

Научная статья

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

УДК 669.017; 620.186

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.012

ВСЕСТОРОННЯЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКАЯ КОВКА СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ И ТИТАНА**Екатерина Юрьевна Классман^{1†}, Эльвина Венеровна Галиева², Венер Анварович Валитов³, Рамиль Яватович Лутфуллин⁴**^{1, 2, 3, 4} Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина, 39, 450001, Уфа, Россия³ Башкирский государственный университет, ул. Заки Валиди, 32, 450076, Уфа, Россия¹ klassman@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0003-1984-5137>² galieva_elvina_v@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1074-6274>³ valitov_va@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1349-6047>⁴ lutfullin.ramil@imsp.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4638-3206>

Аннотация. Проанализировано влияние всесторонней изотермическойковки (ВИК) на формирование ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры применительно к титановым и жаропрочным никелевым сплавам. По результатам исследования показано, что в процессе ВИК исходная крупнозернистая структура в никелевых сплавах ЭП741НП и ЭК61 с различным типом упрочняющей фазы Ni₃(Al, Ti) и Ni₃Nb соответственно трансформируется в УМЗ структуру дуплексного типа с размером зерен матрицы (γ-фазы) для ЭП741НП около 0,6 мкм, для ЭК61 около 0,3 мкм, а в титановом сплаве ВТ22 до размера около 0,38 мкм. Микротвердость после ВИК увеличилась на 5 % для сплава ВТ22, на 10 % для сплава ЭП741НП и на 34 % для сплава ЭК61. Создан научно-технический задел для оптимизации технологических режимов получения УМЗ структуры дуплексного типа в массивных объемных заготовках, в частности, применительно к никелевым сплавам (ЭП741НП и ЭК61) и титановому сплаву ВТ22, необходимый для последующей обработки сплавов в режиме низкотемпературной сверхпластичности.

Ключевые слова: никелевые сплавы, титановые сплавы, всесторонняя изотермическая ковка, микроструктура.

Благодарности: Условия получения УМЗ структуры в жаропрочных никелевых сплавах с разработаны в рамках Госзадания ИПСМ РАН № 122011900470-7, а титанового сплава – в рамках Госзадания ИПСМ РАН № 122011900474-5. Микроструктурные исследования и механические испытания проводились на базе ЦКП ИПСМ РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов».

Для цитирования: Классман Е.Ю., Галиева Э.В., Валитов В.А., Лутфуллин Р.Я. Всесторонняя изотермическая ковка никелевых и титановых сплавов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19, № 4. С. 532–538. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.012.

Original article

MULTIPLE ISOTHERMAL FORGING OF ALLOYS BASED ON NICKEL AND TITANIUM**Ekaterina Yu. Klassman^{1†}, Elvina V. Galieva², Vener A. Valitov³, Ramil Ya. Lutfullin⁴**^{1, 2, 3, 4} Institute for Problems of Superplasticity of Metals of the Russian Academy of Sciences, Stepan Khalturina Str., 39, Ufa, 450001, Russia³ Bashkir State University, Zaki Validi Str., 32, Ufa, 450076, Russia¹ klassman@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0003-1984-5137>² galieva_elvina_v@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1074-6274>³ valitov_va@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1349-6047>⁴ lutfullin.ramil@imsp.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4638-3206>

Abstract. The study of the process of multiple isothermal forging as applied to titanium alloy and heat-resistant nickel-based superalloys has been carried out. According to the study results, it was shown that the initial coarse-grained structure of nickel-based superalloys is transformed into an ultrafine-grained structure with a grain size: for the EP741NP it is about 0.6 μm , for the EK61 it is about 0.3 μm , as for the VT22 titanium alloy it is about 0.38 μm . The microhardness values are increased by 34 % for the EK61, by 10 % for EP741NP and by 5 % for the VT22. Such data will make it possible to create a scientific basis for optimizing the conditions of obtaining an ultrafine-grained structure in workpieces, particularly in (EP741NP and EK61) nickel-based superalloy and VT22 titanium alloy, as well as their subsequent processing in the superplasticity conditions.

Keywords: nickel-based heat-resistant superalloys, titanium alloys, multiple isothermal forging, microstructure.

Acknowledgments: The conditions for obtain the UFG structure in nickel-based superalloys were developed within the framework of the State Assignment of IPSM RAS No. 122011900470-7, and titanium alloy – within the State Assignment of IPSM RAS No. 122011900474-5. Microstructural studies and mechanical tests were carried out on the facilities of shared services center of IMSP RAS «Structural and Physical-Mechanical Studies of Materials».

For citation: Klassman, E. Yu., Galieva, E. V., Valitov, V.A. & Lutfullin, R. Ya. (2022). Multiple isothermal forging of alloys based on nickel and titanium. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 4(19), 532–538. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.03.012.

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 с нано- и ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой [1-6]. К наиболее популярным методам, реализующим ИПД, относятся такие схемы обработки, как кручение под высоким давлением (КВД), равноканальное угловое прессование (РКУП), всесторонняя изотермическая ковка (ВИК) и др. [4]. Для получения массивных объемных полуфабрикатов с УМЗ структурой особый интерес вызывает такой способ ИПД, как метод ВИК с поэтапным снижением температуры деформации, реализация которого может быть осуществлена с использованием существующего на металлургических предприятиях кузнечно-прессового оборудования [5, 6]. Схема ВИК основана на использовании многократного повторения операций свободнойковки: осадка-протяжка со сменой оси прилагаемого деформирующего усилия. Данным способом можно получать УМЗ структуру в труднодеформируемых сплавах на основе титана, никеля и интерметаллидах, так как обработка начинается с повышенных температур, и при этом обеспечиваются небольшие удельные нагрузки на инструмент [2].

Жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС) – это уникальный класс материалов, способный работать при повышенных температурах и в агрессивных средах благодаря сложному химическому составу [7-9]. Поэтому ЖНС широко ис-

пользуются для изготовления различных деталей авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), а также и ракетных двигателей [7-10]. Сложный химический состав современных ЖНС, обеспечивающий достижение требуемых характеристик жаропрочных свойств за счет твердорастворного упрочнения и выделения внутризеренных когерентных частиц упрочняющих фаз, например, на основе интерметаллидов $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$, привел к существенному снижению технологической пластичности сплавов, повышению трудоемкости при обработке, а также к снижению коэффициента использования металла [7-10].

Реализация эффективной технологии изготовления деталей сложной геометрии возможна при создании в исходной заготовке УМЗ состояния, которое обеспечивает высокую пластичность и низкие напряжения течения при деформационной обработке, что особо актуально для труднодеформируемых жаропрочных никелевых сплавов [11, 12]. В ЖНС на развитие процессов пластической деформации и, соответственно, рекристаллизации решающее влияние оказывает состояние упрочняющих фаз: их морфология и тип связи с матрицей [10-12]. Расширение технологических возможностей эффекта сверхпластичности (СП) при обработке труднодеформируемых ЖНС возможно за счет увеличения скорости деформации и снижения температуры ее проявления, что может быть достигнуто в результате формирования в указанных материалах УМЗ или нанокристаллической структуры [10-13].

Известно [14], что для титановых сплавов формирование в объемных полуфабрикатах УМЗ структуры также является необходимым

условием для реализации эффекта структурной сверхпластичности (СП) в технологических процессах изготовления из таких сплавов деталей сложной формы, например, методом сверхпластической формовки. Формирование УМЗ структуры в титановых сплавах методами ИПД возможно только при повышенных температурах из-за низкой деформационной способности этих материалов, так, в работах [6, 15] ВИК сплава Ti-6Al-4V проводили с понижением температуры в интервале 800-450 °С. В частности, как показали авторы работ [16-18], всестороннее прессование со ступенчатым понижением температуры для сплавов VT35 и VT22 позволяет сформировать достаточно однородную зеренно-субзеренную структуру со средним размером элементов менее 0,2 мкм. При этом значения механических свойств УМЗ сплавов VT22 и VT35 превышают аналогичные свойства рассматриваемых сплавов в крупнозернистом состоянии на 25-50% [18, 19]. В настоящее время, в том числе за рубежом, наблюдается повышенный интерес к получению УМЗ и нанокристаллических структур методами ИПД в материалах, ранее упрочняемых посредством термической обработки [20, 21]. Таким образом, разработка эффективных способов получения полуфабрикатов с УМЗ и НК структурой для никелевых и титановых сплавов является актуальной научной и материаловедческой задачей.

Целью работы является сравнительная оценка эффективности применения ВИК для получения УМЗ структуры в никелевых сплавах ЭК61 и ЭП741НП с различным типом упрочняющей фазы, а также в титановом сплаве VT22.

Материалы и методики исследований

Материалами для исследований были выбраны жаропрочный деформируемый поликристаллический никелевый сплав ЭК61, жаропрочный гранулированный никелевый сплав ЭП741НП и высокопрочный комплекснолегированный титановый псевдо- β -сплав VT22 стандартного химического состава. В исходном состоянии сплав ЭК61 представлял собой горячедеформированный пруткок с исходной крупнозернистой (КЗ) структурой (рис.1а): размер зерен матричной γ -фазы ~ 62 мкм, в теле зерен которой выделены когерентные частицы упрочняющей γ'' -фазы ~ 40 нм. Сплав ЭП741НП имел КЗ структуру, представляющую собой относительно крупные γ -зерна ($d \sim 35$ мкм), в теле которых равномерно выделилась дисперсная (0,2 мкм) γ' -фаза (рис.1б). В исходном состоянии сплав VT22 представляет собой типичную микроструктуру с пластинчатыми выделениями α - и β -фаз с размером пластин до 10 мкм, коэффициентом вытянутости $K = 5$ и соотношением 40-60 % (рис.1в).

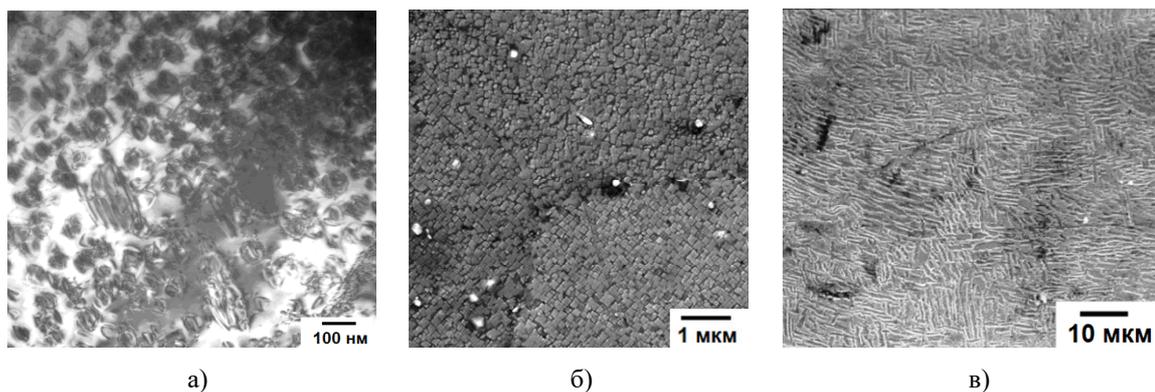


Рис.1. Исходная микроструктура сплавов ЭК61 (а), ЭП741НП (б) и VT22 (в)

Fig.1. The initial microstructure of the EK61 (a), EP741NP (b) superalloys and VT22 (c)

Получение УМЗ структуры проводили с использованием известного методологического подхода, основанного на использовании созданного в ИПСМ РАН способа получения УМЗ структуры (ВИК) [1-3, 5, 6] с использованием изотермического штампового блока с диаметром бойков 280 мм их жаропрочного сплава

ЖС6У, установленного на гидравлическом прессе с усилием 6,3 МН. Температурные режимы ВИК были определены по результатам предварительных исследований влияния температуры и степени деформации на формирование УМЗ структуры в исследуемых сплавах. Деформацию сплава ЭК61 с применением схе-

мы ВИК проводили в интервале температур, соответствующих $(0,93...0,71)T_{\delta}$ (T_{δ} – температура полного растворения δ -фазы), а сплава ЭП741НП – в две стадии: 1 стадия в интервале температур $T = 1160...1140$ °С; 2 стадия при $T = 950...900$ °С. Для ВТ22 применяли многократную ковку со сменой осей деформации заготовок в условиях постепенного охлаждения в интервале температур $(0,97...0,75)T_{\text{пп}}$ ($T_{\text{пп}}$ – температура полного полиморфного превращения).

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 3LMH (TESCAN) и JEM-2000EX. Измерения микротвердости проводили на приборе МНТ-10 Microhardness Tester.

Результаты и обсуждение

Как известно [10], в сплавах типа ЭП741НП упрочняющей является γ' -фаза на основе интерметаллида $Ni_3(Al,Ti)$, которая при охлаждении с температуры обработки выделяется практически мгновенно вследствие близости

параметров решетки γ -твердого раствора (γ -фаза) и упрочняющей γ' -фазы. По-видимому, вследствие этого высоколегированный сплав ЭП741НП, содержащий $55\pm 60\%$ упрочняющей фазы, имеет низкую технологическую пластичность и его невозможно подвергать всесторонней изотермической ковке [10].

В данной работе показано, что даже гранульный сплав ЭП741НП удастся продеформировать и получить в заготовках однородную УМЗ структуру типа субмикродуплекс с размером зерен $\sim 0,6$ мкм (рис.2а). Полученные результаты свидетельствуют о том, что при низкотемпературной деформационной обработке наряду с динамической рекристаллизацией интенсивно развивается динамический возврат, причем интенсивное внутризеренное скольжение развивается как в γ -зернах, так и в относительно крупных частицах γ' -фазы. Формирование менее развитой субструктуры в частицах γ' -фазы, в сравнении с γ -фазой, обусловлено, по всей видимости, большей прочностью и замедленностью процессов возврата в γ' -фазе по сравнению с γ -фазой.

Наиболее эффективен этот подход применительно к никелевым сплавам ЭК61 и его зарубежному аналогу сплаву Inconel 718.

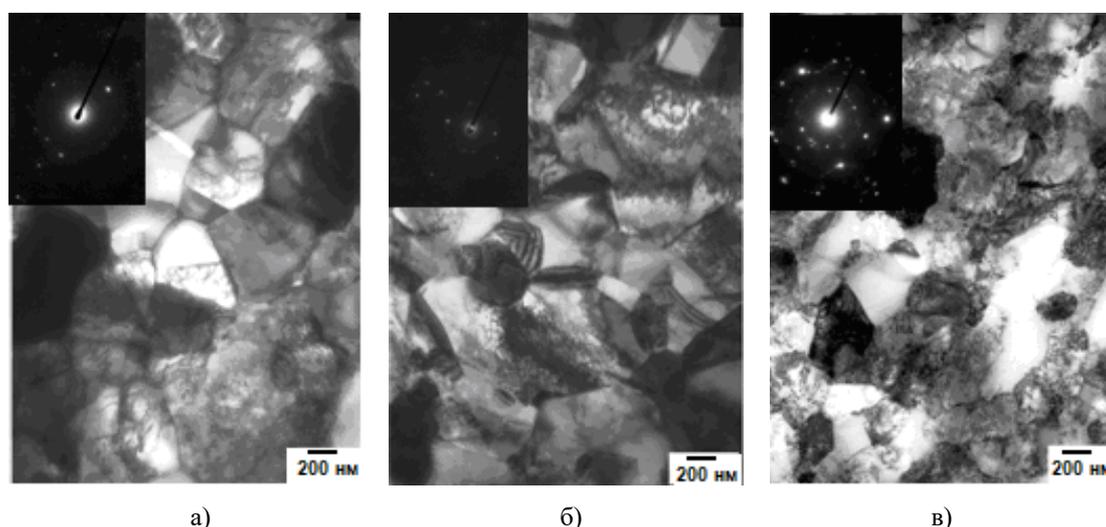


Рис.2. Микроструктура после ВИК сплавов ЭП741НП (а), ЭК61 (б), ВТ22 (в)

Fig.2. Microstructure of the EP741NP (a), EK61 (b) superalloys and VT22 (c) after MIF

В сплавах ЭК61 и Inconel 718 упрочнение достигается за счет выделения упрочняющей γ'' -фазы на основе интерметаллида Ni_3Nb [12]. Эти сплавы имеют высокую технологическую пластичность, что позволяет их подвергать все-

сторонней изотермической ковке в широком интервале температур благодаря тому, что инкубационный период выделения интерметаллидной фазы на основе Ni_3Nb составляет 5...10 минут в температурном интервале их об-

работки. Механизм формирования УМЗ структуры типа субмикродуплекс в сплаве ЭК61 при ДТО с использованием схемы ВИК во многом аналогичный, как и в сплаве Inconel 718 [12]. В сплаве ЭК61 удалось сформировать УМЗ структуру дуплексного типа (рис.2б), в которой наблюдали новые рекристаллизованные зерна γ -фазы равноосной формы, свободные от дислокаций. Причем на многих межзеренных границах выявляется характерный для равновесных высокоугловых границ полосчатый контраст. По границам и в тройных стыках зерен γ -фазы наблюдаются глобулярные некогерентные выделения термически стабильной δ -фазы эллипсоидной формы. Во всем объеме деформированного материала была сформирована однородная УМЗ структура дуплексного типа (средний размер зерен γ -фазы составил $\sim 0,3$ мкм).

В титановых сплавах, как показано в работах [2, 5, 6], при деформации процесс перехода пластинчатой структуры в глобулярную в сплаве протекает благодаря развитию непрерывной динамической рекристаллизации. В пластинах фаз формируются поперечные малоугловые границы, которые постепенно перестраиваются в большеугловые границы зерен, а полуккогерентные межфазные границы трансформируются в некогерентные. Ввиду неравномерного распределения поля скоростей деформации в объеме заготовки при всесторонней изотермической ковке на каждом переходе со сменой оси деформации деформируются новые нерекристаллизованные объемы [5, 6]. В результате проведенных операций удастся полностью рекристаллизовать микроструктуру практически любой объемной заготовки [2]. Аналогичные процессы структурообразования имели место при ВИК сплава ВТ22. Структура титанового сплава ВТ22 послековки представлена на рис.2в. Как видно, она имеет смешанный характер. Наряду с зернами субмикрорекристаллического размера, имеющих высокоугловые границы, о чем свидетельствует полосчатый контраст на границах зерен, присутствуют ячейки дислокаций. Средний размер структурных составляющих порядка 0,38 мкм.

В таблице 1 представлены значения микротвердости исследованных материалов после ВИК. Для зависимости микротвердость – размер зерна выполняется соотношение Холла – Петча [22], значения микротвердости при этом

увеличились на: ЭП741НП ~ 10 %, ЭК61 ~ 34 %, ВТ22 ~ 5 %.

Таблица 1. Измерения микротвердости после ВИК

Table 1. Microhardness measurements after MIF

| | Микротвердость, ГПа | |
|---------|---------------------|-----------|
| | Исходное состояние | После ВИК |
| ЭП741НП | 5,07±0,2 | 5,12±0,19 |
| ЭК61 | 3,14±0,15 | 4,23±0,18 |
| ВТ22 | 3,95±0,19 | 4,17±0,16 |

Закключение

Экспериментально установлено, что ВИК является эффективным методом для получения УМЗ структуры в массивных объемных заготовках из жаропрочных никелевых сплавов ЭК61 и ЭП741НП с различным типом упрочняющей фазы, а также в титановом сплаве ВТ22.

Список литературы

1. Мулюков Р.Р., Имаев Р.М., Назаров А.А. и др. Сверхпластичность ультрамелкозернистых сплавов: эксперимент, теория, технология. М.: Наука, 2014. 284 с.
2. Мулюков Р.Р. Развитие принципов получения и исследование объёмных наноструктурных материалов в ИПСМ РАН // Российские нанотехнологии. 2007. Т. 2(7–8). С. 38–53.
3. Кайбышев О.А., Салищев Г.А., Галеев Р.М., Лутфуллин Р.Я., Валиахметов О.Р. Способ обработки титановых сплавов. Патент РФ № 2134308, 10.08.1999.
4. Валиев Р.З., Исламгалиев Р.К., Александров И.В. Объёмные наноструктурированные материалы полученные интенсивной пластической деформацией. Москва: Академкнига, 2007. 398 с.
5. Salishchev G.A., Imaev R.M., Imaev V.M. et al. Formation of a submicrocrystalline structure in TiAl and Ti₃Al intermetallics by hot working // Mat. Sci. Eng. 2000. V. 286. P. 236–243.
6. Zherebtsov S.V., Salishchev G.A., Galeyev R.M. et al. Production of submicrocrystalline structure in large-scale Ti–6Al–4V billet by warm severe deformation processing // Scripta Materialia. 2004. V. 51, N 12. P. 1147–1151.

7. Reed R.C. The superalloys: Fundamentals and Applications. Cambridge University Press, 2006. 372 p.
8. Логунов А.В. Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток и дисков газовых турбин. Москва, ООО «Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2017. 854 с.
9. 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.
10. Ganeev A.A., Valitov V.A., Nagimov M.I., Imayev V.M. Effect of hot forging on the microstructure and superplastic properties of the powder nickel base superalloy EP741NP // Lett. Mater. 2020. V. 10, N 1. P. 100–105.
11. Valitov V.A., Mulyukov R.R., Gigliotti M.F.X., Subramanian P.R. Superalloys 2008 // TMS. 2008. P. 325–331.
12. Валитов В.А., Лутфуллин Р.Я., Сафиуллин Р.В., Мухтаров Ш.Х., Мухаметрахимов М.Х. Низкотемпературная сверхпластичность никелевого сплава Inconel 718 с субмикросталлической структурой // Материаловедение. 2009. № 4. С. 21–27.
13. 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.
14. Akula S.P. et al. A Review on Superplastic Forming of Ti-6Al-4V Alloy // Journal of Alloys and Compounds. 2019. Retrieved from: <https://www.researchgate.net/publication/335755437>.
15. Salishchev G.A. Development of Ti-6Al-4V sheet with low temperature superplastic properties // Journal of Materials Processing Technology. 2001. V. 116. P. 265–268.
16. Naydenkin E.V., Ratochka I.V., Mishin I.P., Lykova O.N. Development of near β titanium alloy with high strength and superplastic properties // AIP Conference Proceedings. 2017. 1909(1):020146.
17. Ratochka I.V., Naydenkin E.V., Lykova O.N., Mishin I.P. The Influence of Severe Plastic Deformation and Subsequent Annealing on Structure and Mechanical Properties of VT35 Titanium Alloy // Russian Physics Journal. 2021. V. 64. P. 636–642.
18. Ratochka I.V., Naydenkin E.V., Mishin I.P., Lykova O.N., Zabudchenko O.V. Low-temperature superplasticity of ultrafine-grained near β titanium alloy // Journal of Alloys and Compounds. 2022. V. 891. 161981.
19. Классман Е.Ю., Астанин В.В. Низкотемпературная сверхпластичность титанового сплава VT22 // Письма о материалах. 2020. Т. 10, № 1. С. 10–15.
20. Jiang B.Z., Emura S., Tsuchiya K. Microstructures and mechanical properties of Ti5553 alloy processed by high-pressure torsion // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2014. V. 63. 012069.
21. A. Zafari, X. S. Wei, W. Xu and K. Xia. Effects of severe plastic deformation on grain refinement and martensitic transformation in a metastable β -Ti alloy // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2015. V. 89. 012055.
22. Petch N.J. The Cleavage Strength of Polycrystals // Journal of the Iron and Steel Institute. 1953. V. 174. P. 25–28.

Информация об авторах

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

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

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

Р. Я. Лутфуллин – доктор технических наук, главный научный сотрудник Института проблем сверхпластичности металлов РАН.

References

- 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.).
- Mulyukov, R. R. (2007). Development of the principles of obtaining and research of bulk nanostructured materials in IPSM RAS. *Russian Nanotechnologies*, 2(7–8), 38–53. (In Russ.).
- Kaibyshev, O. A., Salishchev, G. A., Galeev, R. M., Lutfullin, R. Ya. & Valiakhmetov, O.R. Processing method for titanium alloys. RF patent No. 2134308, 10.08.1999. (In Russ.).
- Valiev, R. Z., Islamgaliev, R. K. & Alexandrov, I. V. (2007). Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. Moscow, Akademkniga. P. 398. (In Russ.).
- Salishchev, G. A., Imayev, R. M. & Imayev, V. M. et al. (2000). Formation of a submi-

- crocrystalline structure in TiAl and Ti₃Al intermetallics by hot working. *Mat.Sci.Eng.*, 286, 236–243.
6. Zherebtsov, S. V., Salishchev, G. A. & Galeev, R. M. et al. (2004). Production of submicrocrystalline structure in largescale Ti–6Al–4V billet by warm severe deformation processing. *Scripta Materialia*, 51, 1147–1151.
 7. Reed, R. C. (2006). *The superalloys: Fundamentals and Applications*. Cambridge University Press. P. 372.
 8. 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.).
 9. Rao, K. A. (2018). Nickel Based Superalloys – Properties and Their Applications. *International Journal of Management, Technology And Engineering*, 8(V).
 10. Ganeev, A. A., Valitov, V. A., Nagimov, M. I. & Imayev, V. M. (2020). Effect of hot forging on the microstructure and superplastic properties of the powder nickel base superalloy EP741NP. *Lett. Mater.*, 10(1), 100–105.
 11. Valitov, V. A., Mulyukov, R. R., Gigliotti, M. F. X. & Subramanian, P. R. (2008). Superalloys 2008. *TMS*, 325–331.
 12. Valitov, V. A., Lutfullin, R. Ya., Safiullin, R. V., Mukhtarov, Sh. Kh. & Mukhametrakhimov, M. Kh. (2009). Low-Temperature Superplasticity of Inconel 718 Nickel Alloy with Submicrocrystalline Structure. *Materials Science*, (4), 21–27. (In Russ.).
 13. Valitov, V., Mukhtarov, Sh., Lutfullin, R., Safiullin, R. & Mukhametrakhimov, M. (2011). Microstructure and Properties of Nanostructured Alloy 718. *Advanced Materials Research*, 278–283.
 14. Akula, S. P. et al. (2019). A Review on Superplastic Forming of Ti-6Al-4V Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. Retrieved from: <https://www.researchgate.net/publication/335755437>
 15. Salishchev, G. A. et al. (2001). Development of Ti-6Al-4V sheet with low temperature superplastic properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 116, 265–268.
 16. Naydenkin, E. V., Ratochka, I. V., Mishin, I. P. & Lykova, O. N. (2017). Development of near β titanium alloy with high strength and superplastic properties. *AIP Conference Proceedings*, 1909, 020146.
 17. Ratochka, I. V., Naydenkin, E. V., Lykova, O. N. & Mishin, I. P. (2021). The Influence of Severe Plastic Deformation and Subsequent Annealing on Structure and Mechanical Properties of VT35 Titanium Alloy. *Russian Physics Journal*, 64, 636–642.
 18. Ratochka, I. V., Naydenkin, E. V., Mishin, I. P., Lykova, O. N. & Zabudchenko, O. V. (2022). Low-temperature superplasticity of ultrafine-grained near β titanium alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 891, 161981.
 19. Klassman, E. Yu. & Astanin, V. V. (2020). Low-temperature superplasticity of VT22 titanium alloy. *Letters on Materials*, 10(1), 10–15. (In Russ.).
 20. Jiang, B. Z., Emura, S. & Tsuchiya, K. (2014). Microstructures and mechanical properties of Ti5553 alloy processed by high-pressure torsion. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 63, 012069.
 21. Zafari, A., Wei, X. S., Xu, W. & Xia, K. (2015). Effects of severe plastic deformation on grain refinement and martensitic transformation in a metastable β -Ti alloy. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 89, 012055.
 22. Petch, N. J. (1953). The Cleavage Strength of Polycrystals. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 174, 25–28.

Information about the authors

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

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

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

R. Ya. Lutfullin – Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher at the Institute for Metals Superplasticity Problems of the Russian Academy of Sciences.

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

Статья поступила в редакцию 08.11.2022; одобрена после рецензирования 18.11.2022; принята к публикации 25.11.2022.

The article was received by the editorial board on 08 Nov. 22; approved after reviewing 18 Nov. 22; accepted for publication 25 Nov. 22.