

ISSN 2410-9908

Received: 02.07.2024 Revised: 15.11.2024 Accepted: 06.12.2024 DOI: 10.17804/2410-9908.2024.6.091-106

THE EFFECT OF THE STRESS-STRAIN STATE DURING ROTARY FORGING ON THE MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF THE Ti–39Nb–7Zr TITANIUM ALLOY

Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures Issue 6, 2024

G. Zh. Mukanov^{a, *} and V. P. Kuznetsov^b

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, 19 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russia

^a **b** https://orcid.org/0000-0001-5611-4064 **a** g.zh.mukanov@urfu.ru; ^b **b** https://orcid.org/0000-0001-8949-6345 **a** wpkuzn@mail.ru

*Corresponding author. Email: g.zh.mukanov@urfu.ru Address for correspondence: ul. Mira, 28, Ekaterinburg, 620062, Russia Tel.: +7 (912) 692-4334

The paper studies the effect of the stress-strain state of a hot-rolled Ti–39Nb–7Zr titanium alloy bar on its microstructure and properties during rotary forging. Rotary forging is considered as a promising method for severe plastic deformation, which provides the formation of an ultrafine-grained structure, uniform distribution of plastic strain, and improvement of the alloy properties.

To determine the stress-strain state, a finite element model is developed; namely, the workpiece geometry is completely reconstructed, the materials and their properties are determined, a finite element grid is generated, the model solver is tuned, the boundary conditions and loads are assigned. The simulation is carried out by the finite element method enabling us to take into account complex three-dimensional tool trajectories and strain distribution during rotary forging. The mechanical properties of the material are determined experimentally and used to construct a model of hardening. The simulation takes into account the material behavior under pre-deformation heating to 450 °C.

The simulation results show that the maximum strains in the rotary-forged bar reach 955 MPa in the tool–bar contact zone. The analysis of the specimen cross-section reveals concentric zones with a uniform stress distribution and residual longitudinal compressive stresses $\sigma_{yy}^0 = 200$ MPa. The longitudinal stress distribution demonstrates high stresses in the tool–bar contact zone and a stress gradient from the contact zone to the specimen periphery.

The study of the alloy microstructure after rotary forging discovers the presence of significant plastic strains and a high dislocation density in the surface zone. The material microhardness increases to 350 HV in the surface zone, as compared to 250 HV in the central part of the specimen. Rotary forging forms a texture and the anisotropy of the mechanical properties, this being supported by the measurements of the elastic modulus varying from 70 to 90 GPa through the bar cross-section.

The study aims at developing a multicomponent dynamic 3D model designed to simulate rotary forging of a Ti–39Nb–7Zr titanium alloy bar using the Ansys Mechanical software. A bar made from the Ti–39Nb–7Zr biocompatible alloy by hot rolling in the β region at the VSMPO-AVISMA Corporation is used as the test material.

Keywords: β -titanium alloys, rotary forging, finite element simulation, plastic deformation, mechanical properties



Acknowledgment

The study was performed by the Youth Laboratory of Material Surface Modification at the Yeltsin UrFU under the agreement with the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, N_{20} 075-03-2024-009/4 dated April 11, 2024 (FEUZ-2024-0020).

References

1. Chui, P., Jing, R., Zhang, F., Li, J., and Feng, T. Mechanical properties and corrosion behavior of β -type Ti–Zr–Nb–Mo alloys for biomedical application. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 842, 155693. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.155693.

2. Kim, K.M., Kim, H.Y., and Miyazaki, S. Effect of Zr content on phase stability, deformation behavior, and Young's modulus in Ti–Nb–Zr alloys. *Materials*, 2020, 13 (2) 476. DOI: 10.3390/ma13020476.

3. Lee, T., Lee, S., Kim, I.-S., Moon, Y.H., Kim, H.S., and Park, C.H. Breaking the limit of Young's modulus in low-cost Ti–Nb–Zr alloy for biomedical implant applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 828, 154401. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.154401.

4. Illarionov, A., Mukanov, G., Stepanov, S., Kuznetsov, V., Karelin, R., Andreev, V., Yusupov, V., and Korelin, A. Microstructure and physico-mechanical properties of biocompatible titanium alloy Ti–39Nb–7Zr after rotary forging. *Metals*, 2024, 14 (5), 497. DOI: 10.3390/met14050497.

5. Han, X., Zeng, F., Zhuang, W., Hua, L., Hu, Y., and Wang, Z. An innovative rotary rollingforging process for manufacturing fork ring with extreme geometry. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 322, 118160. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2023.118160.

6. Chuvildeev, V.N., Kopylov, V.I., Nokhrin, A.V., Bakhmetev, A.M., Tryaev, P.V., Tabachkova, N.Yu., Chegurov, M.K., Kozlova, N.A., Mikhailov, A.S., Ershova, A.V., Gryaznov, M.Yu., Shadrina, Ya.S., Likhnitskii, K.V., Stepanov, S.P., and Myshlyaev, M.M. Enhancement of the strength and the corrosion resistance of a PT–7M titanium alloy using rotary forging. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2021, 2021, 600–610. DOI: 10.1134/S0036029521050050.

7. Andreev, V.A. A technology for manufacturing round long semi-finished products from titanium-nickelide-based shape-memory alloys by warm rotary forging. In: *Perspektivnye materialy i tekhnologii* [Promising Materials and Technologies, ed., V.V. Rubanik]. BGU Publ., Minsk, 2021, p. 504–516. (In Russian).

8. Han, X.H. and Hua, L. Effect of process parameters on wear in cold rotary forging by using 3D FE numerical simulation. *Ironmaking & Steelmaking*, 2013, 40 (1), 50–60.

9. Lopatin, N.V. Effect of hot rolling by screw mill on microstructure of a Ti–6Al–4V titanium alloy. *International Journal of Material Forming*, 2013, 6 (4), 459–465. DOI: 10.1007/s12289-012-1099-2.

10. Loyda, A., Reyes, LA., Hernández-Muñoz, G.M., García-Castillo, F.A., and Zambrano-Robledo, P. Influence of the incremental deformation during rotary forging on the microstructure behaviour of a nickel-based superalloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97, 2383–2396. DOI: 10.1007/s00170-018-2105-8.

11. Zhang, S.-H., Zhang, H.-Y., Song, H.-W., and Cheng, M. FEM simulation of hot forging process to predict microstructure evolution. *AIP Conference Proceedings*, 2013, 1532 (1), 262–268. DOI: 10.1063/1.4806833.

12. Yuan, S., Wang, X., Liu, G., and Chou, D. The precision forming of pin parts by colddrawing and rotary-forging. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 86 (1–3), 252–256. DOI: 10.1016/S0924-0136(98)00321-5.

13. Han, X. and Hua, L. 3D FE modelling of contact pressure response in cold rotary forging. *Tribology International*, 2013, 57, 115–123. DOI: 10.1016/j.triboint.2012.07.012.



14. Zheng, Y., Liu, D., Yang, Y., Zhang, Z., Li, X., and Zhang, R. Microstructure evolution of Ti–6Al–4V with periodic thermal parameters during axial closed die rolling process. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 735, 996–1009. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.11.197.

15. Zheng, Y., Liu, D., Yang, Y., Ren, L., Zhang, Z., and Gao, G. Investigation on metal flow during the hot axial closed die rolling process for titanium alloy discs. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87, 2445–2458. DOI: 10.1007/s00170-016-8650-0.

16. Han, X., Hu, Y., and Hua, L. Cold orbital forging of gear rack. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, 117, 227–242. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2016.09.007.

17. Xuan, T.D., Sheremetyev, V.A., Kudryashova, A.A., Galkin, S.P., Andreev, V.A., Prokoshkin, S.D., and Brailovski, V. Influence of the combined radial shear rolling and rotary forging on the stress-strain state of the small diameter bar stock of titanium-based alloys. *Izvestiya Vuzov*. *Non-Ferrous Metallurgy*, 2020, 2, 22–31. (In Russian). DOI: 10.17073/0021-3438-2020-2-22-31.

18. Illarionov, A.G., Grib, S.V., and Yurovskikh, A.S. Scientific approaches to the development of titanium-based alloys for medical implants. *Solid State Phenomtna*, 2020, 299, 462–467. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.462.

19. Gadala, M.S. *Finite Elements for Engineers with Ansys Applications*, Cambridge University Press, Cambridge, 2020, 626 p.



Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures Issue 6, 2024

ISSN 2410-9908

Подана в журнал: 02.07.2024 УДК 539.374:51-7:669 DOI: 10.17804/2410-9908.2024.6.091-106

http://dream-journal.org

ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ РОТАЦИОННОЙ КОВКЕ НА МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ті–39Nb–7Zr

Г. Ж. Муканов^{а, *}, В. П. Кузнецов⁶

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», ул. Мира, д. 19, г. Екатеринбург, 620062, Россия

^a b https://orcid.org/0000-0001-5611-4064 g.zh.mukanov@urfu.ru; ⁶ b https://orcid.org/0000-0001-8949-6345 wpkuzn@mail.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: g.zh.mukanov@urfu.ru Адрес для переписки: ул. Мира, 28, г. Екатеринбург, 620062, Россия Тел.: +7 (912) 692-43-34

Настоящая работа посвящена исследованию влияния напряженно-деформированного состояния горячекатаного прутка из титанового сплава Ti-39Nb-7Zr на микроструктуру и свойства при ротационной ковке. Ротационная ковка рассматривается как перспективный метод интенсивной пластической деформации, обеспечивающий формирование ультрамелкозернистой структуры, равномерное распределение пластической деформации и улучшение свойств сплава.

Для определения напряженно-деформированного состояния разработана конечноэлементная модель, а именно: произведено полное воссоздание геометрии заготовки, определение материалов и их свойств, генерация сетки конечных элементов, настройка решателя модели и назначение граничных условий и нагрузок. Моделирование проводилось с использованием метода конечных элементов, что позволило учесть сложные трехмерные траектории движения инструментов и распределение деформаций в процессе РК. Механические свойства материала были определены экспериментально и использованы для построения модели упрочнения. При моделировании учитывалось поведение материала при нагреве перед деформацией на температуру 450 °C.

Результаты моделирования показали, что максимальные напряжения в прутке после ротационной ковки достигают 955 МПа в зоне контакта с инструментом. Анализ поперечного сечения образца выявил концентрические зоны с равномерным распределением напряжений и остаточные продольные сжимающие напряжения $\sigma_{yy}^0 = 200$ МПа. Продольное распределение напряжений демонстрирует высокие напряжения в зоне контакта ковочного инструмента и градиент напряжений от зоны контакта к периферии образца.

Исследование микроструктуры сплава после ротационной ковки показало наличие значительных пластических деформаций и высокую плотность дислокаций в поверхностной зоне. Микротвердость материала увеличилась до 350 HV в поверхностной зоне, по сравнению с 250 HV в центральной части образца. Ротационная ковка приводит к формированию текстуры и анизотропии механических свойств, что подтверждается измерениями модуля упругости, который варьируется от 70 до 90 ГПа по сечению прутка.

Цель работы заключалась в разработке многокомпонентной динамической 3D-модели для моделирования процессов ротационной ковки прутка из титанового сплава Ti–39Nb–7Zr с использованием программного пакета Ansys Mechanical. В качестве материала исследования использовался горячекатаный в β-области пруток из биосовместимого сплава Ti–39Nb–7Zr, произведенный на ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».



1. Введение

Активное развитие области металловедения для медицинских приложений требует постоянного создания новых материалов для имплантатов и развития технологий их обработки. Одним из самых перспективных материалов для изготовления костных имплантатов являются биосовместимые сплавы на основе системы Ti–Zr–Nb, которые сочетают в себе уникальные биомеханические и биохимические свойства [1, 2]. Получение из этого сплава прутковых заготовок диаметром 8–12 мм с высоким комплексом функциональных свойств, необходимых для изготовления костных имплантатов, является важной задачей [3]. В этом контексте высокотемпературная термомеханическая обработка, включая ротационную ковку (PK), представляется эффективным технологическим подходом к получению прутков с заданным диметром, обладающих должным уровнем механических свойств [4].

Математическое моделирование методов обработки металлов давлением (ОМД) играет важную роль в изучении особенностей пластической деформации, особенно в процессах со сложной геометрией, таких как РК. Ротационная ковка является разновидностью ОМД, которая часто используется для изменения диаметра сплошных или трубчатых изделий [5–7].

Исследование процессов интенсивной пластической деформации с помощью метода конечных элементов (МКЭ) является эффективным, несмотря на сложные трехмерные траектории движения инструментов деформируемого металла. В предыдущих исследованиях некоторые компьютерные программы использовались для моделирования таких процессов. Так, в работе [8] изучали влияние параметров оснастки на контактное напряжение при ротационной ковке. В работе [9] рассматривалось влияние горячей РК на микроструктуру титановых сплавов с помощью пакета LS-DYNA. Работа [10] направлена на исследование влияния инкрементального характера деформации при горячей ротационной ковке на эволюцию микроструктуры суперсплава на никелевой основе с использованием программного пакета Deform 3D. В работе [11] с помощью конечно-элементного моделирования прогнозировалось трещинообразование с дальнейшим разрушением титанового сплава ТС11 при субтранзитивной ковке. Помимо этого, трехмерное моделирование использовали для выявления механизма пластической деформации дисковой заготовки [12]. Хань и Хуа [8, 13] выявили механизм износа дисковой и кольцевой заготовок и спрогнозировали срок службы штампа. Чжэн и др. [14, 15] исследовали закон пластической деформации и процесс эволюции микроструктуры труднодеформируемых материалов. Хань и др. [16] изучили ротационную ковку невращающихся зубчатых колес и других невращающихся деталей.

В работе [17] с использованием метода конечных элементов, реализованного в программе QForm VX, проведено моделирование сочетания процессов радиально-сдвиговой прокатки (РСП) и РК с целью предсказания распределения пластической деформации изделия по сечению, а также скорости деформации и полей напряжений. Полученные данные использовались для изучения микроструктуры прутков из титанового сплава Ti–6Al–4V и сплава с памятью формы системы Ti–Zr–Nb.

Несмотря на это, на текущий момент недостаточно исследовано влияние напряженнодеформированного состояния при ротационной ковке цилиндрических прутков для сплавов системы Ti–Nb–Zr. В связи с этим в данной работе было изучено напряженнодеформированное состояние, микроструктура и свойства прутка из титанового сплава Ti–39Nb–7Zr после ротационной ковки.

2. Материал и методики

В качестве материала для исследования использовали полученный в промышленных условиях на ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» горячекатаный в β-области пруток



ISSN 2410-9908

из опытного биосовместимого β-сплава титана Ti–39Nb–7Zr, состав которого выбран на основе рекомендаций, предложенных в работе [18], и приведен в таблице.

Таблица

C	реднии хими	ческий сос	гав исследу	емого сплав	a (Macc. %)	
ппар	Ti	Nh	7r	Fo	Ni	Cr

Сплав	Ti	Nb	Zr	Fe	Ni	Cr
Ti-39Nb-7Zr	осн.	39,5	7,09	0,031	0,032	0,015

На рис. 1 представлены принцип и схема РК прутков с помощью двухбойковой ротационно-ковочной машины, где обработка заготовки происходит небольшими шагами при высокочастотном возвратно-поступательном движении калиброванных бойков. Рабочая поверхность калибров охватывает практически весь внешний контур очага деформации, обеспечивая равномерное сжатие заготовки по периметру и увеличивая однородность пластической деформации по поперечному сечению.



Рис. 1. Принципиальная схема ротационной ковки прутков

В данной работе для изучения распределения полей деформации была построена математическая 3D-модель с использованием программного комплекса Ansys Mechanical.

Результаты численного моделирования зависят от ряда факторов, которые были учтены при построении моделей. На рис. 2 схематично изображен периметр краевых условий конечно-элементной модели.

Построение математических моделей и получение результатов – это многоэтапный итеративный процесс. Ниже описаны основные шаги, которые были предприняты при моделировании ротационной ковки.

1. Создание геометрии заготовки: геометрические параметры 3D-модели в точности повторяли параметры ковочного узла и заготовки; прутковый полуфабрикат имел диаметр $d_1 = 18,2$ мм.

2. Определение материалов и свойств: перед проведением ротационной ковки пруток нагревали на температуру 450 °C в течение 20 минут (перед 1-й ковкой) и 5 минут (между проходами); для обеспечения данного условия при моделировании были проведены экспериментальные исследования теплофизических свойств титанового сплава Ti-39Nb-7Zr при



ISSN 2410-9908

нагреве; полученные свойства были использованы как исходные данные в моделях и представлены на рис. 3.



Рис. 2. Схема основных параметров конечно-элементной модели процессов ротационной ковки

Определение упругих характеристик по сечению прутка при комнатной температуре осуществлялось на основании данных микроиндентирования на приборе Conscan CSM Instruments с индентором Виккерса при нагрузке 9 Н. Также проведены измерения модуля упругости методом ДМА с температурой нагрева до 600 °C. При температуре 400 °C значительных изменений модуля упругости не наблюдается (снижение на 2 ГПа от значений при комнатной температуре). В связи с этим было принято значение модуля упругости 70 ГПа.





Рис. 3. Изменение теплофизических свойств при нагреве: удельная теплоемкость (*a*); температуропроводность (б)

Для учета механических свойств материала использовалась мультилинейная кинематическая модель упрочнения. Для описания модели были проведены испытания на растяжение цилиндрических образцов диаметром 4 мм на электромеханической испытательной машине Instron 3382. Результаты испытаний представлены в виде диаграммы нагружения в истинных координатах $\sigma_{ист} - \varepsilon_{ист}$ (рис. 4) и были импортированы в модель упрочнения материала в программном интерфейсе Ansys.



Рис. 4. Диаграмма истинных напряжений-деформаций по результатам растяжения сплава Ti-39Nb-7Zr

3. Генерация сетки конечных элементов: в первую очередь при формировании сетки был использован обобщенный показатель качества Element Quality для оценки качества сетки; в текущей работе данный показатель принимал значение в диапазоне от 0,87 до 0,99, что свидетельствует о низкой вероятности корректности выбора адаптивного преобразования сетки. Было важно сохранить значение в данном диапазоне, в противном случае расчетное время вычислений увеличивается кратно. Для этого сеточное разбиение несло градиентный характер: размер одной элементарной ячейки составляет 0,5 мм, при этом в предполагаемых зонах локализации напряжений сетка измельчена до значений 0,05 мм. Общее количество узлов – 715 400, общее количество элементов – 295 219. Рисунок 5 отражает сеточную структуру расчетной модели исследуемого образца.



Рис. 5. Сеточное покрытие заготовки для моделирования ротационной ковки



ISSN 2410-9908

http://dream-journal.org

4. Настройки решателя модели: для вычислений и контроля сходимости результатов был выбран метод Эйлера – Лагранжа. Лагранж-эйлерова постановка – это основной подход к численному моделированию в механике сплошных сред, который может быть использован в программном обеспечении Ansys. В данном подходе каждая частица материала отслеживается по отдельности в пространстве и времени. Это означает, что координаты каждой точки материала изменяются во времени и процессы анализируются относительно движущихся элементов. Метод Лагранжа обычно используется для моделирования динамических процессов, таких как деформация твердого тела или течение жидкости вокруг твердых объектов [19].

5. Назначение граничных условий и нагрузок: ротационная ковка включала 12 проходов с обжатием за проход до 1 мм; накопленная в ходе РК истинная степень деформации (*e*) составила 1,14, общая вытяжка – 2,4 (исходная длина прутка – 25 мм, а конечная длина – 60 мм); относительное сужение прутка – 68 %; относительная степень деформации по удлинению за проход в среднем составляла 10 %.

3. Результаты и обсуждение

В результате проведения ряда расчетов моделирования процессов ротационной ковки титанового сплава Ti–39Nb–7Zr был определен характер деформирования и распределения напряжений. На рис. 6 представлено изображение распределения эквивалентных напряжений по Мизесу в прутке.



Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в прутке после РК (изометрия)

Проведем детальный анализ результатов моделирования напряженно-деформированного состояния образца после ротационной ковки. Изображение в поперечном сечении дает представление о распределении напряжений по сечению образца: вдоль окружности наблюдается равномерное распределение напряжений, максимальные напряжения сконцентрированы ближе к периферии образца, а центральная часть испытывает меньшие напряжения (концентрические зоны); распределение напряжений симметрично относительно центра, что указывает на равномерность приложения деформирующих усилий (симметрия).

Моделирование показывает наличие остаточных продольных сжимающих напряжений σ_{yy}^{0} (рис. 7 б, 8 б) после ковки. Эти напряжения могут негативно повлиять на усталостную прочность и коррозионную стойкость материала. Для устранения остаточных напряжений рекомендуется провести термическую обработку.

Рис. 7. Напряженно-деформированное состояние прутка в поперечном разрезе: эквивалентная пластическая деформация (*a*); остаточные продольные сжимающие напряжения σ⁰_{yy}(*б*); эквивалентные напряжения по Мизесу (*в*)

Изображение в продольном сечении показывает распределение эквивалентных напряжений по длине образца: области максимальных напряжений (около 955 МПа) наблюдаются в зоне контакта ковочного инструмента с материалом, что подтверждается красными и желтыми цветами в этих зонах. Эти напряжения возникают из-за значительных пластических деформаций в процессе ковки.

ISSN 2410-9908

Наблюдается плавный градиент напряжений от зоны контакта к периферии образца. Центральная часть образца имеет значительно меньшие напряжения, что свидетельствует о локализованности деформаций.

Продольное распределение: вдоль длины образца видны участки с пониженным уровнем напряжений (зеленые и синие зоны), что указывает на более низкую степень деформации в этих областях.

Рис. 8. Напряженно-деформированное состояние прутка в продольном разрезе: эквивалентная пластическая деформация (*a*); остаточные продольные сжимающие напряжения $\sigma^0_{yy}(\delta)$; эквивалентные напряжения по Мизесу (*в*)

Рассмотрим микроструктуру сплава Ti-39Nb-7Zr после ротационной ковки по сечению прутка (рис. 9). В поверхностной зоне наблюдаются значительные пластические дефор-

ISSN 2410-9908

http://dream-journal.org

мации и, поскольку температура 400 °C не достигает уровня, необходимого для полной рекристаллизации в сплаве Ti–39Nb–7Zr, здесь ожидается высокая плотность дислокаций и фиксируется наличие деформированных зерен.

Рис. 9. Зеренная структура сплава Ti-39Nb-7Zr после РК по сечению прутка

Процесс ротационной ковки приводит к формированию текстуры в материале, что создает анизотропию механических свойств. Неоднородность микроструктуры и кристаллографической текстуры по толщине полуфабриката приводит к отличиям уровня механических свойств. На рис. 10 показаны результаты измерения микротвердости и контактного модуля упругости прутка после РК по сечению.

Изменение микротвердости и контактного модуля упругости по продольному сечению прутка из титанового сплава Ti-39Nb-7Zr после РК показывает рост от центра (280 HV) к поверхности (340 HV), связанный с вышеописанной неоднородностью микроструктуры по сечению.

ISSN 2410-9908

Рис. 10. Изменение механических свойств по сечению прутка после ротационной ковки: микротвердость (*a*); модуль упругости (б)

4. Заключение

В настоящем исследовании проведен комплексный анализ процессов ротационной ковки титанового сплава Ti-39Nb-7Zr с использованием многокомпонентной динамической 3D-модели в программном пакете Ansys Mechanical. Основные результаты и выводы работы можно резюмировать следующим образом.

Проведенный анализ результатов моделирования напряженно-деформированного состояния образца после ротационной ковки демонстрирует значительную концентрацию напряжений в зоне контакта бойков с заготовкой и постепенное уменьшение напряжений к центральной части образца. Этот характер отражается на зеренной структуре материала.

Микротвердость материала после ротационной ковки увеличивается. В поверхностной зоне микротвердость достигала 350 HV, по сравнению с 250 HV в центральной части образца. Этот рост связан с высокой плотностью дислокаций и изменением микроструктуры материала.

Обнаружена неоднородность микроструктуры и механических свойств по толщине полуфабриката. Подобные градиенты могут быть использованы для создания материалов с улучшенными поверхностными свойствами, что важно для медицинских имплантатов. До-полнительные технологические операции, такие как старение после РК, могут помочь снизить неоднородность и оптимизировать свойства материала.

Таким образом, полученные результаты моделирования и экспериментальные данные подтверждают эффективность ротационной ковки как метода улучшения механических свойств и микроструктуры титановых сплавов для медицинских приложений. Эти данные

будут полезны при дальнейшей разработке и оптимизации технологических процессов обработки биосовместимых материалов. Важно учитывать полученные данные при дальнейшей обработке материала и при разработке технологических процессов, направленных на улучшение эксплуатационных свойств изделия, таких как термообработка для снижения остаточных продольных сжимающих напряжений и контроль микроструктуры для обеспечения оптимального сочетания прочности и пластичности.

Благодарность

Работа выполнена в молодежной лаборатории модификации поверхностей материалов ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» в рамках соглашения с Министерством науки и высшего образования № 075-03-2024-009/4 от 11.04.2024 (номер темы FEUZ-2024-0020).

Литература

1. Mechanical properties and corrosion behavior of β -type Ti–Zr–Nb–Mo alloys for biomedical application / P. Chui, R. Jing, F. Zhang, J. Li, T. Feng // Journal of Alloys and Compounds. – 2020. – Vol. 842. – P. 155693. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.155693.

2. Kim K. M., Kim H. Y., Miyazaki S. Effect of Zr content on phase stability, deformation behavior, and Young's modulus in Ti–Nb–Zr alloys // Materials. – 2020. – Vol. 13 (2). – P. 476. – DOI: 10.3390/ma13020476.

3. Breaking the limit of Young's modulus in low-cost Ti–Nb–Zr alloy for biomedical implant applications / T. Lee, S. Lee, I.-S. Kim, Y. H. Moon, H. S. Kim, C. H. Park // Journal of Alloys and Compounds. – 2020. – Vol. 828. – P. 154401. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.154401.

4. Microstructure and physico-mechanical properties of biocompatible titanium alloy Ti–39Nb–7Zr after rotary forging / A. Illarionov, G. Mukanov, S. Stepanov, V. Kuznetsov, R. Karelin, V. Andreev, V. Yusupov, and A. Korelin // Metals. – 2024. – Vol. 14 (5). – P. 497. – DOI: 10.3390/met14050497.

5. An innovative rotary rolling-forging process for manufacturing fork ring with extreme geometry / X. Han, F. Zeng, W. Zhuang, L. Hua, Y. Hu, Z. Wang // Journal of Materials Processing Technology. – 2023. – Vol. 322. – P. 118160. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2023.118160.

6. Enhancement of the strength and the corrosion resistance of a PT-7M titanium alloy using rotary forging / V. N. Chuvildeev, V. I. Kopylov, A. V. Nokhrin, A. M. Bakhmetyev, P. V. Tryaev, N. Yu. Tabachkova, M. K. Chegurov, N. A. Kozlova, A. S. Mikhailov, A. V. Ershova, M. Yu. Gryaznov, Ya. S. Shadrina, K. V. Likhnitskii, S. P. Stepanov, M. M. Myshlyaev // Russian Metallurgy (Metally). – 2021. – Vol. 2021. – P. 600–610. – DOI: 10.1134/S0036029521050050.

7. Андреев В. А. Технология производства круглых длинномерных полуфабрикатов из сплавов на основе никелида титана с эффектом памяти формы методом тёплой ротационной ковки // Перспективные материалы и технологии / под ред. В. В. Рубаника. – Минск : Издательский центр БГУ, 2021. – С. 504–516.

8. Han X. H., Hua L. Effect of process parameters on wear in cold rotary forging by using 3D FE numerical simulation // Ironmaking & Steelmaking. – 2013. – Vol. 40 (1). – P. 50–60.

9. Lopatin N. V. Effect of hot rolling by screw mill on microstructure of a Ti–6Al–4V titanium alloy // International Journal of Material Forming. – 2013. – Vol. 6 (4). – P. 459–465. – DOI: 10.1007/s12289-012-1099-2.

10. Influence of the incremental deformation during rotary forging on the microstructure behaviour of a nickel-based superalloy/ A. Loyda, L. A. Reyes, G. M. Hernández-Muñoz, F. A. García-Castillo, P. Zambrano-Robledo // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 97. – P. 2383–2396. – DOI: 10.1007/s00170-018-2105-8.

Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures Issue 6, 2024

ISSN 2410-9908

11. FEM simulation of hot forging process to predict microstructure evolution / S.-H. Zhang, H.-Y. Zhang, H.-W. Song, M. Cheng // AIP Conference Proceedings. – 2013. – Vol. 1532 (1). – P. 262–268. – DOI: 10.1063/1.4806833.

12. The precision forming of pin parts by cold-drawing and rotary-forging / S. Yuan, X. Wang, G. Liu, D. Chou // Journal of Materials Processing Technology. – Vol. 86 (1–3). – P. 252–256. – DOI: 10.1016/S0924-0136(98)00321-5.

13. Han X., Hua L. 3D FE modelling of contact pressure response in cold rotary forging // Tribology International. – 2013. – Vol. 57. – P. 115–123. – DOI: 10.1016/j.triboint.2012.07.012.

14. Microstructure evolution of Ti–6Al–4V with periodic thermal parameters during axial closed die rolling process / Y. Zheng, D. Liu, Y. Yang, Z. Zhang, X. Li, R. Zhang // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Vol. 735. – P. 996–1009. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.11.197.

15. Investigation on metal flow during the hot axial closed die rolling process for titanium alloy discs / Y. Zheng, D. Liu, Y. Yang, L. Ren, Z. Zhang, G. Gao // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 87. – P. 2445–2458. – DOI: 10.1007/s00170-016-8650-0.

16. Han X., Hu Y., Hua L. Cold orbital forging of gear rack // International Journal of Mechanical Sciences. – 2016. – Vol. 117. – P. 227–242. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2016.09.007.

17. Влияние комбинации радиально-сдвиговой прокатки и ротационной ковки на напряженно-деформированное состояние прутковой заготовки малого диаметра из титановых сплавов / Т. Д. Суан, В. А. Шереметьев, А. А. Кудряшова, С. П. Галкин, В. А. Андреев, С. Д. Прокошкин, В. Браиловский // Известия Вузов. Цветная металлургия. – 2020. – № 2. – С. 22–31. – DOI: 10.17073/0021-3438-2020-2-22-31.

18. Illarionov A. G., Grib S. V., Yurovskikh A. S. Scientific approaches to the development of titanium-based alloys for medical implants // Solid State Phenomtna. – 2020. – Vol. 299. – P. 462–467. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.462.

19. Gadala M. S. Finite Elements for Engineers with Ansys Applications. – Cambridge : Cambridge University Press, 2020. – 626 p.