

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЯЧЕЙ РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКИ ЗАГОТОВОК ИЗ СВЕРХУПРУГОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Ti–Zr–Nb И СЕРИЙНОГО СПЛАВА ВТ6 МЕТОДОМ QForm-МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2020 г. **Та Динь Суан, В.А. Шереметьев, В.С. Комаров, А.А. Кудряшова,
С.П. Галкин, В.А. Андреев, С.Д. Прокошкин, В. Браиловский**

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия

Институт металлургии и материаловедения (ИМЕТ) им. А.А. Байкова РАН, г. Москва, Россия

ООО «Промышленный центр МАТЭК-СПФ», г. Москва, Россия

Ecole de Technologie Superieure, Montreal, Canada

Статья поступила в редакцию 03.08.20 г., доработана 17.08.20 г., подписана в печать 20.08.20 г.

Аннотация: В программе конечно-элементного моделирования QForm выполнено сравнительное исследование горячей радиально-сдвиговой прокатки (РСП) заготовок из сверхупругого сплава системы Ti–Zr–Nb и серийного сплава ВТ6. Для каждого сплава исследована прокатка по 48 вариантам режимов с варьированием угла подачи и коэффициента вытяжки на 4 уровнях и начальной температуры процесса на 3 уровнях. Реология сплава Ti–Zr–Nb при горячей деформации определена экспериментально методом горячей осадки и импортирована в программу QForm. Выявлено наличие максимумов на кривых течения в начальной стадии деформации, которые отсутствуют у сплава ВТ6. Результаты моделирования представлены в виде полей коэффициента жесткости, интенсивности скорости деформации и степени накопленной деформации в сечении максимального обжатия в зависимости от режима прокатки. Общие закономерности поведения сплавов Ti–Zr–Nb и ВТ6 при РСП имеют сходный характер. С повышением угла подачи и коэффициента вытяжки градиентность исследуемых полей снижается, а усилие и момент прокатки увеличиваются. Температура в начале прокатки не оказывает особого влияния на картину деформации, но существенно влияет на усилие и момент. При этом выявлена большая склонность экспериментального сплава к локализации деформирующих усилий в приконтактной зоне и повышению градиента параметров напряженно-деформированного состояния по сечению заготовки. Исследование формы и глубины утяжки торцов прокатанной заготовки показало, что у сплава Ti–Zr–Nb глубина утяжки больше на 3,5–9,6 %. Показано, что для прокатки опытного сплава требуются усилие и момент прокатки в 1,6–2,4 раза выше, чем для серийного сплава.

Ключевые слова: конечно-элементное моделирование, радиально-сдвиговая прокатка, сверхупругий сплав, реологические зависимости, угол подачи, коэффициент вытяжки, поле коэффициента жесткости напряженного состояния, интенсивности скорости деформации, накопленная степень деформации, утяжка, усилие прокатки, момент прокатки.

Та Динь Суан – аспирант кафедры обработки металлов давлением (ОМД) НИТУ «МИСиС» (119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). E-mail: dinhxuanta@gmail.com.

Шереметьев В.А. – канд. техн. наук, доцент, ст. науч. сотрудник кафедры ОМД НИТУ «МИСиС». E-mail: sheremetyev@misis.ru.

Комаров В.С. – канд. техн. наук, науч. сотрудник лаборатории пластической деформации металлических материалов ИМЕТ РАН (119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 49). E-mail: komarov@misis.ru.

Кудряшова А.А. – аспирант, инженер Научно-образовательного центра наноматериалов и нанотехнологий НИТУ «МИСиС». E-mail: kudryashova@misis.ru.

Галкин С.П. – докт. техн. наук, профессор кафедры ОМД НИТУ «МИСиС». E-mail: glk-omd@yandex.ru.

Андреев В.А. – канд. техн. наук, ген. директор ООО «Промышленный центр МАТЭК-СПФ» (117449, г. Москва, Карьер, 2а, стр. 1-137); ст. науч. сотрудник лаборатории пластической деформации металлических материалов ИМЕТ РАН. E-mail: andreev.icmateks@gmail.com.

Прокошкин С.Д. – докт. физ.-мат. наук, профессор кафедры ОМД НИТУ «МИСиС». E-mail: prokoshkin@tmo.misis.ru.

Браиловский В. – канд. техн. наук, профессор, Ecole de Technologie Superieure (Canada, Montreal 1100, Notre Dame). E-mail: vladimir.brailovski@etsmtl.ca.

Для цитирования: Та Динь Суан, Шереметьев В.А., Комаров В.С., Кудряшова А.А., Галкин С.П., Андреев В.А., Прокошкин С.Д., Браиловский В. Сравнительное исследование горячей радиально-сдвиговой прокатки заготовок из сверхупругого сплава системы Ti–Zr–Nb и серийного сплава ВТ6 методом QForm-моделирования. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2020. No. 6. С. 32–43. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-6-32-43.

Comparative study of superelastic Ti–Zr–Nb and commercial VT6 alloy billets by QForm simulation

Ta Dinh Xuan, V.A. Sheremetyev, V.S. Komarov, A.A. Kudryashova, S.P. Galkin, V.A. Andreev, S.D. Prokoshkin, V. Brailovski

National University of Science and Technology (NUST) «MISIS», Moscow, Russia

Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, RAS, Moscow, Russia

MATEK-SMA Ltd., Moscow, Russia

Ecole de Technologie Superieure, Montreal, Canada

Received 03.08.2020, revised 17.08.2020, accepted for publication 20.08.2020

Abstract: A comparative simulation of hot radial shear rolling (RSR) of billets made of a superelastic Ti–Zr–Nb and a commercial VT6 alloy was performed using the QForm finite element modeling program. Rolling in 48 modes with a variable feed angle and elongation ratio at 4 levels and initial rolling temperature at 3 levels was investigated for each alloy. The Ti–Zr–Nb alloy rheology during hot deformation was determined experimentally by hot upset forging and imported into the QForm program. The presence of maxima on the flow curves at the initial stage of deformation, which are absent in the VT6 alloy, is revealed. Simulation results are presented in the form of fields of the stiffness coefficient, strain rate intensity, cumulative strain degree in the maximum reduction section depending on the rolling mode. General regularities of the Ti–Zr–Nb and VT6 behavior in RSR are similar. The gradient of the fields studied decreases, and the roll pressure and torque increase with an increase in the feed angle and elongation ratio. The initial rolling temperature does not significantly affect the deformation pattern, but it significantly affects the roll pressure and torque. At the same time, the experimental alloy demonstrated the greater tendency to localize deforming forces in the near-contact zone and to increase the gradient of stress-strain state parameters over the billet section. The study of the tightening shape and depth of rolled billet ends showed that the Ti–Zr–Nb alloy has a 3.5–9.6 % greater tightening depth. It is shown that experimental alloy rolling requires 1.6–2.4 times higher roll pressure and torque as compared to the commercial alloy.

Keywords: finite element modeling, radial shear rolling, superelastic alloy, rheological relationships, feed angle, elongation ratio, fields of stress-state stiffness coefficient, strain rate intensity, cumulative strain degree, tightening, roll force, roll torque.

Ta Dinh Xuan – Graduate student, Department of metal forming, National University of Science and Technology (NUST) «MISIS» (119991, Russia, Moscow, Leninskii pr., 4). E-mail: dinhxuanta@gmail.com.

Sheremetyev V.A. – Cand. Sci. (Eng.), Senior researcher, Department of metal forming, NUST «MISIS». E-mail: sheremetyev@misis.ru.

Komarov V.S. – Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Laboratory of plastic deformation of metallic materials, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, RAS (119991, Russia, Moscow, Leninskii pr., 49). E-mail: komarov@misis.ru.

Kudryashova A.A. – Graduate student, Engineer, Scientific and educational center of nanomaterials and nanotechnology, NUST «MISIS». E-mail: kudryashova@misis.ru.

Galkin S.P. – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of metal forming, NUST «MISIS». E-mail: glk-omd@yandex.ru.

Andreev V.A. – Cand. Sci. (Eng.), General director, MATEK-SMA Ltd. (117449, Russia, Moscow, Karier, 2a, bld. 1-137); Senior researcher, Laboratory of plastic deformation of metallic materials, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, RAS. E-mail: andreev.icmateks@gmail.com.

Prokoshkin S.D. – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Department of metal forming, NUST «MISIS». E-mail: prokoshkin@tmo.misis.ru.

Brailovski V. – Cand. Sci. (Eng.), Prof., Ecole de Technologie Superieure (Canada, Montreal 1100, Notre Dame). E-mail: vladimir.brailovski@etsmtl.ca.

For citation: Ta Dinh Xuan, Sheremetyev V.A., Komarov V.S., Kudryashova A.A., Galkin S.P., Andreev V.A., Prokoshkin S.D., Brailovski V. Comparative study of superelastic Ti–Zr–Nb and commercial VT6 alloy billets by Qform simulation. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2020. No. 6. P. 32–43 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-6-32-43.

Введение

Активное развитие металловедения для медицины приводит к созданию новых материалов, которые требуют разработки технологий их обработки для получения качественных полуфабрикатов, позволяющих изготавливать изделия с повышенным комплексом функциональных свойств. К таким материалам нового поколения, исследованиям которых уделяется особое внимание в последнее десятилетие, относятся сплавы с памятью

формы (СПФ) на основе системы Ti–Zr–Nb [1–3]. Благодаря сочетанию высокой биомеханической совместимости, которая обеспечена низко модульным и сверхупругим механическим поведением, с общей биохимической совместимостью основных компонентов эти СПФ являются наиболее перспективными материалами для изготовления костных имплантатов, функционирующих под нагрузкой [1, 4].

С помощью методов термомеханической обработки (ТМО) можно прецизионно управлять структурно-фазовым состоянием этих сплавов, достигая повышения общего комплекса статических и циклических функциональных свойств [4–6]. В частности, было показано [7], что СПФ состава Ti–Zr–Nb со смешанной динамически полигонизованной и динамически рекристаллизованной структурой β -фазы, сформированной при высокотемпературной ТМО, демонстрирует повышенную в 1,5 раза и более функциональную усталостную долговечность по сравнению со структурой, полученной в результате статических процессов в ходе низкотемпературной ТМО.

Таким образом, разработка технологий получения полуфабрикатов, пригодных для изготовления костных имплантатов, из этих сплавов методами горячей деформации является актуальной задачей. Подбор схем и режимов такой технологии наиболее эффективно можно осуществить с помощью сочетания физического и математического моделирования процессов ТМО. Физическое моделирование позволяет получать реологические модели поведения нового материала в различных температурно-скоростных условиях, а математическое моделирование весьма эффективно использует эти модели для изучения особенностей пластической деформации с применением конкретного метода обработки металла давлением [8, 9].

Процессы винтовой прокатки имеют широкий спектр технологических применений благодаря возможности эффективного и доступного управления деформационным воздействием на прокатываемый металл от его разрыхления до интенсивного уплотнения [10, 11]. Наибольшее промышленное развитие получил процесс винтовой прошивки, где используется его разрыхляющая способность. Он лежит в основе большинства традиционных [10] и современных технологий [12] производства бесшовных стальных труб и полых изделий специального назначения [13].

Радиально-сдвиговая прокатка (РСП) относится к числу относительно новых версий винтовой прокатки и является ее частным случаем для деформации сплошных заготовок с интенсивным уплотнением и высоким уровнем сдвиговых деформаций. Метод РСП позволяет деформировать длинномерные объемы, достигая значений накопленной степени деформации 8–12 и более [14]. При этом интенсивно измельчается структура ме-

талла и повышаются его свойства, в ряде случаев до рекордных уровней [15, 16]. На сегодня это один из наиболее перспективных и доступных способов интенсивной пластической деформации для широкого индустриального производства структурированных прутков из сплавов титана [17], магния [18] и алюминия [19, 20]. Имеется положительный опыт прокатки сплавов системы Ti–Zr–Nb для медицинского применения [7, 21].

Способ РСП эффективен в решении нестандартных производственных задач, таких как создание бережливого производства круглого сортового проката из высоколегированных сплавов малыми и сверхмалыми партиями [16], утилизация и повторное использование отработанных деталей машиностроения [22] и др. Траекторное управление процессом РСП позволяет получать естественно-слоистое, псевдокомпозиционное строение материала [15, 23].

Процесс РСП отличается весьма сложным течением металла в очаге деформации по геликоидальным траекториям, пульсирующим, переходящим в знакопеременное изменение параметров напряженно-деформированного состояния, своеобразным характером взаимодействия валков с заготовкой, в котором сочетаются элементы непрерывности и дискретности, а также рядом других особенностей, крайне сложных для теоретического и экспериментального исследования.

Конечно-элементное моделирование процессов винтовой и радиально-сдвиговой прокатки [24–27] расширяет представления об их особенностях. Достижения в разработке и постоянном совершенствовании программ конечно-элементного моделирования [28, 29] позволяют существенно продвинуться в раскрытии и понимании нетривиальных закономерностей РСП.

К числу таких практически не исследованных закономерностей относится вопрос о влиянии реологических свойств деформируемого металла на его формоизменение и параметры напряженно-деформированного состояния в ходе процесса РСП. Этот вопрос наиболее актуален при выборе, разработке и обосновании технологий деформационно-термической обработки перспективных материалов типа сверхупругого сплава нового поколения Ti–Zr–Nb. При этом продуктивен подход, предполагающий изучение прокатки нового сплава в сопоставлении с деформацией близкого по каким-либо параметрам серийного материала.

Целью настоящей работы являлось сравнительное исследование горячей радиально-сдвиговой прокатки заготовок из сверхупругого сплава системы Ti—Zr—Nb и серийного сплава ВТ6 методом QForm-моделирования.

Методика исследования

Сравнительное исследование проводили путем конечно-элементного моделирования РСП двух сплавов при различных технологических режимах с использованием программного комплекса QForm V9. Процесс моделировали при различных углах подачи валков (β), коэффициентах вытяжки (μ) и начальных температурах прокатки. Угол подачи варьировали на 4 уровнях: $\beta = 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ и 25° . Коэффициент вытяжки за проход устанавливали также на 4 уровнях: $\mu = 1,31, 1,78, 2,56$ и $4,00$, что соответствует прокатке исходной заготовки диаметром 80 мм до прутка диаметром 70, 60, 50 и 40 мм (рис. 1). Температуру заготовки перед РСП варьировали на 3 уровнях: $t_0 = 930, 1000$ и 1070°C . Всего для каждого сплава исследовалось 48 режимов прокатки.

Значения параметров процесса и модели, не изменяемые в условиях настоящей работы, приняты следующими:

- диаметр валков (в сечении наибольшего обжатия) — 290 мм;
- угол раскатки валков — 10 град;
- скорость вращения рабочих валков — 60 об/мин;
- температура инструмента — 70°C ;
- фактор трения между заготовкой и валками (по Зибелю) — 1,0.

В программе QForm используются реологические зависимости сопротивления деформации (σ) материала прокатываемой заготовки от степени (ϵ) и скорости ($\dot{\epsilon}$) деформации, а также ее начальной температуры перед РСП (t_0). Кривые течения сплава ВТ6 взяты из встроенной библиотеки деформируемых материалов.

Для определения реологических свойств сверхупругого сплава Ti—Zr—Nb состава, мас. %:

Ti	Основа	C	$\leq 0,01$
Zr	28	H	$\leq 0,003$
Nb	20,7	N	$\leq 0,01$
O	$\leq 0,09$		

был поставлен и проведен специальный эксперимент. Образцы диаметром 5 мм и высотой 10 мм подвергались осадке на испытательном комплексе горячей деформации WUMSI. Испытания про-

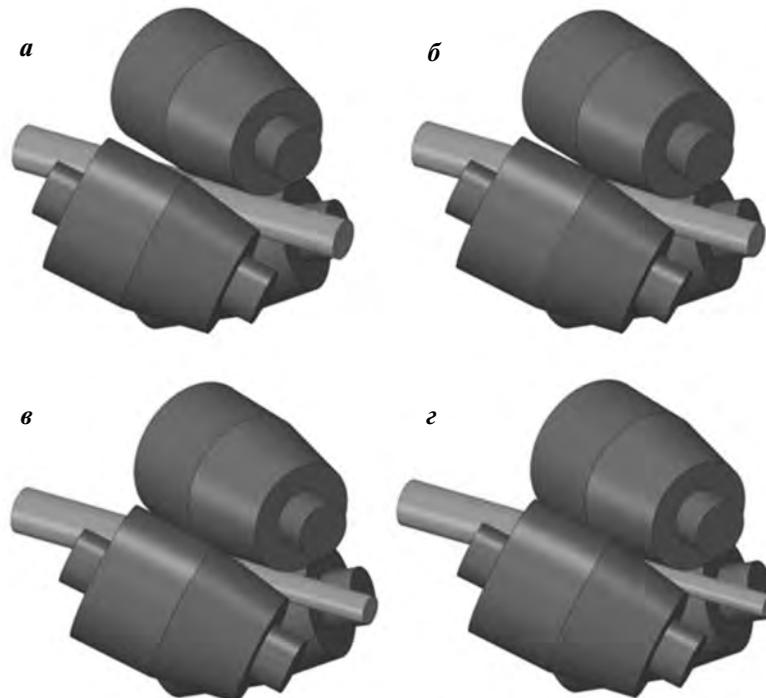


Рис. 1. Схемы РСП с разными коэффициентами вытяжки: $\mu = 1,31$ (а), 1,781 (б), 2,56 (в) и 4,00 (г)

Fig. 1. Diagrams of radial shear rolling (RSR) with different elongation ratios: $\mu = 1.31$ (a), 1.781 (б), 2.56 (в) and 4.00 (г)

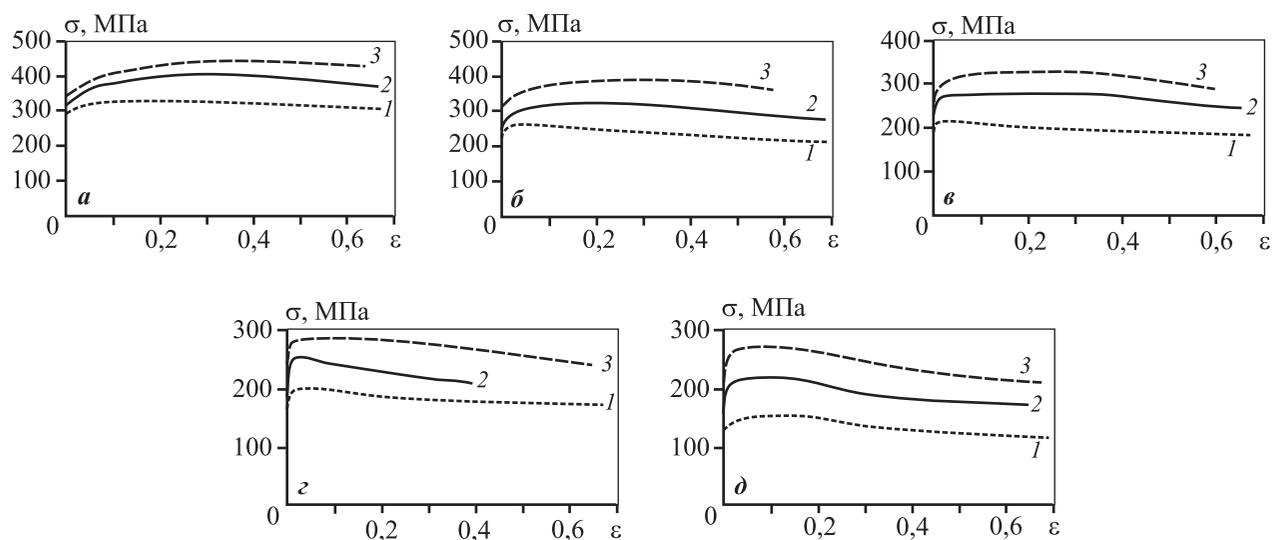


Рис. 2. Экспериментальные зависимости (кривые течения) сопротивления деформации сверхупругого сплава Ti–Zr–Nb от температуры, степени и скорости деформации

a – $t_0 = 600$ °C, *б* – 700 °C, *в* – 800 °C, *г* – 900 °C и *д* – 1000 °C

1 – $\dot{\varepsilon} = 0,1$ с⁻¹, *2* – 1,0 с⁻¹ и *3* – 10 с⁻¹

Fig. 2. Experimental dependences (flow curves) of superelastic Ti–Zr–Nb alloy strain resistance on temperature, strain ratio and strain rate

a – $t_0 = 600$ °C, *б* – 700 °C, *в* – 800 °C, *г* – 900 °C and *д* – 1000 °C

1 – $\dot{\varepsilon} = 0,1$ с⁻¹, *2* – 1,0 с⁻¹ and *3* – 10 с⁻¹

водились при температурах $t_0 = 600, 700, 800, 900$ и 1000 °C со скоростью деформации $\dot{\varepsilon} = 10, 1,0$ и 0,1 с⁻¹. Построенные реологические зависимости представлены на рис. 2. Полученные данные в табличном виде экспортировали в QForm в качестве термомеханических соотношений связи $\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, t_0)$.

Как видно на рис. 2, кривые течения имеют выраженный максимум в начальной стадии деформирования при температурах 900–1000 °C. Такое деформационное поведение титановых сплавов обычно связывают с развитием разупрочнения вследствие динамической рекристаллизации. Снижение скорости деформации смещает максимум в сторону более высоких степеней деформации. В области более низких температур 600–800 °C максимум практически отсутствует. Такое поведение, характерное для сплавов с объемно-центрированной кубической кристаллической решеткой, объясняется протеканием процессов динамического возврата и полигонизации в процессе деформации. Реологические свойства сплава ВТ6 выбраны из встроенной библиотеки деформируемых материалов QForm. На кривых течения сплава ВТ6 максимум отсутствует.

Результаты и их обсуждение

Исследуемые режимы РСП двух сплавов (всего 2×48 вариантов) оценивали по полям параметров напряженно-деформированного состояния в поперечном сечении технологического пережима. Сравнивали поля коэффициента жесткости напряженного состояния, интенсивности скоростей деформации и накопленной деформации. Кроме того, изучали искривление торцевых частей проката (торцевую утяжку).

Коэффициент жесткости напряженного состояния

Коэффициент жесткости напряженного состояния представляет собой отношение среднего нормального напряжения к интенсивности напряжений в рассматриваемой точке деформируемого тела (σ_n/σ). Характерный вид его распределения, а также его зависимость от угла подачи и коэффициента вытяжки для двух сплавов представлены на рис. 3.

Приконтактная зона деформируемой заготовки для обоих сплавов находится под действием отрицательного среднего напряжения сжатия, пре-

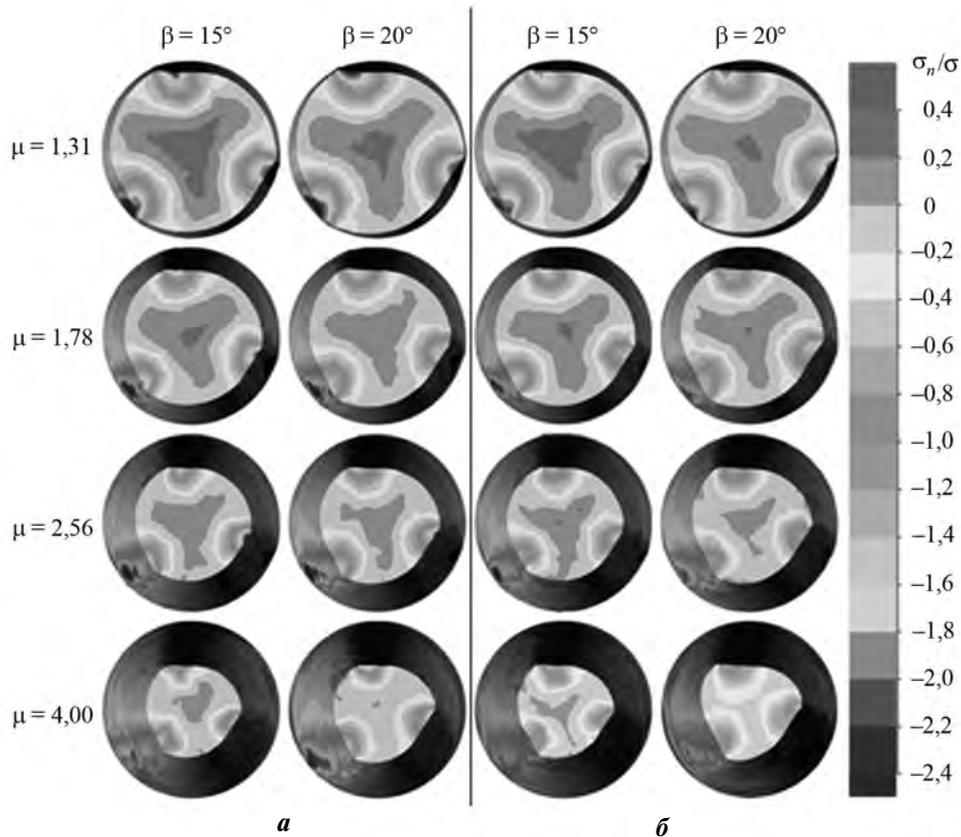


Рис. 3. Поля коэффициента жесткости напряженного состояния при РСП сплавов Ti–Zr–Nb (*a*) и VT6 (*б*) в зависимости от угла подачи и коэффициента вытяжки при $t_0 = 930$ °C

Fig. 3. Stiffness coefficient fields of Ti–Zr–Nb (*a*) and VT6 (*б*) alloys stress state during RSR depending on feed angle and elongation ratio at $t_0 = 930$ °C

вышающего в 1,6–1,8 раза интенсивность напряжений. В центральной части заготовки среднее напряжение положительно и имеет существенно более низкий уровень абсолютных значений. С увеличением угла подачи и коэффициента вытяжки за проход область с положительным (растягивающим) средним напряжением сокращается, что способствует улучшению деформируемости заготовок. Поля на рис. 3 показывают, что экспериментальный сплав проявляет большую склонность к локализации сжимающих напряжений от валков в приконтактной зоне, ограничивая их распространение в центр. Одна из причин этого явления — наличие экстремума в реологических кривых течения сплава Ti–Zr–Nb.

Начальная температура прокатки не оказывает существенного влияния на рассматриваемые поля.

Интенсивность скорости деформации

Присущие РСП картины распределения интенсивности скорости деформации в зависимости от

угла подачи и коэффициента вытяжки для исследуемых сплавов представлены на рис. 4.

Сравнение полей скорости деформации обоих сплавов показало, что основная отличительная особенность образца Ti–Zr–Nb относительно VT6 состоит в большей склонности к локализации деформации в периферийных слоях. Это различие усиливается с ростом коэффициента вытяжки и особенно отчетливо наблюдается в режимах с $\mu = 2,56$ и $4,00$.

Накопленная степень деформации

Распределение накопленной степени деформации по поперечному сечению соответствует картине интенсивности скоростей деформации и носит выраженный градиентный характер (рис. 5), который свойствен процессу РСП. Максимальное значение ϵ достигает 8–12 ед. и наблюдается в периферийных слоях заготовки, а центральные ее слои деформируются при минимальных ϵ , которые не превышают 2,4–3,8. Повышение накопленной

степени деформации от центра к периферии происходит в зависимости, близкой к экспоненциальной.

Увеличение угла подачи повышает равномерность деформации (см. рис. 5), снижая максималь-

ное значение ϵ во внешних слоях и повышая его в центральных.

Сплав Ti–Zr–Nb за счет более высокой склонности к локализации деформации в приконтакт-

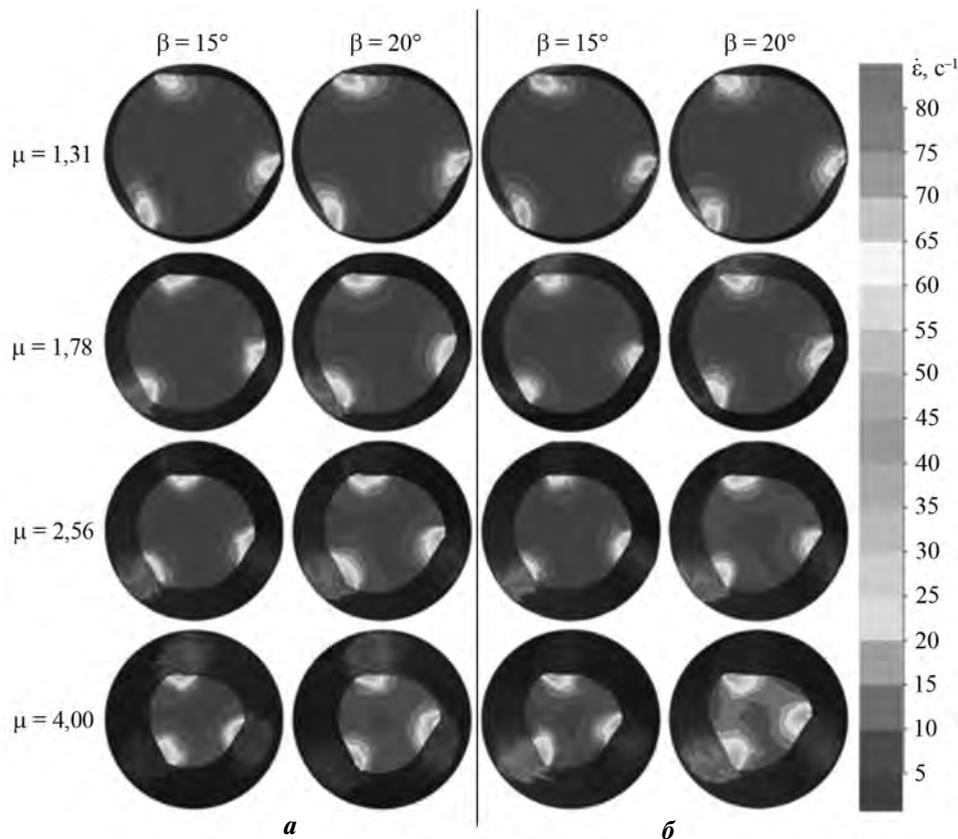


Рис. 4. Поля интенсивности скорости деформации при РСП сплавов Ti–Zr–Nb (*a*) и VT6 (*б*) в зависимости от угла подачи и коэффициента вытяжки при $t_0 = 930\text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 4. Strain rate intensity fields of Ti–Zr–Nb (*a*) and VT6 (*b*) alloys during RSR depending on feed angle and elongation ratio at $t_0 = 930\text{ }^\circ\text{C}$

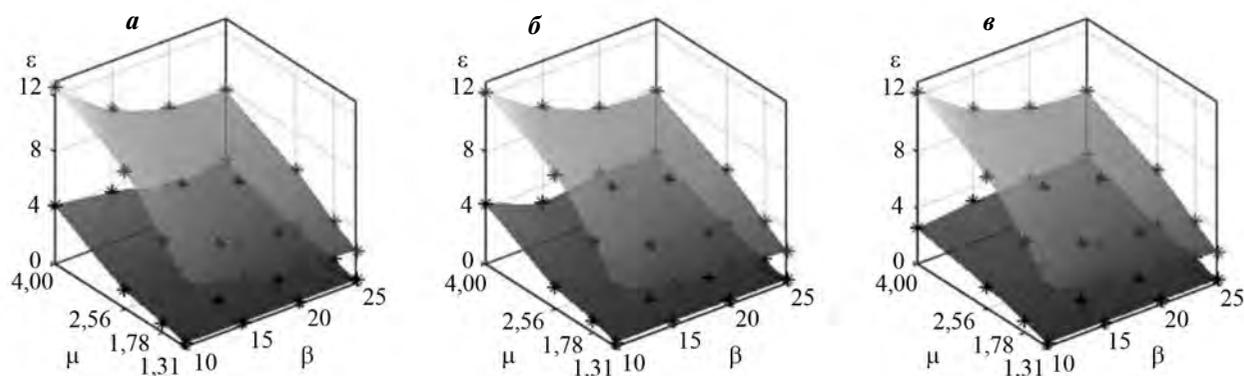


Рис. 5. Поверхности максимальных (верхняя) и минимальных (нижняя) значений накопленной деформации при РСП сплава Ti–Zr–Nb

a – $t_0 = 930\text{ }^\circ\text{C}$, *б* – $1000\text{ }^\circ\text{C}$ и *в* – $1070\text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 5. Surfaces of maximum (upper) and minimum (lower) cumulative strain values of Ti–Zr–Nb alloy during RSR

a – $t_0 = 930\text{ }^\circ\text{C}$, *б* – $1000\text{ }^\circ\text{C}$ and *в* – $1070\text{ }^\circ\text{C}$

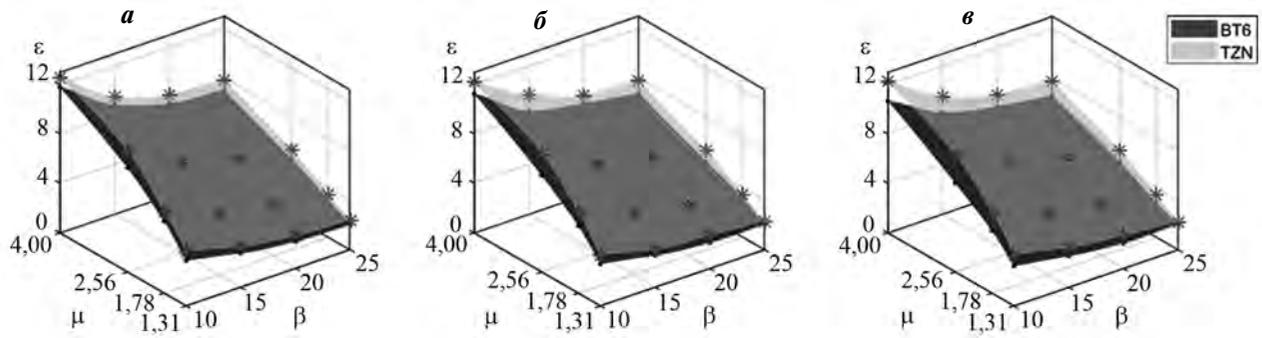


Рис. 6. Поверхности максимальных значений накопленной деформации в периферийной зоне заготовки при РСП сплава Ti–Zr–Nb (верхняя) и сплава ВТ6 (нижняя)

a – $t_0 = 930$ °C, *б* – 1000 °C и *в* – 1070 °C

Fig. 6. Surfaces of maximum cumulative strain values in the Ti–Zr–Nb alloy (upper) and VT6 alloy (lower) billet peripheral zone during RSR

a – $t_0 = 930$ °C, *б* – 1000 °C and *в* – 1070 °C

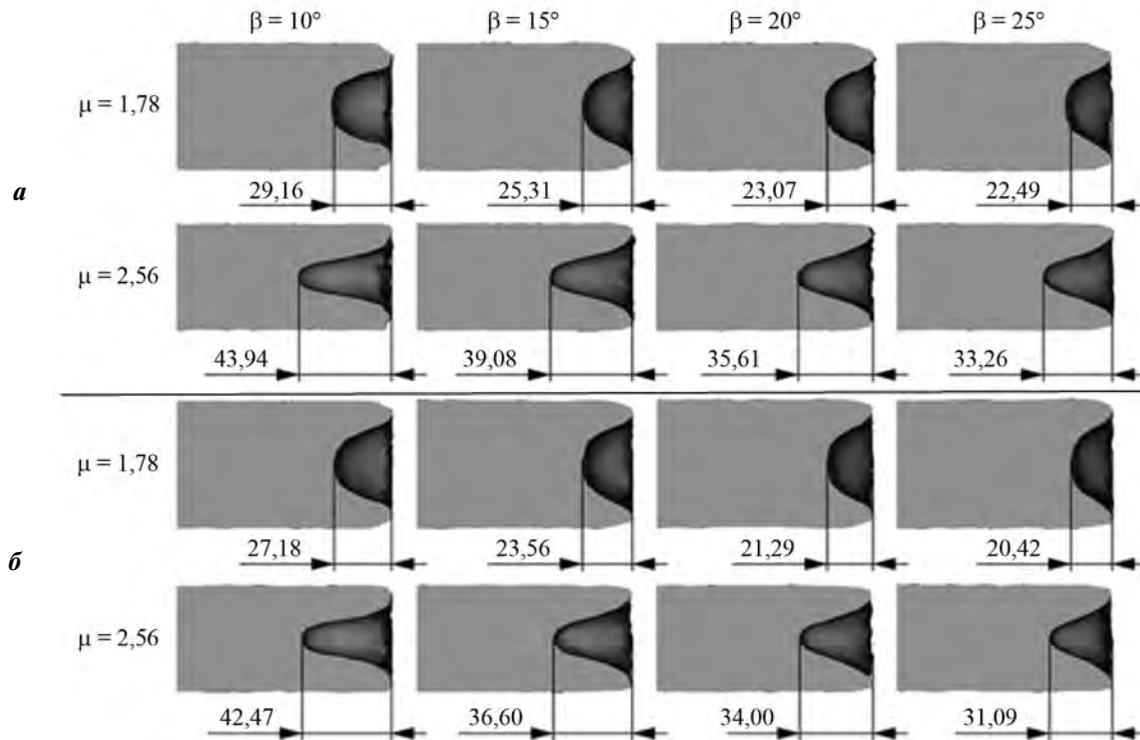


Рис. 7. Торцевые утяжки при прокатке заготовок из сплава Ti–Zr–Nb (*a*) и ВТ6 (*б*) в зависимости от угла подачи и коэффициента вытяжки при $t_0 = 930$ °C

Fig. 7. End tightening when rolling billets of Ti–Zr–Nb (*a*) and VT6 (*б*) alloys depending on feed angle and elongation ratio at $t_0 = 930$ °C

ной области имеет большую степень накопленной деформации (рис. 6).

Утяжки концевых участков

Внешним проявлением и косвенным свидетелем неравномерности распределения параме-

тров напряженно-деформированного состояния металла могут служить величина и форма депланации торцевых поверхностей заготовки (утяжки). На рис. 7 показаны продольные разрезы концевых участков заготовок после прокатки при различных углах подачи и коэффициентах

вытяжки. Видно, что глубина утяжки уменьшается с увеличением угла подачи, что является свидетельством повышения равномерности распределения параметров напряженно-деформированного состояния по сечению заготовки. Повышенная склонность опытного сплава к локализации пластической деформации закономерно проявляется в образовании более глубокой утяжки по сравнению со сплавом ВТ6 при всех исследованных режимах прокатки. Увеличение глубины утяжки составляет 3,5–9,6 % в зависимости от режима.

Усилие и момент прокатки

Усилие металла на валок и момент прокатки (т.е. момент, необходимый для его вращения в ходе процесса) возрастают с уменьшением температуры практически пропорционально увеличению сопротивления деформации. Наиболее нагруженные режимы зафиксированы при начальной температуре 930 °С. Из данных рис. 8 видно, что момент прокатки в большей степени зависит от угла подачи, чем усилие прокатки. Это связано с тем, что угол подачи увеличивает ширину контактной поверхности металла с валками (см. рис. 3 и 4). В свою очередь, усилие прокатки практически прямо пропорционально ширине контакта, а момент прокатки пропорционален ей во второй степени.

Согласно данным рис. 8 уровень силовых параметров, требуемый для прокатки сплава Ti–Zr–Nb, превышает соответствующие значения для сплава ВТ6. Это обстоятельство необходимо учитывать в процессе практической реализации технологии.

Заключение

Сравнительное QForm-моделирование 48 вариантов горячей радиально-сдвиговой прокатки опытного сплава Ti–Zr–Nb и серийного ВТ6 позволило выявить отличительные особенности в прокатке сверхупругого материала. Его моделирование выполнялось с привлечением реологических кривых, полученных в результате специально поставленного эксперимента. Осадка образцов Ti–Zr–Nb на испытательном комплексе горячей деформации WUMSI показала, что кривые течения имеют выраженный максимум в начальной стадии деформирования при температурах 900–1000 °С.

Такая особенность реологии экспериментального сплава проявляется в его большей склонности к локализации деформирующего воздействия валков вблизи контактной поверхности и увеличению неравномерности деформации по сечению заготовки. Также уменьшается развитие области интенсивности скорости деформации с высокими

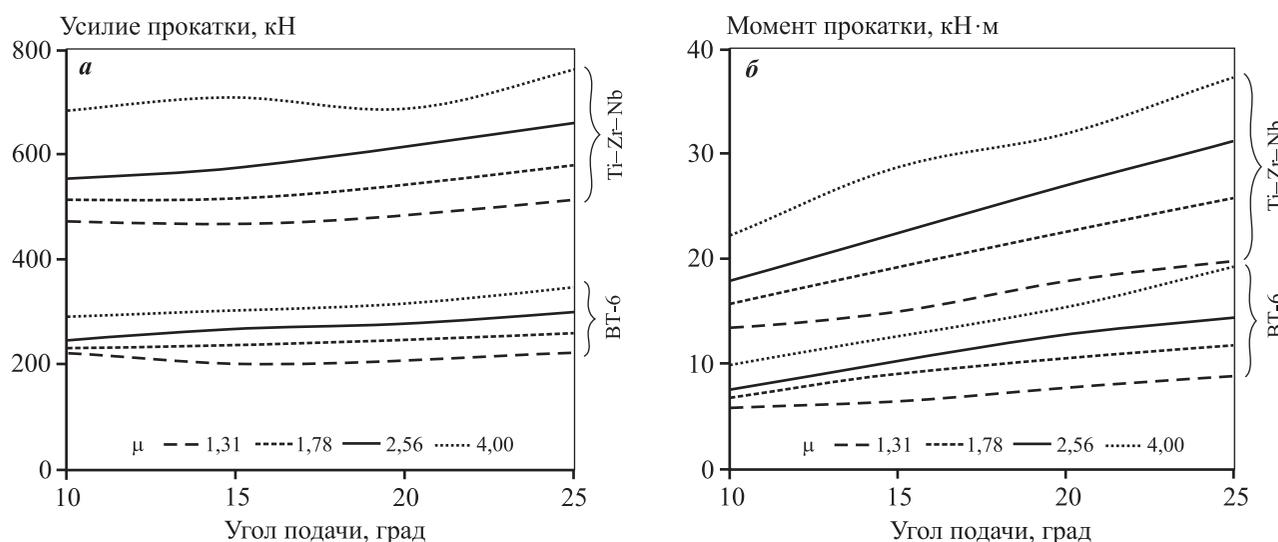


Рис. 8. Зависимости усилия металла на валок (**a**) и момента прокатки (**б**) от угла подачи и коэффициента вытяжки при $t_0 = 930$ °С

Fig. 8. Dependence of metal roll pressure (**a**) and roll torque (**б**) on feed angle and elongation ratio at $t_0 = 930$ °С

значениями и области отрицательных значений средних сжимающих напряжений (коэффициента жесткости напряженного состояния). Как следствие, на 3,5—9,6 % увеличивается глубина утяжки, образующаяся на концах проката. Для прокатки опытного сплава требуются усилия и момент прокатки в 1,6—2,4 раза больше, чем для серийного сплава ВТ6.

Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда
(проект № 20-63-47063).

Funding: The study was carried out under financial support
of the Russian Science Foundation
(Project № 20-63-47063).

Литература/References

1. Fu J., Yamamoto A., Kim H.Y., Hosoda H., Miyazaki S. Novel Ti-base superelastic alloys with large recovery strain and excellent biocompatibility. *Acta Biomater.* 2015. Vol. 17. P. 56—67.
2. Wang B.L., Li L., Zheng Y.F. In vitro cytotoxicity and hemocompatibility studies of Ti—Nb, Ti—Nb—Zr and Ti—Nb—Hf biomedical shape memory alloys. *Biomed. Mater.* 2010. Vol. 5. P. 044102.
3. Солдатенко А.С., Карачевцева М.А., Шереметьев В.А., Кудряшова А.А., Архипова А.Ю., Андреев В.А., Прокошкин С.Д., Браиловский В., Мойсенович М.М., Шайтан К.В. Особенности взаимодействия *in vitro* остеобластоподобных клеток MG63 с поверхностью сплавов системы Ti—Zr—Nb, обладающих памятью формы. *Вестник Московского ун-та. Сер. 16. Биология.* 2019. Т. 74. No. 4. С. 313—320.
Soldatenko A.S., Karachevtseva M.A., Sheremetyev V.A., Kudryashova A.A., Arkhipova A.Yu., Andreev V.A., Prokoshkin S.D., Brailovski V., Moisenovich M.M., Shaitan K.V. Features of in vitro interaction of osteoblast-like MG63 cells with the surface of Ti—Zr—Nb shape memory alloys. *Moscow University Biological Sciences Bulletin.* 2019. Vol. 74. Iss. 4. P. 250—255.
4. Sheremetyev V., Brailovski V., Prokoshkin S., Inaekyan K., Dubinskiy S. Functional fatigue behavior of superelastic beta Ti—22Nb—6Zr (at.%) alloy for load-bearing biomedical applications. *Mater. Sci. Eng. C.* 2016. Vol. 58. P. 935—944.
5. Prokoshkin S., Brailovski V., Dubinskiy S., Zhukova Y., Sheremetyev V., Konopatsky A., Inaekyan K. Manufacturing, structure control and functional testing of Ti—Nb-based SMA for medical application. *Shape Memory and Superelasticity.* 2016. Vol. 2. Iss. 2. P. 130—144.
6. Kudryashova A., Sheremetyev V., Lukashevich K., Cheverikin V., Inaekyan K., Galkin S., Prokoshkin S., Brailovski V. Effect of a combined thermomechanical treatment on the microstructure, texture and superelastic properties of Ti—18Zr—14Nb alloy for orthopedic implants. *J. Alloys Compd.* 2020. Vol. 843. Art. 156066. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.156066.
7. Sheremetyev V., Kudryashova A., Cheverikin V., Korotitskiy A., Galkin S., Prokoshkin S., Brailovski V. Hot radial shear rolling and rotary forging of metastable beta Ti—18Zr—14Nb (at.%) alloy for bone implants: Microstructure, texture and functional properties. *J. Alloys Compd.* 2019. Vol. 800. P. 320—326.
8. Hadasik E., Kuziak R., Kawalla R., Adamczyk M., Pietrzyk M. Rheological model for simulation of hot rolling of new generation steel strips for automotive applications. *Steel Res. Inter.* 2006. Vol. 77. P. 927—933.
9. Суан Та Динь, Шереметьев В.А., Кудряшова А.А., Галкин С.П., Андреев В.А., Прокошкин С.Д., Браиловский В. Влияние комбинации радиально-сдвиговой прокатки и ротационнойковки на напряженно-деформированное состояние прутковой заготовки малого диаметра из титановых сплавов. *Известия вузов. Цветная металлургия.* 2020. No. 2. С. 22—31.
Dinh X.T., Sheremetyev V.A., Kudryashova A.A., Galkin S.P., Andreev V.A., Prokoshkin S.D., Brailovski V. Influence of the combined radial shear rolling and rotary forging on the deformation mode of the small-diameter rod billet made of titanium alloys. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2020. Vol. 61. Iss. 3. P. 271—279.
10. Потанов И.Н., Полухин П.И. Технология винтовой прокатки. М.: Металлургия, 1990.
Potapov I.N., Polukhin P.I. Helical Rolling Technology. Moscow: Metallurgiya, 1990 (In Russ.).
11. Целиков А.И., Барбарич М.В., Васильчиков М.В., Грановский С.П., Жукевич-Стоша Е.А. Специальные прокатные станы. М.: Металлургия, 1971.
Tselikov A.I., Barbarich M.V., Vasilchikov M.V., Granovskiy S.P., Zhukevich-Stosha E.A. Special rolling mills. Moscow: Metallurgiya, 1971 (In Russ.).
12. Romantsev B., Goncharuk A., Aleshchenko A., Gamin Y., Mintakhanov M. Development of multipass skew rolling technology for stainless steel and alloy pipes' production. *IJAMT.* 2018. Vol. 97. Iss. 9-12. P. 3223—3230.
13. Шаталов П.Л., Медведев В.А., Загоскин Е.Е. Определенные механических свойств стальных тонкостенных

- сосудов по твердости после горячей винтовой прокатки с последующей штамповкой и закалкой. *Черные металлы*. 2019. No. 7. С. 36—40.
- Shatalov R.L., Medvedev V.A., Zagoskin E.E.* Determination of mechanical properties of steel thinwalled vessels by hardness after hot screw rolling with subsequent stamping and quenching. *Chernye Metally*. 2019. Vol. 7. P. 36—40 (In Russ.).
14. *Галкин С.П.* Теория и технология стационарной винтовой прокатки заготовок и прутков из малопластичных сталей и сплавов: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. М.: МИСиС, 1998.
Galkin S.P. Theory and technology of stationary screw rolling of low-ductility steel and alloy billets and bars: Abstract of a thesis of the dissertation of Dr. Sci. (Eng.). Moscow: MISIS, 1998 (In Russ.).
 15. *Галкин С.П.* Траектории движения деформируемого металла как основа управления процессами радиально-сдвиговой и винтовой прокатки. *Сталь*. 2004. No. 7. С. 70—72.
Galkin S.P. Trajectory of deformed metal as basis for controlling the radial-shift and screw rolling. *Stal'*. 2004. No. 7. P. 63—66.
 16. *Галкин С.П., Романцев Б.А., Харитонов Е.А.* Реализация инновационного потенциала универсального способа радиально-сдвиговой прокатки. *Черные металлы*. 2015. No. 1 (997). С. 23—28.
Galkin S.P., Romantsev B.A., Kharitonov E.A. Putting into practice innovative potential in the universal radial-shear rolling process. *CIS Iron Steel Rev.* 2014. Vol. 2014. Iss. 9. P. 35—39.
 17. *Карпов Б.В., Патрин П.В., Галкин С.П., Харитонов Е.А., Карпов И.Б.* Радиально-сдвиговая прокатка прутков титанового сплава VT-8 с регламентированной структурой из слитков малого диаметра (не более 200 мм). *Металлург*. 2017. No. 10. С. 54—59.
Karpov B.V., Patrin P.V., Galkin S.P., Kharitonov E.A., Karpov I.B. Radial-shear rolling of titanium alloy VT-8 bars with controlled structure for small diameter ingots (≤ 200 mm). *Metallurgist*. 2018. Vol. 61. Iss. 9-10. P. 884—890.
 18. *Dobatkin S., Galkin S., Estrin Y., Serebryany V., Diez M., Martynenko N., Lukyanova E., Perezhogin V.* Grain refinement, texture, and mechanical properties of a magnesium alloy after radial-shear rolling. *J. Alloys Compd.* 2019. Vol. 774. P. 969—979.
 19. *Akopyan T., Aleshchenko A.S., Belov N.A., Galkin S.P.* Effect of radial-shear rolling on the formation of structure and mechanical properties of Al—Ni and Al—Ca aluminum-matrix composite alloys of eutectic type. *Phys. Met. Metallograph.* 2018. Vol. 119. Iss. 3. P. 241—250.
 20. *Akopyan T.K., Belov N.A., Aleshchenko A.S., Galkin S.P., Gamin Y.V., Gorshenkov M.V., Cheverikin V.V., Shurkin P.K.* Formation of the gradient microstructure of a new Al alloy based on the Al—Zn—Mg—Fe—Ni system processed by radial-shear rolling. *Mater. Sci. Eng.* 2019. Vol. 746. P. 134—144.
 21. *Шереметьев В.А., Кудряшова А.А., Суан Та Динь, Галкин С.П., Прокошкин С.Д., Браиловский В.* Перспективная технология получения прутков из сверхупругого сплава Ti—Zr—Nb медицинского назначения на основе сочетания радиально-сдвиговой прокатки и ротационнойковки. *Металлург*. 2019. No. 1. С. 45—52.
Sheremet'ev V.A., Kudryashova A.A., Dinh X.T., Galkin S.P., Prokoshkin S.D., Brailovskii V. Advanced technology for preparing bar from medical grade Ti—Zr—Nb superelastic alloy based on combination of radial-shear rolling and rotary forging. *Metallurgist*. 2019. Vol. 63. Iss. 1-2. P. 51—61.
 22. *Галкин С.П., Романцев Б.А., Та Динь Суан, Гамин Ю.В.* Ресурсосберегающая технология производства круглого сортового проката из бывших в употреблении осей подвижного железнодорожного состава. *Черные металлы*. 2018. No. 4. С. 21—27.
Galkin S.P., Romantsev B.A., Ta D.X., Gamin Yu.V. Resource-saving technology for production of round bars from used shaft of rolling railroad stock. *Chernye Metally*. 2018. Vol. 4. P. 21—27 (In Russ.).
 23. *Шереметьев В.А., Кудряшова А.А., Галкин С.П., Прокошкин С.Д., Браиловский В.И.* Способ получения прутков из сверхупругих сплавов системы титан—цирконий—ниобий: Пат. 2692003 (РФ). 2019.
Sheremetev V.A., Kudryashova A.A., Galkin S.P., Prokoshkin S.D., Brailovskij V.I. Method of producing rods from superplastic alloys of titanium-zirconium-niobium system: Pat. 2692003 (RF). 2019 (In Russ.).
 24. *Скрипаленко М.М., Романцев Б.А., Галкин С.П., Скрипаленко М.Н., Капуткина Л.М., Чан Ба Хюи.* Прогнозирование разрушения металла при винтовой прокатке в двухвалковом стане. *Металлург*. 2017. No. 11. С. 11—18.
Skripalenko M.M., Romantsev B.A., Galkin S.P., Skripalenko M.N., Kaputkina L.M., Hуу T.B. Prediction of the fracture of metal in the process of screw rolling in

- a two-roll mill. *Metallurgist*. 2018. Vol. 61. Iss. 11—12. P. 925—933.
25. Naizabekov A., Lezhnev S., Arbutz A., Panin E. Computer simulation of the combined process «helical rolling—pressing». *Key Eng. Mater.* 2016. Vol. 716. P. 614—619.
26. Akopyan T.K., Gamin Y.V., Galkin S.P., Prosviryakov A.S., Aleshchenko A.S., Noshin M.A., Koshmin A.N., Fomin A.V. Radial-shear rolling of high-strength aluminum alloys: Finite element simulation and analysis of microstructure and mechanical properties. *Mater. Sci. Eng.* 2020. Vol. 786. P. 139424.
27. Скрипаленко М.М., Галкин С.П., Хе Чже Сун, Романцев Б.А., Чан Ба Хюи, Скрипаленко М.Н., Капуткина Л.М., Сидоров А.А. Прогнозирование вероятного разрушения при радиально-сдвиговой прокатке непрерывнолитых медных заготовок на основе компьютерного моделирования. *Металлург*. 2018. No. 9. С. 7—12.
- Skripalenko M.M., Galkin S.P., Sung H.J., Romantsev B.A., Huy T.B., Skripalenko M.N., Kaputkina L.M., Sidorow A.A.* Prediction of potential fracturing during radial-shear rolling of continuously cast copper billets by means of computer simulation. *Metallurgist*. 2019. Vol. 62. Iss. 9-10. P. 849—856.
28. QuantorForm2019. URL: <https://qform3d.com> (accessed: 01.08.2020).
29. Власов А.В., Стебунов С.А., Евсюков С.А., Биба Н.В., Шитиков А.А. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки: Уч. пос. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Е. Баумана, 2019.
- Vlasov A.V., Stebunov S.A., Evsyukov S.A., Biba N.V., Shitikov A.A.* Finite-element modeling of technological processes of forging and forging: a tutorial. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2019 (In Russ.).