной структуры к структуре типа “ожерелье”. Укрупнение  $\gamma$ -зерен затрудняет зернограничное проскальзывание, что и обеспечивает повышение жаропрочности. При формировании структуры типа “ожерелье” в деформированных крупных  $\gamma$ -зернах, как отмечалось, формируется субструктура, стабилизированная дисперсными выделениями упрочняющей  $\gamma'$ -фазы. Она обеспечивает субструктурное упрочнение, способствует повышению ударной вязкости и жаропрочности [19, 20].

**Рис. 6.** Кривые ползучести, полученные для образцов, вырезанных из мелкозернистой зоны заготовки диска ( $L = 0.4R$ ) и зоны со структурой типа “ожерелье” ( $L = 0.9R$ ), испытанных до разрушения при  $T = 650^\circ\text{C}$  и нагрузке  $\sigma = 1050$  МПа.

Сравнение полученных механических свойств со свойствами заготовки диска, полученной методом ГИП гранул разной фракции [4], показывает, что разработанные режимы ДТО обеспечивают увеличение предела прочности и пластичности примерно на 10% (табл. 2). Указанное повышение пластичности и прочности материала в результате ДТО можно объяснить повышенной однородностью структуры в мелкозернистой зоне и эффектом мелких зерен в зоне “ожерелье” в отличие от материала, полученного с помощью ГИП. При этом в области обода достигаются хорошо сбалансированные механические свойства: высокие значения длительной прочности и ударной вязкости в сочетании с высокими значениями прочности и пластичности. Полученные значения прочности, пластичности и жаропрочности намного превосходят требования ТУ. Разработанные режимы ДТО помимо повышения механических свойств и достижения градиентных свойств будут обеспечивать и более надежные эксплуатационные свойства, чем в дисках, изготовленных с помощью ГИП без использования деформационной обработки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны режимы ДТО, обеспечившие формирование в модельной заготовке диска из гранульного никелевого сплава ЭП741НП градиентной структуры – однородной мелкозернистой типа “микродуплекс” с преимущественно высокоугловыми границами зерен в центральной части заготовки ( $L < 0.5R$ ) и частично рекристаллизованной типа “ожерелье” в периферийной части заготовки диска ( $L > 0.5R$ ). Установлено, что градиентная структура обеспечивает градиентные механические свойства, меняющиеся в радиаль-

ном направлении заготовки диска: повышенная прочность и пластичность были достигнуты в центральной мелкозернистой зоне, повышенная жаропрочность и ударная вязкость – в периферийной зоне, в которой была сформирована структура типа “ожерелье”. Полученное в заготовке диска градиентное распределение свойств “антиподов” – прочности и жаропрочности, демонстрирует возможность получения габаритных сложнопрофильных деталей типа “диск” с комплексом свойств, наиболее полно отвечающим условиям эксплуатации. Разработанные технологические приемы и режимы ДТО могут быть использованы при изготовлении натуральных дисков ГТД из высоколегированных никелевых сплавов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ № 18-19-00685). Экспериментальные исследования были выполнены на базе Центра коллективного пользования научным оборудованием ИПСМ РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gayda J.* Dual Microstructure heat treatment of a nickel-base alloy // Technical Memorandum NASA TM 211168. November 2001. 18 p.
2. *Бер Л.Б.* Формирование частиц  $\gamma'$ -фазы в процессе закалочного охлаждения гранулированного сплава ЭП741НП. Построение ТТТ-диаграмм распада  $\gamma$ -твердого раствора // Технология легких сплавов. 2009. № 3. С. 77–88.
3. *Овсеян 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. Серия “Машиностроение”, спец. выпуск “Перспективные конструкционные материалы и технологии”. 2011. С. 122–130.
4. *Гарибов Г.С., Гриц Н.М., Федоренко Е.А., Егоров Д.А., Волков А.М., Чудинов А.А.* Исследование возможности изготовления заготовок дисков ГТД с переменной структурой и функционально-градиентными свойствами из гранул разных фракций // Технология легких сплавов. 2011. № 4. С. 41–49.
5. *Егоров Д.А., Гарибов Г.С., Гриц Н.М., Казберович А., Рыжова Н.А.* Исследование материала заготовок дисков с переменной структурой из гранул жаропрочных никелевых сплавов, изготовленных по технологии прямого ГИП // Технология легких сплавов. 2014. № 3. С. 67–77.
6. *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.
7. *Кузьменко М.Л., Чигрин В.С., Белова С.Е.* Статическая прочность рабочих лопаток и дисков компрессоров и турбин ГТД // Учебное пособие. Рыбинск: РГАТА. 2005. 74 с.
8. *Горобец Г.В.* К расчету распределения температуры на дисках осевых компрессоров газотурбинных двигателей // Промышленная теплотехника. 2004. Т. 26. № 5. С. 37–40.
9. *Фаткуллин О.Х., Еременко В.И., Власова О.Н., Гриц Н.М.* Повышение механических свойств гранулируемых жаропрочных сплавов за счет легирования и обработки давлением // Технология легких сплавов. 2001. № 5–6. С. 149–155.
10. *Mitchell R.J., Lemsky J.A., Ramanathan R., Li H.Y., Perkins K.M., Connor L.D.* Process development & microstructure & mechanical property evaluation of a dual microstructure heat treated advanced nickel disc alloy // TMS. 2008. P. 347–356.
11. *Gabb T.P., Kantzos P.T., Telesman J., Gayda J., Sudbrack C.K., Palsa B.* Fatigue resistance of the grain size transition zone in a dual microstructure superalloy disk // Intern. J. Fatigue. 2011. V. 33. P. 414–426.
12. *Кононов С.А., Перезовов А.С., Колачев Б.А.* Структура и механические свойства гранулированного сплава ЭП741НП, полученного по технологии, включающей горячее изостатическое прессование и обработку давлением // Металлы. 2007. № 5. С. 86–89.
13. *Гарибов Г.С.* Металлургия гранул – основа создания перспективных авиационных двигателей // Технология легких сплавов. 2007. № 1. С. 66–78.
14. *Ножницкий Ю.А.* Проблемы применения гранулируемых сплавов в перспективных ГТД // Технология легких сплавов. 2007. № 4. С. 13–20.
15. *Склярченко В.Г., Бубнов М.В., Пономаренко Д.А., Моисеев Н.В., Малащенко Ю.В.* Изготовление заготовок дисков из сплава ЭП741НП методом ГИП с последующим деформированием // Металлургия машиностроения. 2008. № 5. С. 41–44.
16. *Береснев А.Г., Логунов А.В., Логачева А.И.* Проблемы повышения качества жаропрочных сплавов получаемых методом металлургии гранул // Вестник МАИ. 2008. Т. 15. № 13. С. 83–89.
17. *Суперсплавы II: жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных установок.* В 2-х кн. / Под ред. Симса Ч.Т., Столофа Н.С., Хагеля У.К. Пер. с англ. под ред. Шалина Р.Е. М.: Металлургия, 1995. 384 с.
18. *Валитов В.А., Утяшев Ф.З., Баймурзин Р.Г.* Влияние условий раскатки на структуру и свойства дисков из жаропрочного никелевого сплава ЭП962 // Авиационная промышленность. 1994. № 11–12. С. 19–24.
19. *Зоров Н.Е.* Термомеханическая обработка жаропрочных сплавов // Технология легких сплавов. 1981. № 7. С. 61–73.
20. *Menon M.N., Reiman W.H.* Tensile Behavior of Rene 95 in the Thermomechanically Processed Forms // Met. Trans. A. 1975. V. 6A. P. 1075–1085.
21. *Shamblen C.E., Allen P.E., Walker P.E.* Effect of Processing and Microstructure on Rene 95 // Met. Trans. A. 1975. V. 6 A. P. 2072–2083.
22. *Клещев А.С., Корнеева Н.Н., Ноткин А.Б., Юрина О.М.* Изменение структуры жаропрочных никелевых сплавов типа ЭП742 при термомеханической обработке // ФММ. 1979. Т. 47(3). С. 548–557.
23. *Ганеев А.А., Валитов В.А.* Формирование ультрамелкозернистой структуры в никелевом сплаве ЭП741НП при горячей деформации в ( $\gamma + \gamma'$ )-области // Письма о материалах. 2015. № 5. С. 152–155.