

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО ГРАНУЛИРУЕМОГО СПЛАВА ЭП962НП ПРИ ДЕФОРМАЦИИ В ДВУХФАЗНОЙ ОБЛАСТИ СО СКОРОСТЯМИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ШТАМПОВКИ И СООТВЕТСТВУЮЩИЕ ДЕФОРМАЦИИ СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

© 2017 г. Д.В. Рынденков, А.С. Перевозов, Е.Н. Рыбанцова, М.Г. Хомутов

АО «Ступинская металлургическая компания», г. Ступино

Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ) «МИСиС», г. Москва

Статья поступила в редакцию 02.12.15 г., доработана 29.04.16 г., подписана в печать 11.05.16 г.

Приведены результаты термомеханических испытаний на комплексе физического моделирования термомеханических процессов «Gleeble System 3800» жаропрочного никелевого гранулируемого сплава ЭП962НП при температурах деформации 1100, 1150 и 1200 °С со скоростями деформации 0,1 и 1 с⁻¹. Представлены данные об изменениях микроструктуры образцов в процессе деформации. Установлены условия получения в сплаве ультрамелкозернистой структуры, необходимой для реализации механизма сверхпластичности. На основании полученных реологических характеристик определены рекомендуемые режимы термомеханической обработки изделий из сплава ЭП962НП, который превосходит по комплексу прочностных свойств и жаропрочности наиболее распространенные отечественные гранулируемые никелевые сплавы. Представляет интерес возможность получения изделий из этого сплава по технологии «ГИП + деформация»: реализация этого подхода позволит дополнительно улучшить характеристики данного сплава.

Ключевые слова: ЭП962НП, реологические характеристики, технология «ГИП + деформация», горячее изостатическое прессование (ГИП), жаропрочные никелевые сплавы, металлургия гранул.

Рынденков Д.В. — канд. техн. наук, зам. гл. металлурга АО «Ступинская металлургическая компания» (СМК) (142800, Московская обл., г. Ступино, ул. Пристанционная, вл. 2). Тел.: (496) 644-74-40. E-mail: ryndenkov@smk.ru.

Перевозов А.С. — техн. директор АО «СМК». Тел.: (496) 644-76-64. E-mail: perevozov@smk.ru.

Рыбанцова Е.Н. — нач.-к технол. бюро по статистике и исследованиям АО «СМК». Тел.: (496) 644-74-40. E-mail: rybantsova@smk.ru.

Хомутов М.Г. — мл. науч. сотр. лаборатории деформационно-термических процессов НИТУ «МИСиС» (119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). Тел.: (499) 236-64-50. E-mail: khomutov@misis.ru.

Для цитирования: Рынденков Д.В., Перевозов А.С., Рыбанцова Е.Н., Хомутов М.Г. Реологические свойства жаропрочного никелевого гранулируемого сплава ЭП962НП при деформации в двухфазной области со скоростями промышленной штамповки и соответствующие деформации структурные изменения // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2017. No. 1. С. 69–75. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-69-75.

Ryndenkov D.V., Perevozov A.S., Rybantsova E.N., Khomutov M.G.

Rheological properties of EP962NP heat-resistant granulated nickel alloy deformed in two-phase field at production-scale die forging rates and structural changes relevant to deformation

The paper specifies the results obtained during hot deformation tests of EP962NP heat-resistant granulated nickel alloy in the Gleeble System 3800, a thermo-mechanical physical simulation system, at deformation temperatures of 1100, 1150 and 1200 °C and deformation rates of 0,1 and 1 s⁻¹. The data on changes in the sample microstructure during deformation are provided. Conditions are determined for obtaining ultrafine alloy structure required to implement the superplasticity mechanism. Based on rheological properties, the paper determines recommended modes for hot deformation treatment of products made of EP962NP that surpasses the most common domestic granulated nickel alloys by the complex of strength properties and heat-resistance. The possibility to make products of this alloy using the «HIP + deformation» technology is of interest: implementation of this approach will further improve the properties of this alloy.

Keywords: EP962NP, rheological properties, «HIP + deformation» technology, hot isostatic pressing (HIP), nickel superalloys, powder metallurgy.

Ryndenkov D.V. — Cand. Sci. (Tech.), deputy of chief metallurgist of Stupino Metallurgical Company (SMK) (142800, Russia, Stupino, Pristantsionnaya, 2). E-mail: ryndenkov@smk.ru.

Perevozov A.S. – technical director of SMK. E-mail: perevozov@smk.ru.

Rybantsova E.N. – chief of statistic department of SMK. E-mail: rybantsova@smk.ru.

Khomutov M.G. – junior research officer of Thermodeformation processes laboratory, National University of Science and Technology «MISIS» (119049, Russia, Moscow, Leninskii pr., 4). E-mail: khomutov@misis.ru.

Citation: Ryndenkov D.V., Perevozov A.S., Rybantsova E.N., Khomutov M.G. Reologicheskie svoystva zharoprochnogo nikelovogo granuliruемого сплава EP962NP pri deformatsii v dvukhfaznoi oblasti so skorostyami promyshlennoi shtampovki i sootvetstvuyushchie deformatsii strukturnye izmeneniya. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2017. No. 1. P. 69–75.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-69-75.

Введение

Гранульная металлургия жаропрочных никелевых сплавов ориентируется в первую очередь на получение заготовок методом прямого компактирования (горячего изостатического прессования — ГИП, или «as HIP»), без последующей деформации. Особенностью никелевых сплавов, используемых для получения изделий методом металлургии гранул, является то, что они обладают комплексом более высоких механических и эксплуатационных характеристик, чем у других деформируемых сплавов [1–5].

Постоянно возрастающие требования к материалам со стороны авиационных двигателестроителей [4, 6] заставляют искать пути повышения уровня свойств жаропрочных никелевых сплавов. Уже в первые годы промышленного производства дисков для авиационных двигателей методом металлургии гранул появились сведения об изучении влияния пластической деформации на свойства компактов из гранул никелевых сплавов [2, 7, 8].

К настоящему времени в России разработан ряд гранулируемых никелевых сплавов нового поколения. Для них характерна более высокая степень легирования по сравнению с наиболее распространенными отечественными сплавами ЭП741НП и

ЭП962П. Их свойства в газостатированном состоянии также выше [4, 9, 10].

Сплав ЭП962НП [9–12] является высоколегированным высокопрочным сплавом с общим содержанием легирующих элементов около 45 %. По своему химическому составу он сопоставим с разработанными за последние несколько лет отечественными сплавами типа ВВ750П, ВЖ175-ИД и рядом других композиций, проходящих в настоящее время промышленное опробование. Гарантируемые характеристики сплава ЭП962НП, а также результаты его промышленного опробования в варианте «as HIP» приведены в табл. 1. Там же для сравнения даны свойства сплавов ЭП741НП и ЭП962П.

Имеется обоснованное ожидание того, что деформация изготовленных из сплава ЭП962НП компактов позволит обеспечить дополнительный прирост прочностных и эксплуатационных показателей [9, 10].

Высоколегированные жаропрочные никелевые сплавы обладают пониженной пластичностью. По классификации причин пониженной пластичности М.Я. Дзугутова, их низкая пластичность в однофазном состоянии связана с ограничением или

Таблица 1

Механические свойства и жаропрочность никелевого гранулируемого сплава ЭП962НП в сравнении со сплавами ЭП741НП и ЭП962П

Сплав	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	ψ , %	KCU, кгс·м/см ²	σ_{100}^{650} , кгс/мм ²
ЭП741НП	145	102	18	18	4,0	102
ЭП962П	150	110	10	12	2,3	105
ЭП962НП*	157/162	115/120	12/18	13/18	2,8/3,5	110/112

* В числителе – гарантируемые свойства, в знаменателе – фактические по результатам промышленного опробования. σ_B – предел временного сопротивления разрыву; $\sigma_{0,2}$ – предел текучести; δ – относительное удлинение; ψ – относительное сужение; KCU – ударная вязкость, определенная на образце с U-образной канавкой; σ_{100}^{650} – напряжение при проведении длительных испытаний (испытаний жаропрочности): верхний индекс показывает температуру испытания, °С, а нижний – время, в течение которого образец гарантированно выдерживает указанное напряжение.

Таблица 2
Матрица эксперимента

Температура, °С	Степень деформации (ϵ), %	Скорость деформации ($\dot{\epsilon}$), с ⁻¹
1100	25	1,0
	40	
	25	0,1
	40	
1150	25	1,0
	40	
	25	0,1
	40	
1200	25	1,0
	40	
	25	0,1
	40	

затормаживанием внутрзеренной и межзеренной деформации, обусловленными высоким легированием твердого раствора без образования избыточной упрочняющей фазы (тип ПП1а) [13]. В связи с этим их деформацию следует осуществлять в двухфазной области [2, 7, 8, 14]. Деформацию компактированных заготовок в промышленных условиях предполагается вести на гидравлическом прессе. Исходя из этих предпосылок была составлена температурно-скоростная матрица эксперимента (табл. 2).

Методика проведения эксперимента

Для выполнения эксперимента была изготовлена модельная заготовка в виде диска диаметром 200 мм и высотой 25 мм (все этапы ее изготовления осуществлялись на промышленном оборудовании по серийной технологии). После газостатирования при $t = 1200$ °С она подвергалась отжигу с той же температуры со скоростью охлаждения в печи 30 °С/ч до $t = 700$ °С, далее на воздухе. После отжига с нее снималась капсула и вырезалось кольцо сечением 15 × 15 мм.

Из кольца изготавливали микрошлифы для оценки температуры полного растворения γ' -фазы. Для этого образцы закаливали в струе воздуха с различных температур от 1170 до 1210 °С с шагом 10 °С. После закалки из образцов готовили микрошлифы с травлением в трехкислотном

реактиве (5 г $\text{CuSO}_4 + 92 \text{ см}^3 \text{ HCl} + 5 \text{ см}^3 \text{ H}_2\text{SO}_4 + 3 \text{ см}^3 \text{ HNO}_3 + 75 \text{ см}^3$ этилового спирта). Температуру полного растворения γ' -фазы определяли по наблюдаемой в оптическом микроскопе «К. Zeiss Axiovert 40 MAT» микроструктуре: за нее принималась температура, обеспечивающая отсутствие γ' -фазы в закаленном образце.

Из того же кольца изготавливали цилиндрические образцы диаметром 10 мм и высотой 15 мм, которые подвергали осадке на комплексе физического моделирования термомеханических процессов «Gleeble System 3800».

С целью определения кривых текучести, первичные результаты испытания были скорректированы с учетом адиабатического разогрева образца во время деформации и с учетом трения, возникающего между бойками и образцом [15, 16].

После осадки образцы разрезали вдоль осевой линии для изготовления микрошлифов. Шлифы готовили и изучали аналогично шлифам для определения температуры полного растворения γ' -фазы.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Температура полного растворения γ' -фазы для сплава ЭП962НП для данной плавки находится в интервале 1200–1210 °С. Причем ее содержание при $t = 1200$ °С настолько незначительно, что эту температуру можно считать температурой полного растворения γ' -фазы.

Кривые текучести, построенные по результатам испытаний, приведены на рис. 1. Видно, что

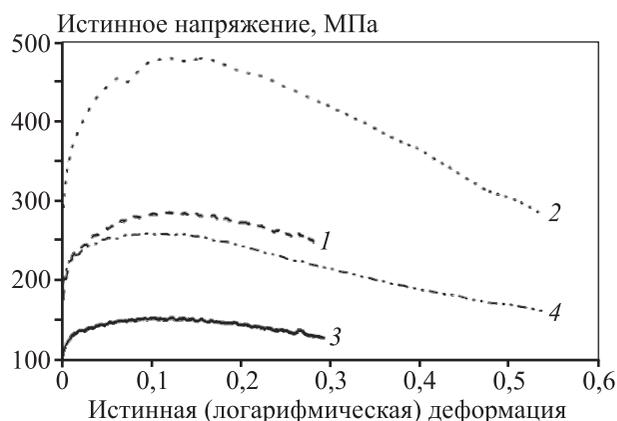


Рис. 1. Кривые текучести сплава ЭП962НП при разных температурах и скоростях деформации $t = 1100$ °С (1, 2) и 1150 °С (3, 4) $\dot{\epsilon} = 0,1 \text{ с}^{-1}$ (1, 3) и 1 с^{-1} (2, 4)

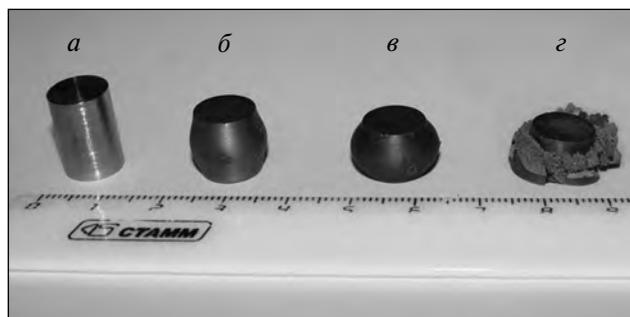


Рис. 2. Внешний вид образцов

- a* – исходное состояние
- б* – осадка на 25 % при $t = 1100$ и 1150 °С
- в* – осадка на 40 % при $t = 1100$ и 1150 °С
- г* – разрушенный образец при попытке его осадки при $t = 1200$ °С

при малых степенях деформации с уменьшением скорости деформации уровень напряжения снижается примерно в 1,5 раза, а при увеличении температуры — в 2 раза.

Внешний вид образцов после испытания представлен на рис. 2. При температурах 1100 и 1150 °С все образцы успешно выдержали осадку на 25 % при скоростях деформации 0,1 и 1 с^{-1} . Осадку на 40 % приводит к возникновению мелких слабозаметных трещин по образующей. В результате осадки при $t = 1200$ °С при всех режимах испытания наблюдается разрушение образца, которое носит хрупкий характер: образец разрушается сразу, без образования «бочки», с выкрашиванием металла из средней части.

В процессе деформации с выбранными параметрами (см. табл. 2) микроструктура сплава претерпевает характерные изменения. Исходная структура приведена на рис. 3. Она представлена

равноосными зернами размером ~ 50 мкм и значительным количеством γ' -фазы, расположенной как в теле зерна, так и вдоль границ. Границы зерна как таковые не выявляются, но различить соседние зерна можно по расположению зернограничной γ' -фазы и по различной яркости матрицы и выделений γ' -фазы, обусловленной различной кристаллографической ориентировкой зерен.

Разницы в микроструктуре образцов, осажённых при выбранных параметрах деформации, при сравнении по скоростям деформации, не выявлено. В связи с этим ее дальнейшее сопоставление осуществлялось без привязки к величине $\dot{\epsilon}$. Последующие фотографии получены на образцах, продеформированных при $\dot{\epsilon} = 0,1 \text{ с}^{-1}$, что соответствует условиям промышленной штамповки на прессах.

Микроструктура образцов после деформации представлена на рис. 4. При деформации исходное зерно вытягивается и приобретает размеры $\sim 70 \times 30$ мкм после осадки на 25 % при $t = 1100$ и 1150 °С и $\sim 80 \times 20$ мкм при $\epsilon = 40$ % и $t = 1100$ °С (см. рис. 4). В структуре образцов, осажённых на 40 % при температуре 1150 °С, формируются зерна размером менее 10 мкм. В образцах, деформируемых при $t = 1100$ °С, а также в подвергнутых осадке при $\epsilon = 25$ % и $t = 1150$ °С, такие зерна отсутствуют (рис. 5).

Структура, приведенная на рис. 5, б, характеризующаяся ультрамелким ($d < 10$ мкм) зерном, пригодна для дальнейшего деформирования в условиях сверхпластичности [17].

Анализ приповерхностного слоя образцов после деформации на 40 % при $t = 1100$ и 1150 °С вы-

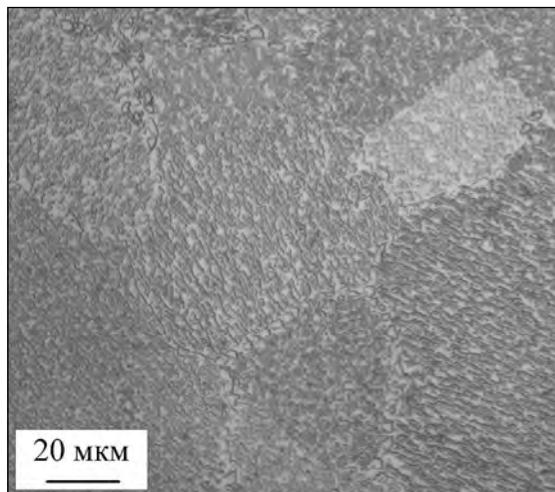
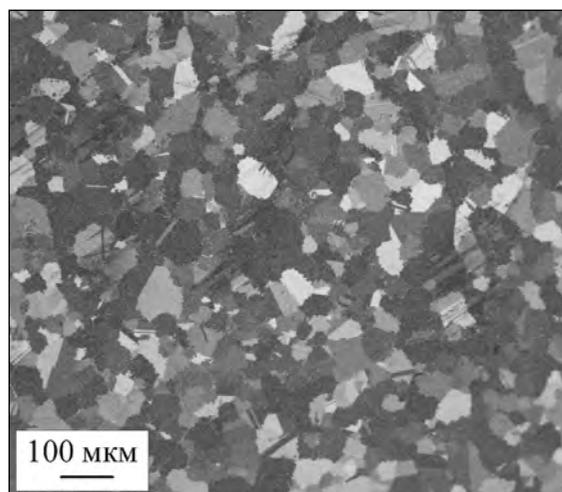


Рис. 3. Исходная структура образцов в отожженном состоянии

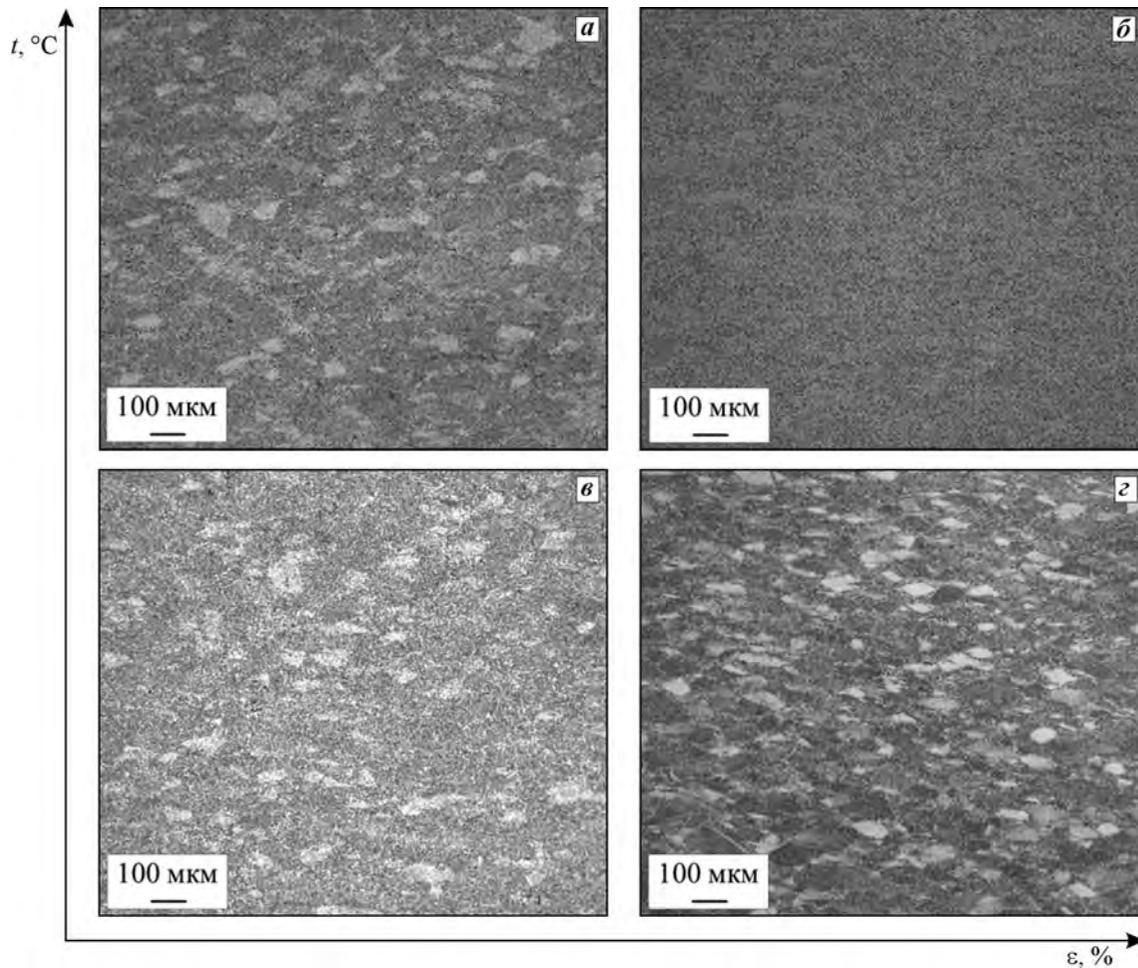


Рис. 4. Микроструктура образцов, осаженных при различной температуре на различную степень деформации при скорости деформации $0,1 \text{ с}^{-1}$
a – $t = 1150 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 25 \%$; *б* – $1150 \text{ }^\circ\text{C}$, 40% ; *в* – $1100 \text{ }^\circ\text{C}$, 25% ; *г* – $1100 \text{ }^\circ\text{C}$, 40%

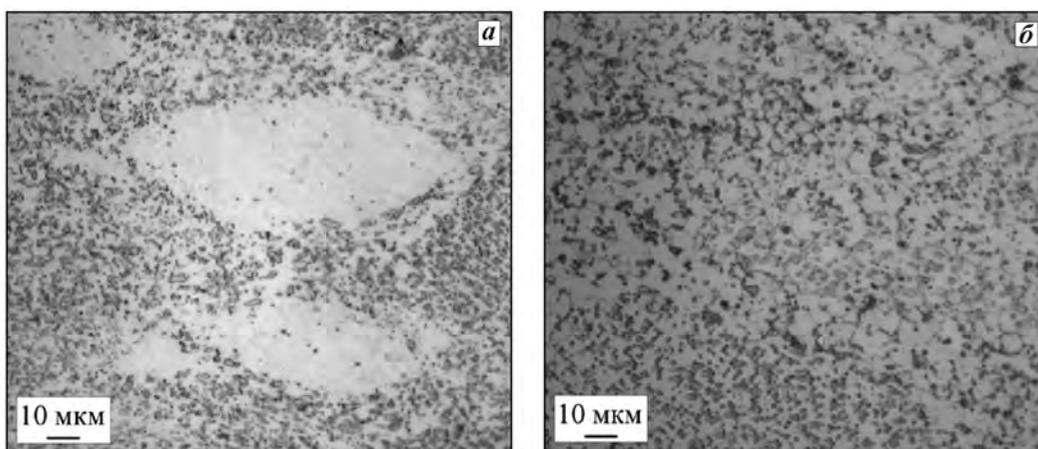


Рис. 5. Микроструктура образцов, осаженных при $t = 1150 \text{ }^\circ\text{C}$ на 25% (*a*) и 40% (*б*)

явил наличие в нем трещин (рис. 6). Тем не менее отказываться от деформирования сплава в этом случае не следует: в промышленных условиях в хо-

де последующей после деформации механической обработки заготовки трещины могут быть выведены механическим способом.

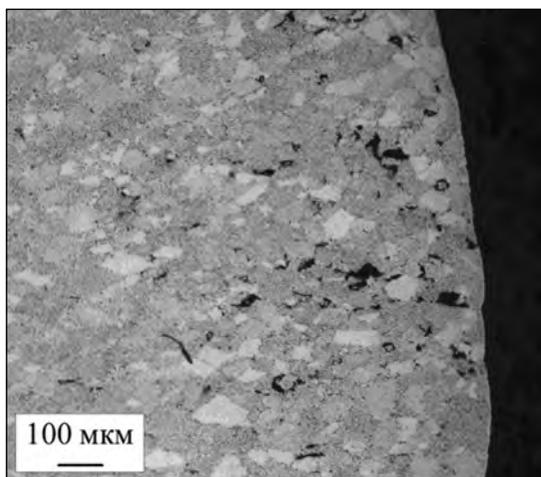


Рис. 6. Микроструктура образца в зоне «бочки» после осадки на 40 %

Выводы

1. Изучены реологические характеристики сплава ЭП962НП при осадке из двух- и однофазной областей. Показано, что при температурах 1100 и 1150 °С сплав поддается осадке при скоростях деформации 0,1 и 1 с⁻¹.

2. Различия в микроструктуре образцов, осажденных при $\dot{\epsilon} = 1$ и 0,1 с⁻¹, отсутствуют.

3. В случае осадки при температуре 1150 °С на 40 % в структуре образца формируется ультрамелкозернистая структура, необходимая для деформации материала в условиях сверхпластичности.

4. Осадка при температуре 1200 °С, соответствующей однофазной области, приводит к разрушению образца.

Литература

1. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / Под ред. Ч.Т. Симса, Н.С. Столофа, У.К. Хагеля. Пер. с англ. В 2 кн. Кн. 2 / Под ред. Р.Е. Шалина. М.: Металлургия, 1995.
2. Белов А.Ф., Аношкин Н.Ф., Фаткуллин О.Х. Структура и свойства гранулируемых никелевых сплавов. М.: Металлургия, 1984.
3. Белов А.Ф. Настоящее и будущее металлургии гранул // Металлургия гранул. М.: ВИЛС, 1983. Вып. 1. С. 5—13.
4. Гарибов Г.С. Новые наноструктурированные гранулированные материалы для газотурбинных технологий // Технол. легких сплавов. 2014. No. 2. С. 53—56.

5. Гарибов Г.С., Гриц Н.М., Волков А.М., Востриков А.В., Федоренко Е.А. Металловедческие аспекты производства заготовок дисков из гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов методом ГИП // Технол. легких сплавов. 2014. No. 3. С. 54—58.
6. Иноземцев А.А., Аношкин Н.Ф., Башкатов И.Г., Гарибов Г.С., Коряковцев А.С. Применение дисков из гранул жаропрочных никелевых сплавов в серийных ГТД авиационной и наземной техники // Перспективные технологии легких и специальных сплавов. М.: Физматлит, 2006. С. 371—376.
7. Аношкин Н.Ф. Некоторые аспекты качества жаропрочных и высокопрочных материалов, изготавливаемых методом металлургии гранул // Металлургия гранул. М.: ВИЛС, 1986. Вып. 3. С. 3—23.
8. Виноградова Н.И., Еременко В.И., Крыкина Г.С., Маханек Г.В., Петрова С.Н. Влияние высокотемпературной деформации на структуру сплава ЭП962, полученного металлургией гранул // Металлургия гранул. М.: ВИЛС, 1988. Вып. 4. С. 290—294.
9. Логунов А.В., Шмотин Ю.Н. Современные жаропрочные никелевые сплавы для дисков газовых турбин (материалы и технологии). М.: Наука и технологии, 2013.
10. Фаткуллин О.Х., Еременко В.И., Власова О.Н., Гриц Н.М. Повышение механических свойств гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов за счет легирования и обработки давлением // Технол. легких сплавов. 2001. No. 5-6. С. 149—155.
11. Давыдов А.К., Миронов В.И., Кононов С.А., Перевозов А.С. Жаропрочный никелевый сплав для получения изделий методом металлургии гранул: Пат. 2359053 (РФ). 2009.
12. Фаткуллин О.Х., Еременко В.И., Гриц Н.М., Шлыков С.О., Федоренко Е.А. Новый гранулируемый жаропрочный никелевый сплав для изделий, получаемых методом прямого ГИП // Технол. легких сплавов. 1995. No. 6. С. 19—21.
13. Дзугутов М.Я. Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов. М.: Металлургия, 1971.
14. Сурикова М.А., Никольская Е.Е., Плечев В.Н. Влияние режимов деформации и термообработки на структуру и механические свойства порошкового жаропрочного сплава // Металлургия гранул. М.: ВИЛС, 1988. Вып. 4. С. 294—304.
15. Churyumov A.Yu., Khomutov M.G., Tsar'kov A.A. Study of the structure and mechanical properties of corrosion-resistant steel with a high concentration of boron at elevated temperatures // Phys. Met. Metallogr. 2014. Vol. 115. No. 8. P. 809—813.

16. Evans R.W., Scharning P.J. Axisymmetric compression test and hot working properties of alloys // Mater. Sci. Technol. 2001. Vol. 17. P. 995—1004.
17. Утяшев Ф.З., Рааб Г.И. Деформационные методы получения и обработки ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов. Уфа: Гилем, 2013.

References

1. Superalloys II / Eds. Ch.T. Sims, N.S. Stoloff, W.C. Hagel. N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1987.
2. Belov A.F., Anoshkin N.F., Fatkullin O.Kh. Структура и свойства гранулированных никелевых сплавов [Structure and properties of powdered nickel-based superalloys] Moscow: Metallurgiya, 1984.
3. Belov A.F. Настойчивые и будущие металлургии гранул [Present and future of powder metallurgy]. In: *Metallurgiya granul [Powder metallurgy]*. Moscow: VILS, 1983. Iss. 1. P. 5—13.
4. Garibov G.S. Новые наноструктурированные гранулированные материалы для газотурбинных технологий [New nanostructured powdered materials for gas turbine technologies]. *Tekhnologiya legkikh spлавov*. 2014. No. 2. P. 53—56.
5. Garibov G.S., Gritz N.M., Volkov A.M., Vostrikov A.V., Fedorenko E.A. Metallovedcheskie aspekty proizvodstva zagotovok diskov iz granuliruemykh zharoprochnykh nikelovykh spлавov metodom HIP [Physical metallurgy aspects of the production of disks made of powdered Nickel superalloys as-HIP]. *Tekhnologiya legkikh spлавov*. 2014. No. 3. P. 54—58.
6. Inozemtsev A.A., Anoshkin N.F., Bashkatov I.G., Garibov G.S., Koryakovtsev A.S. Применение дисков из гранул жаропрочных никелевых сплавов в серийных GTD авиационной и наземной техники [The use of disks from powder of Nickel superalloys in serial gas turbines for aircraft and ground equipment]. In: *Perspektivnye tekhnologii legkikh i spetsial'nykh spлавov [Advanced technologies of light and special alloy]*. Moscow: Fizmatlit, 2006. P. 371—376.
7. Anoshkin N.F. Некоторые аспекты качества жаропрочных и высокопрочных материалов, изготовленных методом металлургии гранул [Some aspects of quality of heat-resistant and high-tensile materials produced by powder metallurgy method]. In: *Metallurgiya granul [Powder metallurgy]*. Moscow: VILS, 1986. Iss. 3. P. 3—23.
8. Vinogradova N.I., Eremenko V.I., Krykina G.S., Makhanek G.V., Petrova S.N. Влияние высокотемпературной деформации на структуру сплава EP962, полученного металлургией гранул [The effect of high-temperature deformation on the structure of the EP-962 alloy received by the powder metallurgy]. In: *Metallurgiya granul [Powder metallurgy]*. Moscow: VILS, 1988. Iss. 4. P. 290—294.
9. Logunov A.V., Shmotin Yu.N. Современные жаропрочные никелевые сплавы для дисков газовых турбин (материалы и технологии) [Modern Nickel-base superalloy for disks of gas turbines (materials and technology)]. Moscow: Nauka i tekhnologii, 2013.
10. Fatkullin O.Kh., Eremenko V.I., Vlasova O.N., Gritz N.M. Повышение механических свойств гранулированных жаропрочных никелевых сплавов за счет легирования и обработки давлением [Improving of the mechanical properties of the powdered Nickel-based superalloys by alloying and deformation treatment]. *Tekhnologiya legkikh spлавov*. 2001. No. 5-6. P. 149—155.
11. Davydov A.K., Mironov V.I., Kononov S.A., Perevozov A.S. Жаропрочный никелевый сплав для получения изделий методом металлургии гранул [Nickel-based alloy for powder metallurgy]: Pat. 2359053 (RF). 2009.
12. Fatkullin O.Kh., Eremenko V.I., Gritz N.M., Shlykov S.O., Fedorenko E.A. Новый гранулированный жаропрочный никелевый сплав для изделий, получаемых методом прямого ГИП [New powdered Nickel superalloy obtained by HIP]. *Tekhnologiya legkikh spлавov*. 1995. No. 6. P. 19—21.
13. Dzugotov M.Ya. Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов [Plastic deformation of high-alloyed steels and alloys] Moscow: Metallurgiya, 1971.
14. Surikova M.A., Nikol'skaya E.E., Plechev V.N. Влияние режимов деформации и термообработки на структуру и механические свойства порошкового жаропрочного сплава [The influence of the modes of deformation and heat treatment on structure and mechanical properties of powdered superalloy]. In: *Metallurgiya granul [Powder metallurgy]*. Moscow: VILS, 1988. Iss. 4. P. 294—304.
15. Churyumov A.Yu., Khomutov M.G., Tsar'kov A.A. Study of the structure and mechanical properties of corrosion-resistant steel with a high concentration of boron at elevated temperatures. *Phys. Met. Metallogr.* 2014. Vol. 115. No. 8. P. 809—813.
16. Evans R.W., Scharning P.J. Axisymmetric compression test and hot working properties of alloys. *Mater. Sci. Technol.* 2001. Vol. 17. P. 995—1004.
17. Утяшев Ф.З., Рааб Г.И. Деформационные методы получения и обработки ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов [Deformation methods of receipt and processing of ultrafine-grained and nanostructured materials]. Ufa: Gilem, 2013.