

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 669.017; 620.186

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.03.011

ИНТЕНСИВНАЯ ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ КРУЧЕНИЕМ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ЭК61, ЭП975 И ЭК79

Эльвина Венеровна Галиева^{1†}, Екатерина Юрьевна Классман², Венер Анварович Валитов³, Радим Рифкатович Габбасов⁴, Егор Михайлович Степухов⁵

^{1, 2, 3} Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина 39, 450001, Уфа, Россия

^{3, 4, 5} Уфимский университет науки и технологий, ул. Заки Валиди, 32, 450076, Уфа, Россия

¹ galieva_elvina_v@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-1074-6274>

² klassman@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1984-5137>

³ valitov_va@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1349-6047>

⁴ awesome.radim@yandex.ru

⁵ egorstepukhov@mail.ru

Аннотация. Проанализировано влияние интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) на формирование нанокристаллической (НК) структуры применительно к жаропрочным никелевым сплавам ЭК79, ЭП975 (упрочняющая γ' -фаза $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$) и ЭК61 (упрочняющая γ'' -фаза Ni_3Nb). По результатам исследования показано, что в процессе ИПДК исходная крупнозернистая структура в никелевых сплавах с различным типом упрочняющей фазы $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ и Ni_3Nb трансформируется в УМЗ структуру дуплексного типа со средним размером зерен матрицы (γ -фазы): для ЭК61 – 50 нм, для ЭК79 – 55 нм, а для ЭП975 – 40 нм. Микротвердость после ИПДК увеличилась на 85 % для сплава ЭК61, на 28 % для сплава ЭК79 и на 37 % для сплава ЭП975 по сравнению с исходным состоянием. Определены условия получения НК структуры дуплексного типа. Проведены исследования влияния отжига при температуре 800 °С, 30 мин. на микротвердость сплавов ЭК61, ЭК79 и ЭП975. Установлено, что значение микротвердости в сплаве ЭК61 снижается на 19 %, а в сплавах ЭК79 и ЭП975 увеличивается на 29 % по сравнению с нанокристаллическим состоянием. Очевидно, это связано с укрупнением размера зерна сплаве ЭК61, а в сплавах ЭК79 и ЭП975 – с высокой термической стабильностью нанокристаллической структуры и дополнительным выделением внутриверхних наноразмерных частиц упрочняющей γ' -фазы.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы, интенсивная пластическая деформация, микроструктура.

Благодарности: Условия получения НК структуры в жаропрочном никелевом сплаве ЭК61 разработаны в рамках Госзадания ИПСМ РАН № 122011900470-7, а сплавов ЭП975 и ЭК79 – в рамках проекта РНФ № 22-79-00271. Микроструктурные исследования и оценка механических свойств проводились на базе ЦКП ИПСМ РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов».

Для цитирования: Галиева Э.В., Классман Е.Ю., Валитов В.А., Габбасов Р.Р., Степухов Е.М. Интенсивная пластическая деформация кручением никелевых сплавов ЭК61, ЭП975 И ЭК79 // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20, № 3. С. 381–389. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.03.011.

Original article

**INTENSIVE PLASTIC BY TORSION OF EK61, EP975, AND EK79
NICKEL-BASED SUPERALLOYS****Elvina V. Galieva^{1†}, Ekaterina Yu. Klassman², Vener A. Valitov³, Radim R. Gabbasov⁴,
Egor M. Stepukhov⁵**^{1,2,3} Institute for Metals Superplasticity Problems of Russian Academy of Sciences, Khalturina Str., 39, Ufa, 450001, Russia^{3,4,5} Ufa University of Science and Technology, Zaki Validi Str., 32, Ufa, 450076, Russia¹ galieva_elvina_v@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-1074-6274>² klassman@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1984-5137>³ valitov_va@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1349-6047>⁴ awesome.radim@yandex.ru⁵ egorstepukhov@mail.ru

Abstract. The influence of severe plastic deformation by torsion (SPDT) on the formation of a nanocrystalline (NC) structure is analyzed as applied to heat-resistant nickel based superalloys EK79, EP975 (hardening γ' -phase $\text{Ni}_3(\text{Al},\text{Ti})$) and EK61 (hardening γ'' -phase Ni_3Nb). According to the results of the study, it was shown that during HPT the initial coarse-grained structure in nickel alloys with various types of strengthening phase $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ and Ni_3Nb is transformed into a UFG structure of a duplex type with an average grain size of the matrix (γ -phase): for EK61 – 50 nm, for EK79 – 55 nm, and for EP975 – 40 nm. The microhardness after HPT increased by 85 % for the EK61 alloy, by 28 % for the EK79 alloy, and by 37 % for the EP975 alloy compared to the initial state. The conditions for obtaining an NC structure of a duplex type are determined. Studies of the effect of annealing at a temperature of 800 °C for 30 min on microhardness of EK61, EK79 and EP975 superalloys have been carried out. It has been established that the value of microhardness in the EK61 superalloy decreases by 19 %, while in the EK79 and EP975 alloys it increases by 29 % compared to the nanocrystalline state. It is probably due to coarsening of the grain size of the EK61 superalloy, as for the EK79 and EP975 superalloys it is due to the high thermal stability of the nanocrystalline structure and possible additional precipitation intragranular nanosized particles of the strengthening γ' -phase.

Keywords: nickel-based alloys, severe plastic deformation, microstructure.

Acknowledgements: The conditions for obtaining an NC structure in the EK61 superalloy with were developed within the framework of the State Task of the IPSM RAS No. 122011900470-7, and for EP975 and EK79 superalloys – within the framework of the Russian Science Foundation project No. 22-79-00271. Microstructural studies and the measurement of microhardness were carried out on the basis of the Center for Collective Use of IPSM RAS «Structural and physical-mechanical studies of materials».

For citation: Galieva, E. V., Klassman, E. Yu., Valitov, V. A., Gabbasov, R. R. & Stepukhov, E. M. (2023). Intensive plastic by torsion of EK61, EP975, and EK79 nickel-based superalloys. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(3), 381–389. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.03.011.

Введение

В настоящее время в области материаловедения активно ведутся разработки по развитию и более широкому применению методов интенсивной пластической деформации (ИПД), которые позволяют получать объемные наноструктурированные заготовки различной геометрии из различных металлов и сплавов [1-3]. Из известных способов получения наноструктурных (НС) материалов довольно широкое распространение получили следующие методы ИПД: равноканальное угловое прессование (РКУП), многослойная прокатка ARB, совмещенная со

сваркой в твердой фазе, всесторонняя ковка, «twist» процесс и др. [1-4].

Жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС) – это уникальный класс материалов, способный работать при повышенных температурах и в агрессивных средах благодаря сложному химическому составу [4]. Поэтому ЖНС широко используются для изготовления различных деталей авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), а также и ракетных двигателей [4-6].

Представителями современных деформируемых отечественных ЖНС, упрочняемых γ' -фазой, являются разработанные в последнее время и наиболее перспективные сплавы для дисков ГТД ЭП975 и ЭК79, которые способны

обеспечить рабочую температуру 750-975 °С [5-7]. Сплав ЭП975 по своим параметрам превосходит существующие опытные и серийные сплавы, он предназначен для изготовления дисков турбин и компрессоров высокого давления современных ГТД, т.е. способен работать в самых горячих частях двигателя. Однако, сложный химический состав этих сплавов привел к существенному снижению их технологической пластичности, повышению трудоемкости при обработке, а также к снижению коэффициента использования металла.

Сплав ЭК61 (российский аналог зарубежного сплава Inconel 718), в котором упрочнение достигается за счет выделения интерметаллидной фазы Ni_3Nb (γ'' , δ -фаза), предназначенный для изготовления штампосварных конструкций, например, ракетных двигателей, наоборот, характеризуется повышенной технологической пластичностью [8-11].

Сравнительно недавно возникла потребность получать в ЖНС более мелкозернистую структуру ультрамелкозернистого и нанокристаллического диапазона [2-4]. Такие структуры позволяют получать качественные неразъемные соединения путем сварки давлением в температурно-скоростных условиях низкотемпературной сверхпластичности не только из никелевых, но и других сплавов [12-15]. Принимая во внимание низкие технологические свойства этих сплавов с исходной крупнозернистой структурой для формирования НК структуры весьма перспективным для отработки технологии получения нанокристаллической структуры является широко применяемый метод интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) [1-3]. В результате такой обработки, как известно [1-3], в тонкостенных дисках из различных металлов и сплавов может быть сформирована нанокристаллическая структура с размером зерен и фрагментов не более 100 нм. В дальнейшем такие тонкостенные диски с НК структурой могут быть использованы, например, в качестве промежуточных прокладок между свариваемыми под давлением в температурно-скоростных условиях сверхпластичности заготовками, например, из одноименных сплавов на основе никеля [14].

Детальные исследования закономерностей формирования нанокристаллической структуры при ИПДК под давлением были проведены в работах [16-18] на однофазном сплаве X20Ni80 (нихром). Показано [17, 18], что сформированная при ИПД $e = 5,5$ НК структура характеризуется размером зерен ~ 50 нм, высоким значе-

нием микронапряжений (0,33 %) и микротвердостью 4,6 ГПа, что в 4 раза превышает микротвердость сплава в крупнозернистом состоянии.

Формирование НК структуры в ЖНС во многом аналогично рассмотренному на примере нихрома. Однако, в сложнолегированном ЖНС присутствуют когерентные упрочняющие интерметаллидные частицы, в отличие от нихрома, что обуславливает отличия в деформационном поведении при ИПДК. Например, в сплаве ПДУ-1 зёрнистая НК структура формируется на более ранних стадиях деформации, что связано с высоким содержанием γ' -фазы и тугоплавких частиц фазы Y_2O_3 [19].

Сильнонеравновесное энергетическое состояние НК структуры, сформированной при ИПД, обуславливает ее неустойчивость при нагреве. Термическую стабильность при нагреве изучили в работе [20]. В дисперсионно-твердеющих сплавах Inconel 718 и ЭП962 наноструктура стабильна соответственно при 600 и 700 °С, т.е. граница стабильности практически совпадает с температурой начала растворения основной упрочняющей фазы или ее низкотемпературной модификации, а в сплаве ПДУ-1 НК структура стабильна при нагреве до температуры ~ 800 °С [20].

Таким образом, разработка эффективных способов получения полуфабрикатов с НК структурой для никелевых является актуальной научной и материаловедческой задачей.

Целью работы является сравнительная оценка эффективности применения ИПДК для получения НК структуры в никелевых сплавах ЭК79, ЭП975 и ЭК61 с различным количеством и типом упрочняющей фазы.

Материалы и методики исследований

Материалами для исследований были выбраны жаропрочный деформируемый никелевый сплав ЭК61 с упрочняющей γ'' (δ)-фазой Ni_3Nb , а также жаропрочные деформируемые никелевые сплавы ЭП975 и ЭК79 с упрочняющей γ' -фазой $Ni_3(Al,Ti)$ стандартного химического состава согласно ТУ 14-1-50-45-91 (для сплава ЭК61) и ГОСТ 5632-2014 (для сплавов ЭК79 и ЭП975). В исходном состоянии сплав ЭК61 представлял собой горячедеформированный прутки с исходной крупнозернистой (КЗ) структурой (рис.1а) со средним размером (d) зерен матричной γ -фазы 62 ± 3 мкм, в теле зерен которой выделены когерентные частицы уп-

рочняющей γ' -фазы со средним размером 40 ± 2 нм (рис. 1г).

Сплав ЭК79 имел КЗ структуру со средним размером γ -зерен $d = 250 \pm 20$ мкм (рис. 1б), а сплав ЭП975 имел КЗ структуру, представляющую собой крупные γ -зерна со средним размером 200 ± 13 мкм (рис. 1в). В теле крупных

γ -зерен сплавов ЭК79 и ЭП975 наблюдаются гомогенно распределенные когерентные дисперсные частицы γ' -фазы со средним размером $0,20 \pm 0,03$ и $0,30 \pm 0,05$ мкм соответственно (рис. 1д, 1е). В сплаве ЭК79 объемная доля упрочняющей γ' -фазы составляет 40 %, а в сплаве ЭП975 – 55 %.

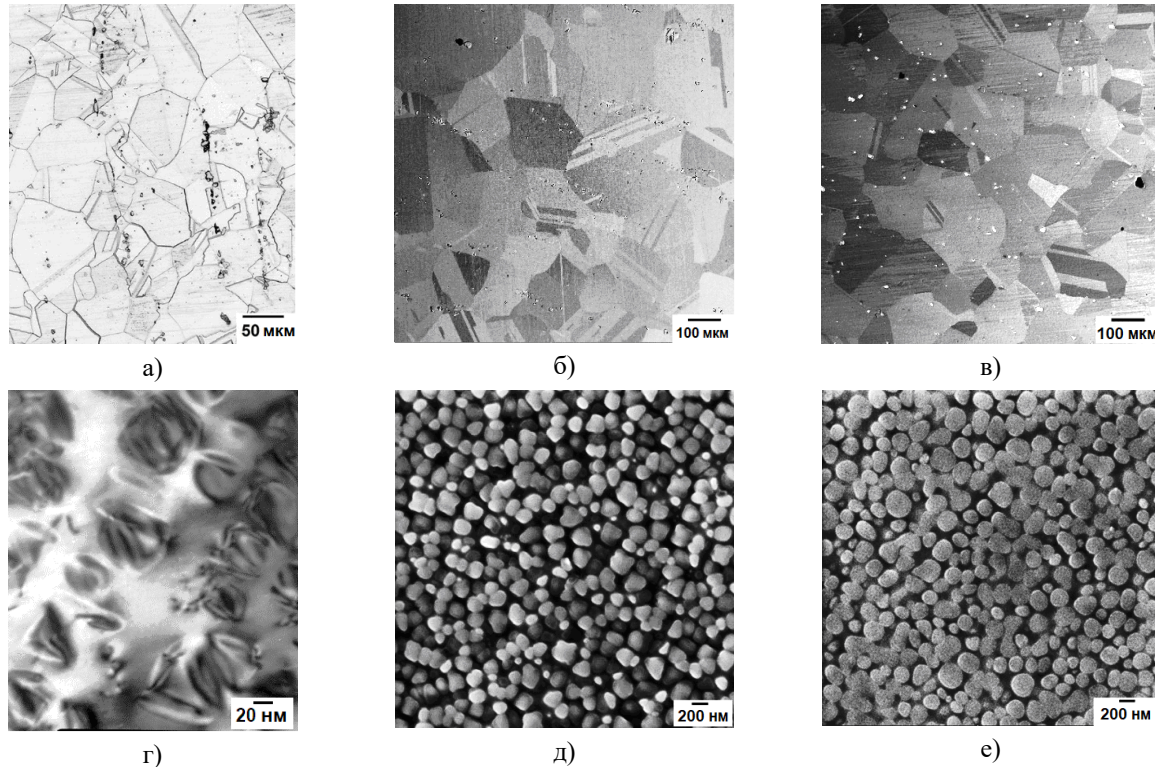


Рис.1. Исходная микроструктура сплавов ЭК61 (а, г), ЭК79 (б, д) и ЭП975 (в, е)

Fig.1. The initial microstructure of the EK61 (a, d), EK79 (b, e) and EP975 (c, f) superalloys

Применительно к жаропрочным никелевым сплавам при традиционной схеме осадки не удастся накопить достаточную степень деформации, чтобы сформировать во всем объеме нанокристаллическую структуру, поэтому в данной работе использовался метод ИПДК. Интенсивную пластическую деформацию проводили по комбинированной схеме кручением под высоким квазигидростатическим давлением (6 ГПа) на установке типа наковальни Бриджмена со скоростью $v=2$ об/мин при комнатной температуре. Размер образцов для ИПД составлял $\varnothing 10 \times 0,7$ мм.

Термическую обработку (ТО) в виде отжига деформированных образцов проводили при температуре 800 °С в течение 30 минут. Выбранная температура 800 °С соответствует температурам старения и максимального выделения упрочняющей γ' -фазы в сплавах ЭП975 и ЭК79, поскольку эта температура на $25-50$ °С ниже температуры начала растворения γ' -фазы. В менее жаропрочном сплаве ЭК61 при этой

температуре метастабильная γ'' -фаза полностью растворяется или преобразуется в более термически стабильную δ -фазу. Предполагается, что присутствие в сплавах упрочняющих фаз будет способствовать термической стабильности нанокристаллической структуры в изучаемых сплавах при последующей термической обработке. Как показали ранее проведенные исследования, выбранное время (30 мин.) отжига вполне достаточно для сравнительной оценки термической стабильности исследуемых сплавов ЭК61, ЭК79 и ЭП975, которые различаются по химическому и фазовому составу.

Все микроструктурные исследования и механические испытания осуществляли на оборудовании Центра Коллективного Пользования ИПСМ РАН.

Микроструктуру изучали методом растровой и просвечивающей электронной микроскопии с использованием микроскопов Mira 3LMN (TESCAN) и JEM-2000EX. Измерения микротвердости проводили на приборе MHT-10 Microhardness Tester.

Результаты и обсуждение

Никелевый сплав ЭК61 и его зарубежный аналог сплав Inconel 718, упрочняемые интерметаллидной фазой Ni_3Nb , обладают хорошей технологической пластичностью. Анализ микроструктуры показал, что после ИПДК со степенью деформации $e = 5,5$ наблюдали типичную НК структуру со средним размером зерен и фрагментов ~ 50 нм (рис.2а). Кольцевая электронограмма свидетельствует о том, что в объектив диафрагмы (диаметром $\sim 0,8$ мкм) попало большое количество фрагментов. Механизм формирования НК структуры в сплаве ЭК61 аналогичен сплаву Inconel 718 [11]. Преимущественное наложение рефлексов может говорить о том, что наблюдается текстура, а наличие отдельных рефлексов на кольцевых электроно-

граммах, может свидетельствовать о наличии высокоугловых разориентировок между фрагментами.

При достижении 5 оборотов во всем объеме исследуемых сплавов, упрочняемых фазой $Ni_3(Al,Ti)$, происходит трансформация крупнозернистой структуры в НК со средним размером зерен и фрагментов матричной γ -фазы: для сплава ЭК79 $d \sim 55$ нм (рис.2б), а для ЭП975 $d \sim 40$ нм (рис.2в). При этом необходимо отметить, что в процессе ИПДК имеет место деформация выделений частиц упрочняющих фаз, их фрагментация которая приводит их к измельчению до размера зерен матрицы (γ -фазы) и даже менее. В результате после ИПДК во всех исследованных сплавах формируется НК структуры нанодуплексного типа: ЭК61 ($\gamma+\gamma''$), в сплавах ЭК79 и ЭП975 – ($\gamma+\gamma'$).

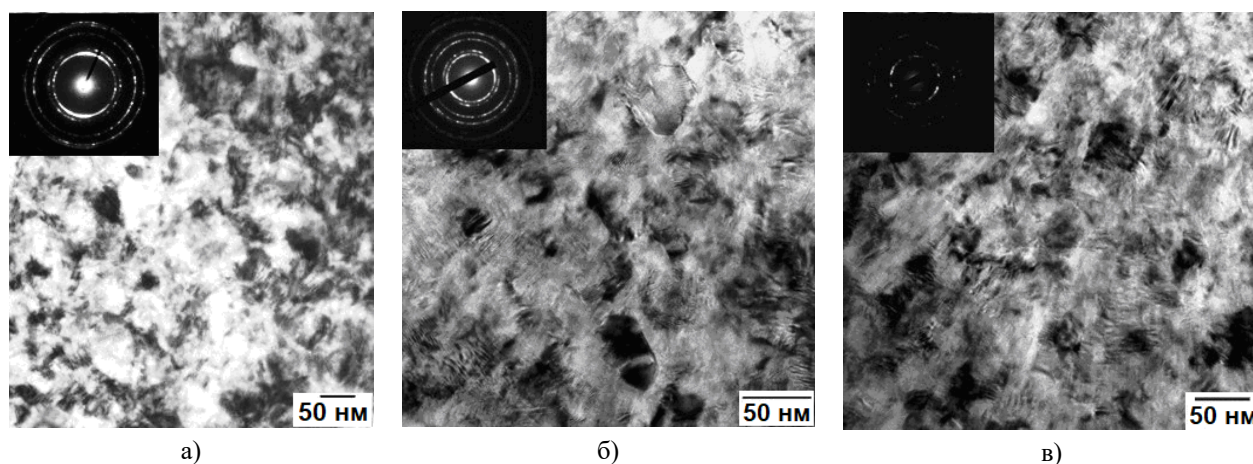


Рис.2. Микроструктура после ИПДК ($e = 5,5$) сплавов: ЭК61 (а), ЭК79 (б), ЭП975 (в)

Fig.2. Microstructure of superalloys after torsion ($e = 5.5$): EK61 (a), EK79 (b), EP975 (c)

При анализе влияния степени деформации при ИПДК на эволюцию микроструктуры было обнаружено следующее. В структуре сплава ЭП975, деформированного со степенью $e = 2,5$ наблюдается образование ячеек. Средний размер ячеек составляет 250 ± 22 нм, а ширина их границ 80 ± 10 нм. При этом в структуре выявляются относительно крупные ячейки размером 400 ± 35 нм. Наблюдаются отдельные участки, на которых присутствуют деформационные полосы (рис.3г). На электронограмме присутствуют размытые кольцевые рефлексы, свидетельствующие о внутренних напряжениях, возникших из-за искажений решетки.

Более существенные изменения в сплаве ЭП975 наблюдаются с повышением степени деформации до $e = 3,5$ (рис.3б). При такой степени деформации формируются более мелкие ячейки с размером близким к нанометрическому. Границы ячеек размыты, что характерно для сильно наклепанного состояния. Рефлексы

на электронограмме становятся менее размытыми, а сама электронограмма начинает принимать вид концентрических колец с расположенными на них отдельными рефлексами, что свидетельствует о малом размере зерен и высокоугловой разориентировке их границ. Об этом свидетельствует формирование отдельных рекристаллизованных зерен и фаз нанометрического размера (рис.3б).

После степени деформации $e = 4,5$ (рис.3в) удельный объем рекристаллизованных зерен существенно увеличивается. Электронограмма является кольцевой, то есть представляет собой множество рефлексов, расположенных на окружности. Такой вид электронограммы характерен для материалов имеющих поликристаллическую структуру, иными словами электронограмма получена от множества мелких зерен и фрагментов нанокристаллического размера с высокоугловой разориентировкой их границ.

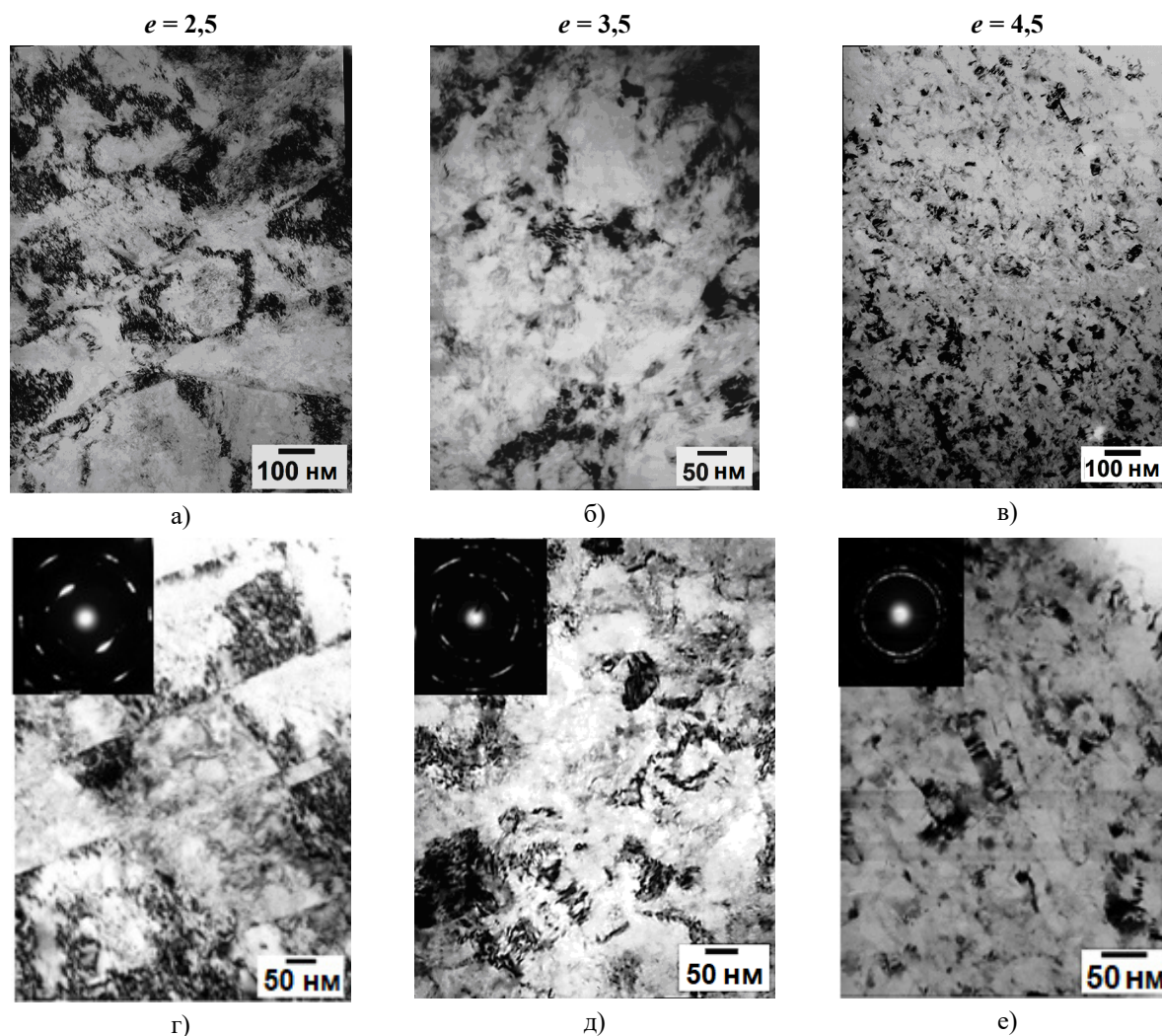


Рис.3. Микроструктура после ИПДК сплава ЭП975: $e = 2,5$ (а), $e = 3,5$ (б), $e = 4,5$ (в)

Fig.3. Microstructure of the EP975 superalloy after torsion: $e = 2.5$ (a), $e = 3.5$ (b), $e = 4.5$ (c)

На рис.4 представлены значения микротвердости исследованных материалов после ИПДК и ИПДК с последующей термической обработкой. Значения микротвердости в исследованных материалах после ИПДК увеличились. По сравнению с исходными крупнозернистыми состояниями в сплавах с нанокристаллической структурой микротвердость возросла: в сплаве ЭК61 на 85 %, а в сплавах ЭК79 и ЭП975 на 28 % и 37 % соответственно. После термической обработки микротвердость в сплаве ЭК61 снизилась на 19 %, что, на наш взгляд, связано с частичным растворением δ -фазы и укрупнением размера зерен γ -фазы до среднего размера 400 ± 15 нм (рис.5а).

После отжига укрупнение размера зерна наблюдалось также в сплавах ЭК79 и ЭП975: в ЭК79 средний размер γ -зерен $d = 80 \pm 6$ нм (рис.5б), а в ЭП975 $d = 100 \pm 8$ нм (рис.5в). О наличии преимущественно большеугловых границ, т.е. зеренной структуры, судили по наличию кольцевой электронограммы с точечными

рефлексами и полосчатому контрасту на границах.

Микротвердость сплавов при этом не только не уменьшилась, а, наоборот, несколько увеличилась. На наш взгляд это может быть связано с тем, что температура отжига 800 °С фактически соответствует температуре старения, поэтому при данных температурах возможно дополнительное выделение в зернах γ -фазы наноразмерных когерентных частиц γ' -фазы. По видимому, это обстоятельство, свидетельствует о том, что при этой температуре (800 °С) НК структура в сплавах ЭК79 и ЭП975 более термически стабильна по сравнению со сплавом ЭК61.

Полученные данные будут полезны для оптимизации технологических режимов получения тонких пластин из исследованных сплавов с НК структурой, которые в дальнейшем могут быть использованы для получения в режиме низкотемпературной сверхпластичности твердофазных соединений из одноименных и раз-

ноименных никелевых сплавов, например, ЭП975//ЭК79 с НК структурой//ЭК79, где соединяемые сплавы ЭП975 и ЭК79 могут иметь

мелкозернистую типа микродуплекс или крупнозернистую структуру.

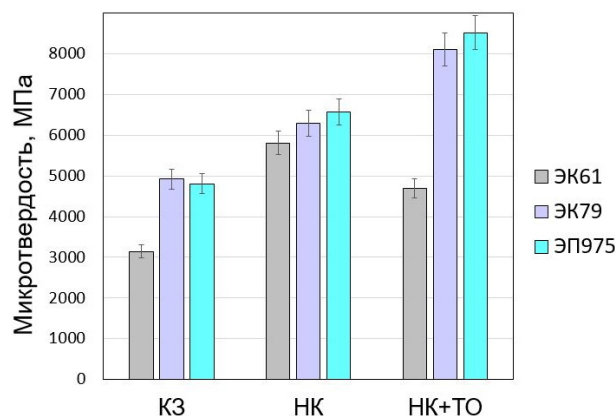


Рис.4. Значения микротвердости после ИПДК ($e = 5,5$) и ИПДК+ТО сплавов ЭК61, ЭК79, ЭП975

Fig.4. Microhardness value of EK61, EK79, EP975 superalloys after torsion ($e = 5.5$) and torsion+heat treatment

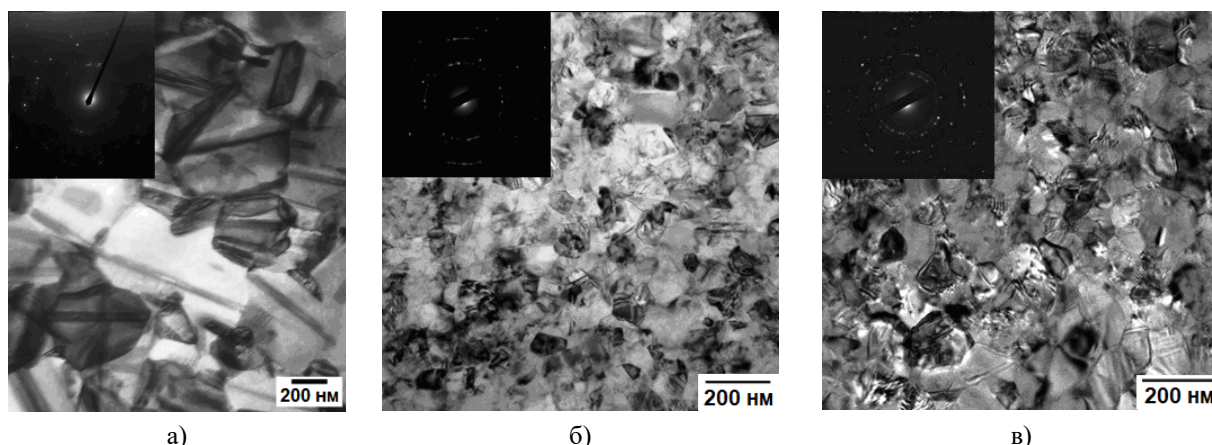


Рис.5. Микроструктура сплавов после ИПДК ($e = 5,5$) и ТО: а – ЭК61, б – ЭК79, в – ЭП975

Fig.5. Microstructure of alloys after HPT ($e = 5.5$) and HT: а – EK61, б – EK79, в – EP975

Закключение

Экспериментально установлено, что ИПДК является эффективным методом для получения НК структуры в жаропрочных никелевых сплавах. Показано, что в процессе ИПДК исходная КЗ структура в никелевых сплавах с различным типом упрочняющей фазы $Ni_3(Al, Ti)$ и Ni_3Nb трансформируется в НК структуру дуплексного типа со средним размером зерен матрицы (γ -фазы) и второй некогерентной фазы: в сплаве ЭК61($\gamma+\gamma''$) – 50 нм; в сплаве ЭК79($\gamma+\gamma'$) – 55 нм; в сплаве ЭП975 – 40 нм. Микротвердость после ИПДК увеличилась на 85 % для сплава ЭК61, на 28 % для сплава ЭК79 и на 37 % для сплава ЭП975. После отжига при 800 °С в сплавах ЭК79 и ЭП975 микротвердость несколько повышается за счет сохранения термически стабильной НК структуры и возможного дополнительного выделения нано-

размерных частиц γ' -фазы. В менее жаропрочном сплаве ЭК61 микротвердость снизилась на 19 %, что связано с укрупнением размера зерен γ -фазы вследствие частичного растворения δ -фазы.

Список литературы

1. Мулюков Р.Р., Имаев Р.М., Назаров А.А. и др. Сверхпластичность ультрамелкозернистых сплавов: эксперимент, теория, технологии. М.: Наука, 2014. 284 с.
2. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 2014. 440 p.
3. Валиев Р.З., Исламгалиев Р.К., Александров И.В. Объемные наноструктурированные материалы полученные интенсивной пластической деформацией. Москва: Академкнига, 2007. 398 с.

4. Рааб Г.И., Шибиков В.Г., Рааб А.Г. Перспективные методы ИПД для получения наноструктурированных металлических материалов // Физика и механика материалов. 2016. V. 25. P. 77–82.
5. Логунов А.В. Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток и дисков газовых турбин. Москва, ООО «Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2017. 854 с.
6. Rao K.A. Nickel Based Superalloys – Properties and Their Applications // International Journal of Management, Technology And Engineering. 2018. V. 8, Is. V. P. 268–277.
7. Reed R.C. The superalloys: Fundamentals and Applications. Cambridge University Press, 2006. 372 p.
8. Бабенцова Л.П., Анциферова И.В. Механические свойства сплава IN718 при статическом и циклическом деформировании // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 6. С. 14–19.
9. Полянский А.М., Полянский В.М. Структурные изменения в сплаве ЭК61 в условиях циклической деформации при повышенной температуре // Металловедение и термическая обработка металлов. 2010. Т. 660, № 6. С. 50–53.
10. Valitov V.A., Mulyukov R.R., Gigliotti M.F.X., Subramanian P.R. Superalloys 2008 // TMS. 2008. P. 325–331.
11. Valitov V., Mukhtarov Sh., Lutfullin R., Safiullin R., Mukhametrakhimov M. Microstructure and Properties of Nanostructured Alloy 718 // Advanced Materials Research. 2011. V. 278. P. 283–288.
12. Хазгалиев Р.Г., Имаев М.Ф., Мулюков Р.Р., Сафин Ф.Ф. Модифицирование поверхности прослойки никеля для делокализации деформации при сварке давлением образцов титанового сплава и нержавеющей стали // Письма о материалах. 2015. Т. 5, № 2. С. 133–137.
13. Drozdov A.A., Valitov V.A., Povarova K.B., Bazyleva O.A., Galieva E.V., Ovsepyan S.V. The solid-phase joints of high-temperature nickel alloy with ultrafine-grained structure for disks and Ni₃Al based single-crystal blade alloy // Lett. Mater. 2015. V. 5, N 2. P. 142–146.
14. Galieva E.V., Valitov V.A., Lutfullin R.Ya., Bikmukhametova A.A. Low Temperature Superplasticity of the Ni-Based EK61 Superalloy and Application of this Effect to Obtain Solid Phase Joints // Defect and Diffusion Forum. 2018. V. 385. P. 150–154.
15. Утяшев Ф.З., Рааб Г.И., Валитов В.А. Деформационное наноструктурирование металлов и сплавов. Монография. СПб.: Научно-технические технологии, 2020. 185 с.
16. Dudova N.R., Kaibyshev R.O., Valitov V.A. Formation of nanocrystalline structure in a Ni-20%Cr alloy. TMS Annual Meeting. Seattle, Washington, 2002. P. 75–80.
17. Кайбышев О.А., Дудова Н.Р., Валитов В.А. Влияние интенсивной пластической деформации и последующего отжига на структуру и свойства сплава X20H80 // ФММ. 2003. Т. 96, № 1. С. 54–61.
18. Mukhtarov Sh., Dudova N., Valitov V. Processing and Mechanical Properties of Bulk Nanostructured Nickel Base Alloys. // Materials Science & Engineering A. 2009. V. 503. P. 181–184.
19. Valitov V.A., Kaibyshev O.A., Mukhtarov Sh.Kh., Gajnutdinova N.R. Formation of Micro-, Submicro- and Nanocrystalline Structures in Nickel-Base Alloys // Proceedings of the First Joint International Conference “Recrystallization and Grain Growth”, Springer-Verlag, 2001. P. 563–568.
20. Валитов В.А. Формирование нанокристаллической структуры при интенсивной деформационно-термической обработке и ее влияние на сверхпластические свойства никелевых сплавов // Вопросы материаловедения. 2007. Т. 52, № 4. С. 311–316.

Информация об авторах

Э. В. Галиева – кандидат технических наук, научный сотрудник Института проблем сверхпластичности металлов РАН.

Е. Ю. Классман – аспирант, инженер Института проблем сверхпластичности металлов РАН.

В. А. Валитов – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем сверхпластичности металлов РАН.

Р. Р. Габбасов – студент Уфимского университета науки и технологий.

Е. М. Степухов – студент Уфимского университета науки и технологий.

References

1. Mulyukov, R. R., Imayev, R. M. & Nazarov, A. A. et al. (2014). Superplasticity of ultrafine-grained alloys: Experiment, theory, technologies. Moscow, Nauka. P. 284. (In Russ.).
2. Valiev, R. Z., Zhilyaev, A. P. & Langdon, T. G. (2014). Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA. P. 440.
3. Valiev, R. Z., Islamgaliev, R. K. & Alexandrov, I. V. (2007). Bulk nanostructured materi-

- als from severe plastic deformation. Moscow, Akademkniga. P. 398. (In Russ.).
4. Raab, G. I., Shibakov, V. G. & Raab, A. G. (2016). Promising SPD Methods for Obtaining Nanostructured Metallic Materials. *Materials Physics and Mechanics*, 25, 77–82. (In Russ.).
 5. Logunov, A. V. (2017). Heat-resistant nickel alloys for blades and disks of gas turbines. Moscow, LLC Publishing House Gas Turbine Technologies. P. 854. (In Russ.).
 6. Rao, K. A. (2018). Nickel Based Superalloys – Properties and Their Applications. *International Journal of Management, Technology And Engineering*, 8(V), 268–277.
 7. Reed, R. C. (2006). The superalloys: Fundamentals and Applications. Cambridge University Press. P. 372.
 8. Babentsova, L. P. & Antsiferova, I. V. (2019). Mechanical properties of the IN718 alloy during static and cyclic deformation. *Modern science-intensive technologies*, 6, 14–19. (In Russ.).
 9. Polyasky, A. M. & Polyansky, V. M. (2010) Structural changes in the EK61 alloy under cyclic deformation at elevated temperature. *Metal science and thermal processing of metals*, 6(660), 50–53. (In Russ.).
 10. Valitov, V. A., Mulyukov, R. R., Gigliotti, M. F. X. & Subramanian, P. R. (2008). *Superalloys 2008. TMS*, 325–331.
 11. Valitov, V., Mukhtarov, Sh., Lutfullin, R., Safiullin, R. & Mukhametrakhimov, M. (2011). Microstructure and Properties of Nanostructured Alloy 718. *Advanced Materials Research*, 278–283.
 12. Khazgaliev, R. G. Imaev, M. F., Mulyukov, R. R. & Safin, F. F. (2015). Modification of the Nickel Interlayer Surface for Strain Delocalization in Pressure Welding of Titanium Alloy and Stainless Steel Specimens. *Letters on materials*, 5(2), 133–137. (In Russ.).
 13. Drozdov, A. A., Valitov, V. A. & Pova-rova, K. B. et al. (2015) The solid-phase joints of high-temperature nickel alloy with ultrafine-grained structure for disks and Ni₃Al based single-crystal blade alloy. *Lett. Mater.*, 5(2), 142–146.
 14. Galieva, E. V., Valitov, V. A., Lutfullin, R. Ya. & Bikmukhametova A. A. (2018). Low-Temperature Superplasticity of the Ni-Based EK61 Superalloy and Application of this Effect to Obtain Solid Phase Joints. *Defect and Diffusion Forum*, 385, 150–154.
 15. Utyashev, F. Z., Raab, G. I. & Valitov, V. A. (2020). Deformation nanostructuring of metals and alloys. Monograph. St. Petersburg: Science-intensive technologies. P. 185. (In Russ.).
 16. Dudova, N. R., Kaibyshev, R. O. & Valitov, V. A. (2002). Formation of nanocrystalline structure in a Ni-20%Cr alloy. TMS Annual Meeting. Seattle, Washington. P. 75–80.
 17. Kaibyshev, O. A., Dudova, N. R. & Valitov, V. A. (2003). Influence of severe plastic deformation and subsequent annealing on the structure and properties of Kh20N80 alloy. *FMM*, 96(1), 54–61. (In Russ.).
 18. Mukhtarov, Sh., Dudova, N. & Valitov V. (2009). Processing and Mechanical Properties of Bulk Nanostructured Nickel Base Alloys. *Materials Science & Engineering A*, 503, 181–184.
 19. Valitov, V. A., Kaibyshev, O. A., Mukhtarov, Sh. Kh. & Gajnutdinova, N. R. (2001). Formation of Micro-, Submicro- and Nanocrystalline Structures in Nickel-Base Alloys. Proceedings of the First Joint International Conference “Recrystallization and Grain Growth”, Springer-Verlag. P. 563–568.
 20. Valitov, V. A. (2007). Formation of nanocrystalline structure upon severe thermomechanical processing and its effect on the superplastic properties of nickel base alloys. *Issues of materials science*, 52(4), 311–316. (In Russ.).

Information about the authors

E. V. Galieva – Candidate of Technical Sciences, Researcher, Institute for Metals Superplasticity Problems of Russian Academy of Sciences.

E. Yu. Klassman – Post-Graduate Student, Engineer, Institute for Metals Superplasticity Problems of Russian Academy of Sciences.

V. A. Valitov – Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, Institute for Metals Superplasticity Problems of Russian Academy of Sciences.

R. R. Gabbasov – Student, Ufa University of Science and Technology.

E. M. Stepukhov – Student, Ufa University of Science and Technology.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 01.07.2023; одобрена после рецензирования 17.07.2023; принята к публикации 01.08.2023.

The article was received by the editorial board on 01 July 23; approved after reviewing 17 July 23; accepted for publication 01 Aug. 23.