Определение влияния температурно-скоростных параметров деформации на структуру жаропрочного никелевого сплава / Д.Р. Абашев, В.С. Бондарь, П.О. Диковицкий, С.В. Морозов. – DOI: 10.15593/perm.mech/2024.4.01 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2024. – № 4. – С. 5–13.

Perm Polytech Style: Abashev D.R., Bondar V.S., Dikovitsky P.O., Morozov S.V. Influence of Temperature-Velocity Deformation Parameters on Structures of the Heat-Resistant Nickel Alloy. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2024, no. 4, pp. 5-13. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.4.01

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 4, 2024
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2024.4.01
УДК 669.245

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА

Д.Р. Абашев, В.С. Бондарь, П.О. Диковицкий, С.В. Морозов

Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 07 сентября 2023 г.
Одобрена: 21 февраля 2024 г.
Принята к публикации:
18 сентября 2024 г.

Ключевые слова:

жаропрочные никелевые сплавы, гранульные сплавы, функционально-градиентная структура, изотермическая штамповка, математическое моделирование.

АННОТАЦИЯ

Рассматриваются некоторые вопросы, связанные с возможностью прогнозирования структуры гранульных жаропрочных никелевых сплавов после горячей деформации, существенное влияние на которую оказывают температурно-скоростные условия деформации. Разработан метод прогнозирования структуры материала по возникающим в нем в процессе изотермической штамповки напряжениям и температурам. Для формирования требуемой структуры в гранулируемых жаропрочных никелевых сплавах (ЖНС) рационально использовать условия изотермической или близкой к ней деформации. Существенное влияние на размеры зерен при этом оказывают температурно-скоростные условия деформации, которые выбирают с учетом химического состава сплава и требуемой степени деформации. Для оценки структуры материала была определена зависимость, которая может быть получена: путем экспериментальных исследований образцов из материала ЖНС, путем проведения испытания на осадку с различными степенями деформации и замера размера γ′-фазы после испытания. Для определения степени влияния скорости деформации и температуры деформации на изменение структуры были проведены исследования микроструктуры образцов после испытания на осадку из ЖНС с определением размера γ′-фазы. Было выполнено исследование микроструктуры с увеличением 10 000 раз. Проведен анализ результатов исследований деформируемости и микроструктуры сплава ЖНС. По результатам проведенных исследований было установлено, что с увеличением температуры деформации отмечается укрупнение γ′-фазы как внутри, так и на границе зерен при всех скоростях деформации. При этом следует отметить, что малые скорости деформации при температурах выше 1100 °С приводят к значительному росту размера γ′-фазы. А также незначительное влияние температуры деформирования, начиная с 1100 °С при скоростях выше 0,017 $с^{-1}$.

© **Абашев Дмитрий Рустамович** – к. ф.-м. н., доц., e-mail: tm@mospolytech.ru.
Бондарь Валентин Степанович – д. ф.-м. н., проф., заслуженный деятель науки РФ, проф., e-mail: tm@mospolytech.ru.
Диковицкий Павел Олегович – асп., e-mail: tm@mospolytech.ru.
Морозов Сергей Викторович – к. т. н., доц., e-mail: tm@mospolytech.ru.

Dmitriy R. Abashev – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, e-mail: tm@mospolytech.ru.
Valentin S. Bondar – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: tm@mospolytech.ru.
Pavel O. Dikovitskiy – postgraduate student, e-mail: tm@mospolytech.ru.
Sergey V. Morozov – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: tm@mospolytech.ru.

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

INFLUENCE OF TEMPERATURE-VELOCITY DEFORMATION PARAMETERS ON STRUCTURES OF THE HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOY

D.R. Abashev, V.S. Bondar, P.O. Dikovitsky, S.V. Morozov

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 07 September 2023
Approved: 21 February 2024
Accepted for publication:
18 September 2024

Keywords:

heat-resistant nickel alloys, granular alloys, functional gradient structure, isothermal stamping, mathematical modeling.

ABSTRACT

The paper aims at predicting structures of granular heat-resistant nickel alloys after hot deformation, which is significantly influenced by temperature-velocity deformation conditions. The developed method predicts the material's structure based on stresses and temperatures arising in it during isothermal stamping. To form a required structure in granulated heat-resistant nickel alloys (HRNA), it is rational to use the conditions of close-to-isothermal or isothermal deformation. The temperature-velocity deformation conditions, which are chosen taking into account the chemical composition of the alloy and the required degree of deformation, have a significant effect on grain sizes. To assess the material structure, a relation was determined. This dependence can be obtained by experimental studies of the samples from the HRNA material, by conducting a sludge test with various degrees of deformation and by measuring the size of the γ′ phase after the test. To determine the degree of influence of the deformation rate and deformation temperature on the change in the structure, microstructure studies of samples were carried out after sludge testing of HRNA with the determination of the size of the γ′ phase. The microstructure was studied with a magnification of 10,000 times. We analyzed the results of studying deformability and microstructure of the HRNA alloy. According to these results, it was found that with an increase in the deformation temperature, the γ′ phase both inside and at the grain boundary at all deformation rates was greater. It should be noted that low deformation rates at temperatures above 1100 ° C lead to a significant increase in the size of the γ′ phase. Also there is a slight influence of the deformation temperature starting from 1100 ° C at velocities above 0.017 s^{-1}.

Введение

Авиационные двигатели 5-го и 6-го поколений должны обеспечивать существенное улучшение летных характеристик перспективных летательных аппаратов. С точки зрения материаловедения эту задачу можно решать путем разработки новых, более эффективных материалов и технологий их производства [1–5].

В качестве материала дисков (турбин, последних ступеней компрессора) газотурбинных двигателей (ГТД) в настоящее время широко используют высоколегированные жаропрочные никелевые сплавы, в том числе такие, как ЭП741НП и ВВ751П, которые обычно изготавливают с помощью гранульных технологий [6–8]. Установлено, что для удовлетворения требованиям по прочности необходимо максимально измельчить компоненты структуры дисковых материалов (например, уменьшить размеры зерна и упрочняющих частиц γ′-фазы). А для удовлетворения требований по жаропрочности требуется структура материала с более крупными зернами и крупными частицами γ′-фазы [9–21].

Диски ГТД работают в сложных условиях значительных величин действующих механических нагрузок в поле высоких температур и неравномерного нагрева по его радиусу и толщине [1; 2]. В области ступицы диск испытывает повышенные механические нагрузки при пониженных температурах, а в области обода – нагрузки существенно меньше, но материал работает при повышенных температурах. Поэтому ступица диска должна обладать повышенной прочностью, которую обеспечивает более мелкозернистая структура материала, а обод – повышенной жаропрочностью, которую обеспечивает более крупнозернистая структура материала [2].

В связи с этим представляет значительный практический интерес получение заготовок диска с градиентной структурой [7; 8; 22–25].

В настоящее время в практике проведения расчетов кинетики напряженно-деформированного состояния широко используются программные комплексы, основанные на методе конечных элементов. Они позволяют подробно учитывать широкий ряд геометрических и других особенностей процесса деформирования, задавать реальную геометрию, условия контакта и различные модели поведения материала. Такие программные комплексы хорошо подходят для моделирования процесса изотермической раскатки, который характеризуется объемным напряженно-деформированным состоянием [26–28].

Сложность компьютерного моделирования процесса заключается в недопустимости постановки задачи, как плоской, так и осесимметричной, из-за наличия постоянно смещающегося по спирали от центра заготовки к периферии локального очага деформации и присутствия внеконтактной деформации. При этом скорость деформации материала заготовки изменяется в процессе раскатки в широком диапазоне. В очаге деформации она максимальна и существенно (более чем на порядок) ниже в его окрестностях. Кроме того, процесс деформирования имеет циклический характер, для моделирования которого необходимо использование специальных математических моделей. Математические модели де-

формирования, которые доступны для проведения расчета в существующих программных комплексах, позволяющие учитывать влияние скорости деформации на кинетику напряженно-деформированного состояния, не предназначены для проведения расчетов циклических процессов.

Одной из ключевых задач работы является прогнозирование структуры материала после раскатки. Результаты исследований [29] показывают, что структура материала зависит не от текущего значения напряжений и деформаций, а от их изменения на протяжении всего процесса деформирования. Математические модели, позволяющие проводить оценку структуры материала в упомянутых выше программных комплексах отсутствуют.

Метод прогнозирования структуры гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов

Для формирования требуемой структуры в гранулируемых жаропрочных никелевых сплавах (ЖНС) рационально использовать условия изотермической или близкой к ней деформации. Существенное влияние на размеры зерен при этом оказывают температурно-скоростные условия деформации, которые выбирают с учетом химического состава сплава и требуемой степени деформации.

На температуру деформации значительное влияние оказывает деформационный разогрев, определяемый удельной энергией деформации, для определения которой необходимо знать кинетику напряженно-деформированного состояния, удельную теплоемкость и плотность материала. Таким образом, моделирование процесса формообразования гранулируемых ЖНС должно отражать изменение температуры и напряженно-деформированного состояния в заготовке в процессе деформации.

Удельная механическая энергия деформации W:

$$\dot{W} = \sigma_u \dot{\varepsilon}_u, \tag{1}$$

где ε_u и σ_u – соответственно интенсивность деформации и интенсивность напряжений.

Прирост температуры ΔT вычисляется по формуле:

$$\Delta T = \frac{W}{\rho c_{уд}}, \tag{2}$$

где ρ – плотность материала, $c_{уд}$ – удельная теплоемкость.

Структура материала в процессе изотермической штамповки может быть определена размером рекристаллизованных γ-зерен матрицы d_γ, который зависит от прироста температуры ΔT. Прирост температуры определяется удельной механической энергией деформацией (2).

Для определения конкретных температурного и силового режимов деформации жаропрочных никелевых сплавов с учетом особенностей химического, в частности содержания γ-образующих элементов алюминия и титана, и фазового состава используют разработанную специалистами ИПСМ РАН номограмму [29]. Номограмма была разработана на основании систематических исследований широкой гаммы никелевых сплавов. Расчет размера зерен матрицы выполним по эмпирическому соотношению Зенера и Смита, которое для многих материалов, включая ЖНС [30], хорошо согласуется с экспериментом:

$$d = k \cdot \frac{d_{\gamma'}}{f}, \tag{3}$$

где d – размер рекристаллизованных зерен матрицы, в мкм; $d_{\gamma'}$ – размер частиц γ′-фазы, в мкм; f – объемная доля частиц γ′-фазы; k – эмпирический коэффициент, для никелевых сплавов $k \approx 0{,}83$ [29].

Таким образом, для оценки структуры материала необходимо определить следующую зависимость:

$$d_{\gamma'} = f\left(W\right). \tag{4}$$

Эта зависимость может быть получена путем экспериментальных исследований образцов из материала ЖНС (ВВ751П) путем проведения испытания на осадку с различными степенями деформации и замере размера γ′-фазы после испытания. Удельная механическая энергия деформации W при проведении испытаний может быть определена с помощью следующего выражения:

$$W = \int_0^{\varepsilon_u} \sigma_u d\varepsilon_u, \tag{5}$$

или в численном виде

$$W = \sum_{n=2}^{N} \frac{\sigma_u^n + \sigma_u^{n-1}}{2}\left(\varepsilon_u^n - \varepsilon_u^{n-1}\right), \tag{6}$$

$$\sigma_u^n = \frac{F^n}{S_0}\frac{h^n}{h_0}, \tag{7}$$

$$\varepsilon_u^n = \ln\left(\frac{h^n}{h_0}\right), \tag{8}$$

где n – номер точки измерения, N – количество точек измерения, F^n – измеренное значение нагрузки, приложенной к образцу, h^n – измеренное значение высоты образца, S_0 – начальное значение площади поперечного сечения образца, h_0 – начальное значение высоты образца.

Поскольку замер размера γ′-фазы проводится после проведения испытаний, к диаграмме деформирования следует добавлять точку, соответствующую разгруженному состоянию образца, для которого проводится замер. По результатам серии испытаний на осадку строится зависимость (4).

Проведение испытаний

Для определения степени влияния скорости деформации и температуры деформации на изменение структуры были проведены исследования микроструктуры

образцов из ЖНС с определением размера γ′-фазы при температурах 1050, 1100 и 1150 °С и скоростях деформации $0{,}83 \cdot 10^{-3}$; 0,002; 0,017; 0,1 $с^{-1}$, режимы деформирования приведены в таблице 1 [6; 8–18; 22–26].

Таблица 1

Режимы деформирования образцов из ЖНС

Table 1

Modes of deformation of samples from the HRNA

№ образца	Скорость деформации, $с^{-1}$	Температура, °С	Степень деформации факт, %
1	0,00083	1050	54
2		1100	55
3		1150	54
4	0,002	1050	55
5		1100	55
6		1150	55
7	0,017	1050	42
8		1100	50
9		1150	53
10	0,1	1050	7
11		1100	44
12		1150	54

Деформации подвергались образцы размером Ø10×10 мм из ЖНС в состоянии закалки для определения размера γ′-фазы. Испытания образцов из ЖНС (ВВ751П) проводились на электромеханической испытательной машине WALTER+BAI AG LFM50, которая показана на рис. 1, внешний вид образцов после проведения испытания на осадку с различными степенями деформации показан на рис. 2 [31; 32].



Рис. 1. Испытательная машина WALTER+BAI AG LFM50

Fig. 1. Testing Machine WALTER+BAI AG LFM50



Рис. 2. Образцы из ЖНС после осадки

Fig. 2. Samples from the HRNA after sludge testing

Исследование микроструктуры

Было выполнено исследование микроструктуры с увеличением 10 000 раз. Исследование структуры образцов проводилось на микрошлифах, изготовленных в поперечном сечении образцов. Исследованием микрошлифов установлено (см. рис. 3 и табл. 2):

– в центральной части всех образцов структура имеет зеренное строение; образцы № 1; 2; 3 (со скоростью деформации 0,00083 $с^{-1}$) – рис. 3 (*a–d*):

– на образцах внутри зерна γ′-фаза мелкая, вытянутая. По границам зерен γ′-фаза сохраняет кубоидную форму, по мере увеличения температуры наблюдается укрупнение γ′-фазы;

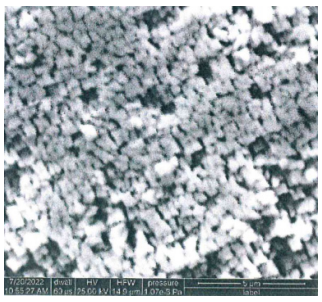
образцы № 4; 5; 6 (со скоростью деформации 0,002 $с^{-1}$) – рис. 3 (*e–g*):

– на образцах № 4 и № 5 при Т=1050 °С и Т=1100 °С внутри зерна γ′-фаза сохраняет кубоидную форму, а на образце № 6 (Т=1150 °С) – γ′-фаза внутри зерна объединена в вытянутые линии. На всех образцах по границам зерен γ′-фаза имеет неправильную форму, по мере увеличения температуры отмечается ее укрупнение;

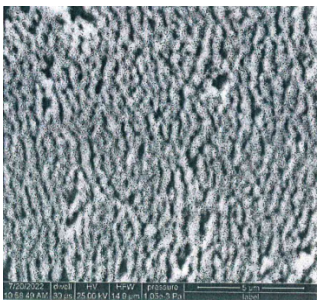
образцы № 7; 8; 9 (со скоростью деформации 0,017 $с^{-1}$) – рис. 3 (*h–j*):

– на образце № 7 внутри зерен γ′-фаза имеет мелкодисперсную кубоидную форму, при увеличении температуры размер γ′-фазы увеличивается, а по границам зерен отдельные частицы γ′-фазы укрупнены;

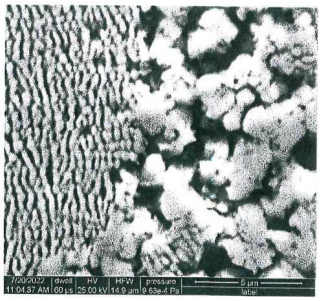
– на образцах № 8 и № 9 – границы широкие, размытые и γ′-фаза имеет неправильную форму, а также на образце № 9 наблюдается объединение γ′-фазы в линии.



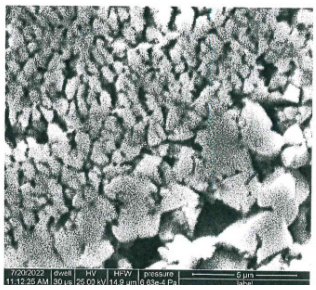
a
образец №1 (граница зерен)



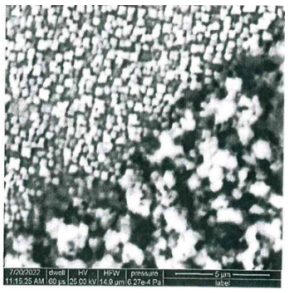
b
образец №1 (зерно)



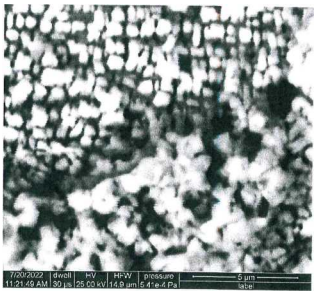
c
образец №2



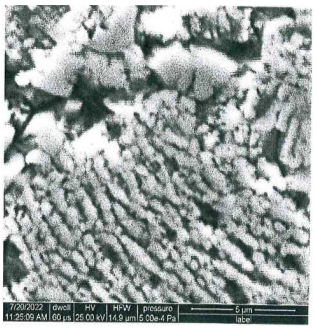
d
образец №3



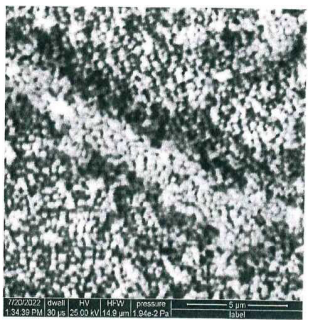
e
образец №4



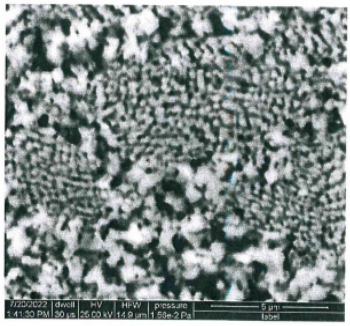
f
образец №5



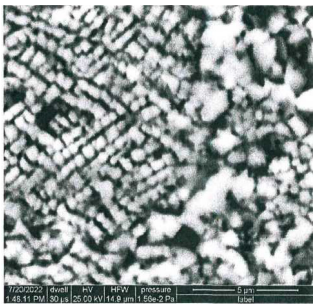
g
образец №6



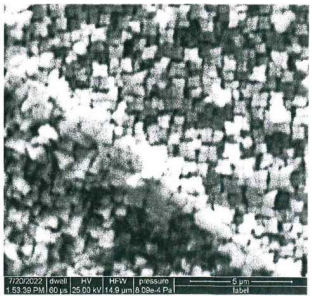
h
образец №7



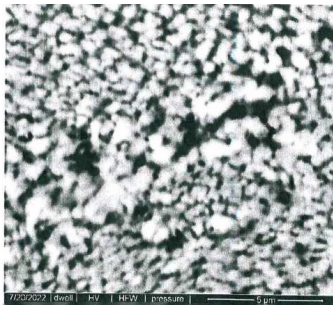
i
образец №8



j
образец №9



k
образец №10



l
образец №11



m
образец №12

Рис. 3. Микроструктуры образцов из ЖНС

Fig. 3. Microstructures of samples from the HRNA

Таблица 2

Результаты измерений γ′-фазы

Table 2

Results of γ′-phase measurements

№ образца	Скорость деформации, $с^{-1}$	Температура, °С	Размер γ′-фазы, мкм	
			внутри зерен	на границе зерен
1	0,00083	1050	0,25–0,5	0,4–0,5
2		1100	0,25×1,2; 0,25×1,5	2–2,5
3		1150	0,7–0,8	2,5–3
4	0,002	1050	0,2–0,3	0,8–1
5		1100	0,5–0,6	1,5–2
6		1150	0,3×2; 0,3×2,5	2–2,5
7	0,017	1050	0,1–0,15	До 0,2
8		1100	0,15–0,2	1–1,15
9		1150	0,35–0,4	1,5–2
10	0,1	1050	0,4	0,6–1,0
11		1100	0,35–0,4	1,0
12		1150	0,5–0,6	1,7–2

образцы № 10; 11; 12 (со скоростью деформации 0,1 $с^{-1}$) – рис. 3 (*k*–*m*):

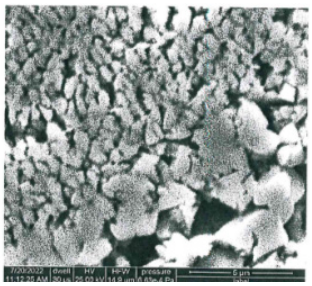
– внутри зерен γ′-фаза сохраняет близкую к кубоидной форму при всех температурах;

– на образце №10 границы четко очерчены; γ′-фаза сохраняет кубоидную форму;

– на образцах № 11 и № 12 – границы размыты, широкие и γ′-фаза имеет неправильную форму.

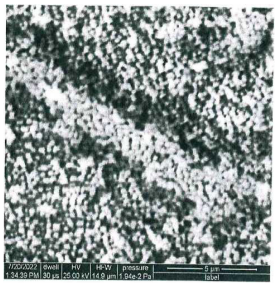
Анализ результатов исследований

Результаты проведенных исследований позволили определить режимы деформирования, при которых определены минимальные и максимальные значения размера γ′-фазы, см. табл. 2 и рис. 4.



Размер γ′-фазы 0,75 мкм при скорости деформации $\dot{\varepsilon} = 0{,}83 \cdot 10^{-3}$ $с^{-1}$ и $T = 1150$°С

a



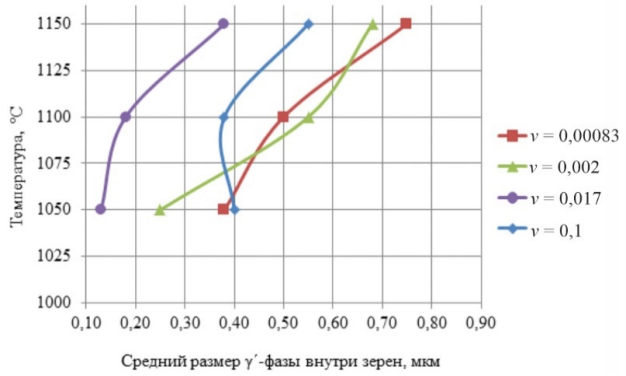
Размер γ′-фазы 0,13 мкм при скорости деформации $\dot{\varepsilon} = 0{,}017$ $с^{-1}$ и $T = 1050$°С

b

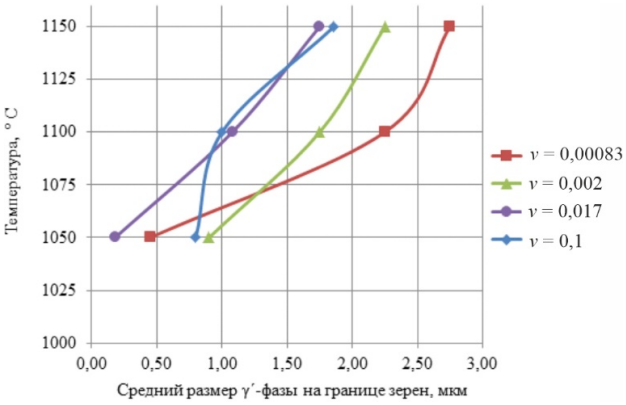
Рис. 4. Микроструктуры образцов из ЖНС: *a* – образец №3; *b* – образец №7

Fig. 4. Microstructures of samples from the HRNA: *a* – sample 3; *b* – sample 7

Также по результатам исследований установлено, что по мере увеличения температуры отмечается укрупнение γ′-фазы как внутри, так и на границе зерен, и соответственно отмечается рост зерен. Также можно отметить, что при минимальных значениях скорости деформации размер γ′-фазы как внутри, так и по границам зерен увеличивается больше, чем при высоких скоростях деформации (рис. 5).



a



b

Рис. 5. Диаграмма зависимости изменения среднего размера γ′-фазы от температуры при разных скоростях деформации: *a* – внутри зерен; *b* – на границе зерен

Fig. 5. Dependence between average size of the γ′-phase and temperature at different strain rates: *a* – inside the grains; *b* – at the grain boundary

Влияние скорости деформации на размер γ′-фазы показан на рис. 6. Можно отметить, что минимальный размер γ′-фазы достигается при скорости деформации 0,017 $с^{-1}$. А также незначительное влияние температуры деформирования начиная с 1100 °С при скоростях выше 0,017 $с^{-1}$.

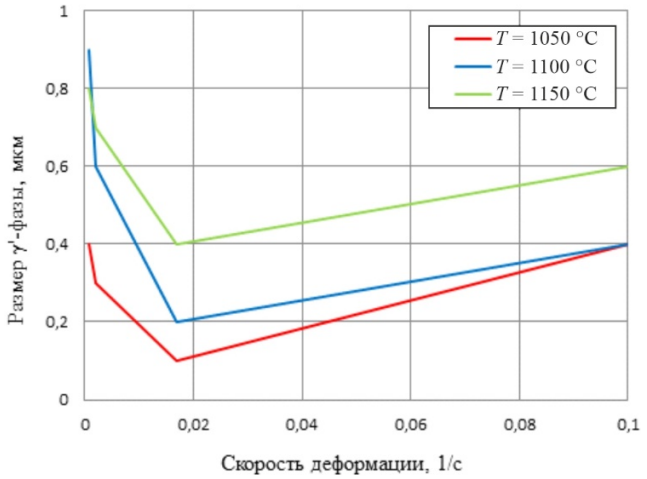


Рис. 6. Влияние скорости деформации на размер γ′-фазы

Fig. 6. Influence of the strain rate on the size of the γ′-phase

Для прогнозирования структуры материала с помощью соотношений (6)–(8) по результатам испытаний определена зависимость размера γ′-фазы от удельной механической энергии деформации для температуры 1050 °С. Полученную экспериментальную зависимость $d_{\gamma'} = f(W)$ можно аппроксимировать кусочно-линейной функцией.

Размер γ′-зерен описывается с помощью следующих соотношений:

$$d_{\gamma'} = \begin{cases} M_{\gamma'}^{(1)} + K_{\gamma'}^{(1)} W, & W < W', \\ M_{\gamma'}^{(2)} + K_{\gamma'}^{(2)} W & W \geq W', \end{cases} \quad (9)$$

где $M_{\gamma'}^{(1)}$, $M_{\gamma'}^{(2)}$, $K_{\gamma'}^{(1)}$, $K_{\gamma'}^{(2)}$ и W' – определяемые параметры материала.

Для определения параметров математической модели деформирования в условиях сжатия сплава ВВ751П при температуре 1050 °С по результатам проведённых испытаний построены истинные диаграммы сжатия. Построенные диаграммы приведены на рис. 7.

В табл. 3 в качестве примера приведены параметры модели деформирования материала ВВ751П при температуре 1050 °С, определенные по результатам испытаний образцов на сжатие.

Заключение

1. Проведены экспериментальные исследования изменения структуры материала ВВ751П при температурах 1050, 1100 и 1150 °С при сжатии образцов с различной скоростью деформации. По результатам испытаний определены размер γ-зерен, механическая энергия деформации и диаграммы деформирования материала.

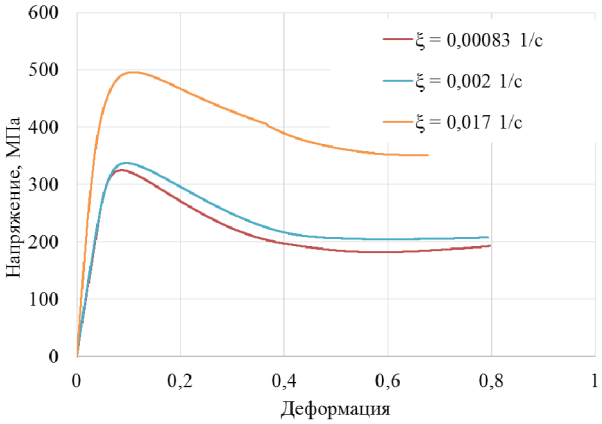


Рис. 7. Истинные диаграммы сжатия материала ВВ751П при температуре 1050 °С

Fig. 7. True compression diagrams of the material VV751P at a temperature of 1050 °C

Таблица 3

Параметры материала ВВ751П при температуре 1050 °С

Table 3

Parameters of material VV751P at a temperature of 1050 °C

Параметр	Обозначение	Значение
Константы функции размера γ′-зерна, мкм	$M_{\gamma'}^{(1)}$	0,9
	$M_{\gamma'}^{(2)}$	-4,64
Модули функции размера γ′-зерна, мкм/МПа	$K_{\gamma'}^{(1)}$	-0,0046
	$K_{\gamma'}^{(2)}$	0,028
Точка перелома функции размера γ′-зерна, МПа	W'	170

2. Разработана методика прогнозирования структуры гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов. Проведены испытания и исследования микроструктуры образцов из материала ЖНС. Осуществлен анализ результатов исследований деформируемости и микроструктуры сплава ЖНС.

3. На основании анализа результатов экспериментальных исследований процесса деформирования материала ВВ751П при сжатии выявлены параметры модели материала, определяющие его структурное состояние.

По результатам проведенных исследований было установлено, что с увеличением температуры деформации отмечается укрупнение γ′-фазы как внутри, так и на границе зерен при всех скоростях деформации. При этом следует отметить, что малые скорости деформации при температурах выше 1100 °С приводят к значительному росту размера γ′-фазы. А также отмечается незначительное влияние температуры деформирования, начиная с 1100 °С при скоростях выше 0,017 $с^{-1}$.

Библиографический список

1. Иноземцев, А.А. Газотурбинные двигатели. Часть 1 / А.А. Иноземцев, В.Л. Сандарский. – Пермь: Изд. ОАО «Авиадвигатель», 2006. – С. 599.
2. Fatigue resistance of the grain size transition zone in a dual microstructure superalloy disk / T.P. Gabb [et al.] // International Journal of Fatigue. – 2011. – Vol. 33, no. 3. – P. 414–426.
3. Каблов, Е.Н. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производств для авиационного двигателестроения / Е.Н. Каблов, Б.С. Ломберг, О.Г. Оспенникова // Крылья Родины. – 2012. – № 3–4. – С. 34.
4. Влияние комбинированного нагружения на параметры штамповки плоских дисков в состоянии сверхпластичности / О.М. Смирнов [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 1997. – № 1. – С. 1.
5. Исследования и разработка инновационных технологических процессов и интеллектуальных систем управления для изготовления деталей газотурбинных двигателей (ГТД) / В.Л. Афонин [и др.]. – М.: ИМАШ, 2019. – 137 с.
6. Кукса, Л.В. Исследования микромеханизма деформации сплава ЭП741П при различных температурах испытания / Л.В. Кукса, Е.Н. Рудницкий, О.Х. Фаткуллин // Металлургия гранул: сб. статей. – 1989. – Вып. 5. ВИЛС. – С. 265-271.
7. Исследование материала заготовок дисков с переменной структурой из гранул жаропрочных никелевых сплавов, изготовленных по технологии прямого ГИП / Д.А. Егоров, Г.С. Гарибов, Н.М. Гриц, А.М. Казберович, Н.А. Рыжова // Технология легких сплавов. – 2014. – № 3.
8. Исследование механизма формирования структуры при горячей деформации и термической обработке заготовок турбинных дисков из гранулированного сплава ЭП741НП / Д.Д. Ваулин, О.Н. Власова, Л.Д. Бер, Е.Б. Качанов, О.Г. Уколова // Технология легких сплавов. – 2009. – № 4.
9. Lemsky, J. Assessment of NASA Dual Microstructure Heat Treatment Method Utilizing Ladish Super Cooler^{TM} Cooling Technology / J. Lemsky // NASA/CR. – 2005-213574.
10. Gayda, J. Dual Microstructure Heat Treatment of a Nickel-Base Disk Alloy / J. Gayda // NASA/TM – 2001-211168.
11. Heat Treatment Technology for Production of Dual Microstructure Superalloy Disks / J. Gayda, T. Gabb, P. Kantzos, D. Furrer // NASA/TM. – 2002-211558.
12. Furrer, D. Dual-Microstructure Heat Treatment. Advanced Materials and Processes / D. Furrer, J. Gayda. – July 2003. – P. 36–39.
13. Gayda, J. High Temperature Burst Testing of a Superalloy Disk with a Dual Microstructure / J. Gayda, P. Kantzos // NASA/TM. – 2004-212884.
14. Lemsky, J. Assessment of NASA Dual Microstructure Heat Treatment Method for Multiple Forging Batch Heat Treatment / J. Lemsky // NASA/NV. – 2004-212950.
15. Montero, R. NASA/P&W Dual Microstructure Heat Treat Program / R. Montero // NASA/TM. – 2004-213088.
16. Кононов, С.А. Структура и свойства гранулированного сплава ЭП741НП, полученного по технологии, включающей горячее изостатическое прессование и обработку давлением / С.А. Кононов, А.С. Перевозов, Б.А. Колачев // Металлы. – 2007. – № 5. – С. 86–89.
17. Волков, А.М. Образование и рост зерен в дисковых гранулируемых жаропрочных никелевых сплавах / А.М. Волков, А.В. Востриков // Новости Материаловедения. Наука и техника. – № 2. – 2017. – С. 3–11.
18. Валитов, В.А. Исследование механизма формирования ультрамелкозернистой структуры дуплексного типа в никелевом сплаве при деформационно-термической обработке / В.А. Валитов // Материалы 10 Международной научно-инновационной молодежной конференции. – 2018. – С. 15–31.
19. Валитов, В.А. Сверхпластичность жаропрочных никелевых сплавов с микро-, субмикро- и нанокристаллической структурой и перспективы ее использования для получения сложнопрофильных деталей / В.А. Валитов // Тяжелое машиностроение. – 2007. – № 4. – С. 23.
20. Superplastic behavior of a powder metallurgy superalloy during isothermal compression / L. Tan, Y. Li, F. Liu [et al.] // J. of Materials Science & Technology. – 2019. – Vol. 35, no. 11. – P. 2591.
21. Утяшев, Ф.З. Механика интенсивной пластической деформации в процессах измельчения зерен в суперсплавах / Ф.З. Утяшев, Р.Ю. Сухоруков // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. – 2022. – Т. 504. – С. 66.
22. Влияние деформационно-термической обработки на микроструктуру и сверхпластические свойства порошкового никелевого сплава ЭП741НП / А.А. Ганеев, В.А. Валитов, М.И. Нагимов, В.М. Имаев // Письма о материалах 10 (1). – 2020. – С. 100–105.
23. Влияние деформационно-термической обработки на формирование градиентной структуры и механических свойств в диске из гранульного никелевого сплава / А.А. Ганеев, В.А. Валитов, Ф.З. Утяшев, В.М. Имаев // Физика металлов и металловедение. – 2019. – Т. 120, № 4. – С. 442–448.
24. Ганеев, А.А. Формирование ультрамелкозернистой структуры в никелевом сплаве ЭП741НП при горячей деформации в (γ+γ′)-области / А.А. Ганеев, В.А. Валитов // Письма о материалах. – 2015. – Т. 5(2). – С. 152–155.
25. Волков, А.М. Влияние температурных режимов закалки на структуру и механические свойства дискового гранулируемого жаропрочного никелевого сплава / А.М. Волков, Г.С. Гарибов // Металлургия гранул. Композиционные материалы. – 2013. – № 2. – С. 51–56.
26. Моделирование структурообразования в процессе горячей деформации заготовок деталей ГТД из жаропрочного никелевого сплава / И.А. Бурлаков, В.А. Валитов, А.А. Ганеев, Д.М. Забельян, С.В. Морозов, Р.Ю. Сухоруков, Ф.З. Утяшев // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2016. – № 1. – С. 94–101.
27. Бурлаков, И.А. Автоматическая линия для изотермической раскатки заготовок дисков газотурбинных двигателей / И.А. Бурлаков, В.В. Морозов, С.В. Морозов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. – № 5. – С. 26–28.
28. Морозов, С.В. Методы расчета сил деформирования при раскатке дисков из жаропрочных сплавов на автоматической линии АЛРД-800. Труды международной научной конференции «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения» / С.В. Морозов, В.В. Морозов. – М.: Изд-во «Институт компьютерных исследований», 2013. – С. 69.
29. Кайбышев, О.А. Сверхпластичность, измельчение микроструктуры и обработка труднодеформируемых сплавов / О.А. Кайбышев, Ф.З. Утяшев. – М.: Наука, 2002. – 438 с.
30. Утяшев, Ф.З. Термомеханические режимы получения ультрамелкозернистых структур в жаропрочных никелевых сплавах / Ф.З. Утяшев, В.А. Валитов // Технология легких сплавов. – 1989. – № 2. – С. 63–67.
31. ГОСТ 25.503-97. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие. – М.: Стандартинформ, 2005. – 25 с.
32. ГОСТ 8817-82 (СТ СЭВ 2839-81). Металлы. Метод испытания на осадку. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 3 с.

References

1. A.A. Inozemtsev, V.L. Sandarsky. Gas turbine engines. Part 1 – Perm//Ed. Aviadvigatel OJSC. – 2006. – p. 599.
2. Gabb T. P. et al. Fatigue resistance of the grain size transition zone in a dual microstructure superalloy disk // International Journal of Fatigue. – 2011. – T. 33. – №. 3. – pp. 414-426.
3. Kablov E.N., Lomberg B.S., Ospennikova O.G. Creation of modern heat-resistant materials and technologies for their production for aircraft engine building // Wings of the Motherland. 2012. No. 3–4. P. 34.
4. Smirnov O.M. et al. The influence of combined loading on the parameters of stamping flat disks in a state of superplasticity // Processing of materials by pressure. 1997. No. 1. P. 1.
5. Afonin V.L. et al. Research and development of innovative technological processes and intelligent control systems for the manufacture of gas turbine engine (GTE) parts. M.: IMASH, 2019. p 137.
6. Kuksa L.V., Rudnitsky E.N., Fatkullin O.K. Studies of alloy deformation micromechanism EP741P at different test temperatures//Granule metallurgy. Sat. articles, no. 5. VILS, – 1989 – pp. 265-271.
7. D.A. Egorov, G.S. Garibov, N.M. Grits, A.M. Kazberovich, N.A. Ryzhov. Study of the material of blanks of disks with a variable structure from pellets of heat-resistant nickel alloys manufactured using direct HIP technology//Light alloy technology. – 2014. – №3.
8. D.D. Vaulin, O.N. Vlasova, L.D. Ber, E.B. Kachanov, O.G. Ukolova. Investigation of structure formation mechanism at hot deformation and heat treatment of turbine disk blanks from granulated alloy EP741NP//Technology of light alloys. – 2009. –№4.
9. Joe Lemsky. Assessment of NASA Dual Microstructure Heat Treatment Method Utilizing Ladish Super Cooler^{TM} Cooling Technology // NASA/CR – 2005-213574.
10. John Gayda. Dual Microstructure Heat Treatment of a Nickel-Base Disk Alloy // NASA/TM – 2001-211168.
11. J. Gayda, T. Gabb, P. Kantzos and D. Furrer. Heat Treatment Technology for Production of Dual Microstructure Superalloy Disks // NASA/TM – 2002-211558.
12. D. Furrer and J. Gayda. Dual-Microstructure Heat Treatment. Advanced Materials and Processes. – July 2003. – pp. 36-39.
13. J. Gayda and P. Kantzos. High Temperature Burst Testing of a Superalloy Disk with a Dual Microstructure // NASA/TM – 2004-212884.
14. J. Lemsky. Assessment of NASA Dual Microstructure Heat Treatment Method for Multiple Forging Batch Heat Treatment. // NASA/NV – 2004-212950.
15. R. Montero. NASA/P&W Dual Microstructure Heat Treat Program // NASA/TM – 2004-213088.
16. Kononov S.A., Perevozov A.S., Kolachev B.A. Structure and properties of granulated EP741NP alloy obtained by technology including hot isostatic pressing and pressure treatment // Metals.2007. – No. 5. – pp. 86-89.
17. A.M. Volkov, A.V. Vostrikov. Formation and growth of grains in disk granulated heat-resistant nickel alloys // News of Materials Science. Science and technology. – No. 2. – 2017. – pp. 3-11.
18. Valitov V.A. Investigation of the mechanism of formation of ultrafine-grained duplex structure in nickel alloy during deformation and heat treatment. // Proceedings of the 10th International Scientific and Innovative Youth Conference: October 24 – 26, 2018. – pp. 15-31.
19. Valitov V.A. Superplasticity of heat-resistant nickel alloys with micro-, submicro- and nanocrystalline structure and prospects for its use for producing complex-profile parts // Heavy engineering. 2007. No. 4. P. 23.
20. Tan L., Li Y., Liu F. et al. Superplastic behavior of a powder metallurgy superalloy during isothermal compression // J. of Materials Science & Technology. 2019. Vol. 35. No. 11. P. 2591.
21. Utyashev F.Z., Sukhorukov R.Yu. Mechanics of intense plastic deformation in the processes of grain refinement in superalloys // Reports of the Russian Academy of Sciences. Physics, Technical Sciences. 2022. Vol. 504. P. 66.
22. Ganeev A.A., Valitov V.A., Nagimov M.I., Imaev V.M. Influence of deformation-heat treatment on microstructure and superplastic properties of powder nickel alloy EP741NP // Letters about materials 10 (1). – 2020. – pp. 100-105.
23. A.A. Ganeev, V.A. Valitov, F.Z. Utyashev, V.M. Imaev. Influence of deformation-heat treatment on the formation of gradient structure and mechanical properties in a disk made of granular nickel alloy // Physics of Metals and Metallology. – 2019. – volume 120. – No. 4. – pp. 442-448.
24. A.A. Ganeev, V.A. Valitov. Formation of an ultrafine–grained structure in the EP741NP nickel alloy under hot deformation in the (γ+γ′) – region // Letters about materials 5(2). – 2015. – pp. 152-155.
25. Volkov A.M., Garibov G.S. The influence of tempering temperature regimes on the structure and mechanical properties of a disk granulated heat-resistant nickel alloy // Metallurgy of granules. Composite materials. – 2013. – No. 2. – pp. 51-56.
26. Burlakov I.A., Valitov V.A., Ganeev A.A., Zabelyan D.M., Morozov S.V., Sukhorukov R.Yu., Utyashev F.Z. Modeling of structure formation in the process of hot deformation of gas turbine engine parts blanks from heat-resistant nickel alloy // Problems of mechanical engineering and automation. – 2016. – No. 1. – pp. 94 – 101.
27. Burlakov I.A., Morozov V.V., Morozov S.V. Automatic line for isothermal rolling of gas turbine engine disk blanks // Procurement production in mechanical engineering. – 2012. – No. 5. – pp. 26-28.
28. Morozov S.V., Morozov V.V. Methods for calculating deformation forces when rolling discs made of heat-resistant alloys on the automatic ALRD-800 line. Proceedings of the international scientific conference "Machines, technologies and materials for modern mechanical engineering" // Moscow: Publishing House "Institute of Computer Research". – 2013. – p. 69.
29. Kaybyshev O.A., Utyashev F.Z. Superplasticity, microstructure grinding and processing of difficult-to-deform alloys//M:. Science, – 2002. – p. 438.
30. Utyashev F.Z., Valitov V.A. Thermomechanical modes of obtaining ultra-fine-grained structures in heat-resistant nickel alloys//Technology of light alloys. – 1989. – №2. – pp. 63-67.
31. GOST 25.503-97 Calculations and strength tests. Methods of mechanical testing of metals. Compression test method // M.: Standartinform. – 2005. – p 25.
32. GOST 8817-82 (ST SEV 2839-81) Metals. Sediment test method// Moscow: Publishing House of Standards. – 1987. – p 3.

Финансирование. Статья не имела спонсорской поддержки.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.

Financing. The study was not sponsored.
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
The contribution of the authors is equivalent.