

ВЛИЯНИЕ КОМБИНАЦИИ РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКИ И РОТАЦИОННОЙ КОВКИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРУТКОВОЙ ЗАГОТОВКИ МАЛОГО ДИАМЕТРА ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

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

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

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

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

Ecole de Technologie Superieure, Montreal, Canada

Статья поступила в редакцию 30.10.19 г., доработана 31.11.19 г., подписана в печать 16.12.19 г.

Работа посвящена конечно-элементному моделированию напряженно-деформированного состояния прутковой заготовки малого диаметра при горячей обработке давлением в комбинации радиально-сдвиговой прокатки (РСП) и ротационной ковки (РК). Моделирование выполнено с использованием реологической модели титанового сплава Ti–6Al–4V с помощью программы QForm VX. Смоделировано сочетание радиально-сдвиговой прокатки за 1 проход заготовки диаметром 15 мм на пруток диаметром 12 мм и последующей ротационной ковки в 1, 2 и 3 прохода с получением прутков диаметрами 11, 10 и 8 мм. Учитывалось пооперационное накопление пластической деформации в условиях неравномерности ее распределения. Получены промежуточные и конечные поля пластической деформации, скорости деформации и среднего напряжения. Показано, что распределение пластической деформации после РСП имеет выраженную градиентность с максимальным значением (3 и более) на периферии сечения и минимальным (около 1) в центре. В результате РК даже с небольшими обжатиями напряженно-деформированное состояние становится существенно более однородным по сравнению с заготовкой такого же диаметра только после радиально-сдвиговой прокатки. Кроме того, уменьшаются остаточные напряжения растяжения из-за сжимающих напряжений при ротационной ковке. Прямое экспериментальное опробование комбинированного способа деформации проведено для перспективного сплава Ti–Zr–Nb с памятью формы медицинского назначения при изготовлении прутков диаметром 7–8 мм в условиях опытно-промышленного производства. Получено качественное подтверждение результатов моделирования металлографическим анализом. Показана перспективность сочетания радиально-сдвиговой прокатки и ротационной ковки для создания промышленных технологий изготовления прутков малого диаметра с высокой однородностью мелкодисперсной структуры.

Ключевые слова: радиально-сдвиговая прокатка, ротационная ковка, конечно-элементное моделирование, Qform VX, титановый сплав, пластическая деформация, скорость деформации, напряжения, структура, однородность.

Та Динь Суан – аспирант кафедры обработки металлов давлением (ОМД) НИТУ «МИСиС» (119049, 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: sheremetev@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 (119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 49). 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. – Dr. Sci., Prof., Ecole de Technologie Superieure (Canada, Montreal 1100, Notrie Dame). E-mail: vladimir.brailovski@etsmtl.ca.

Для цитирования: Та Динь Суан, Шереметьев В.А., Кудряшова А.А., Галкин С.П., Андреев В.А., Прокошкин С.Д., Брайловский В. Влияние комбинации радиально-сдвиговой прокатки и ротационной ковки на напряженно-деформированное состояние прутковой заготовки малого диаметра из титановых сплавов. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2020. No. 2. С. 22–31. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-2-22-31.

Ta Dinh Xuan, 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 stress-strain state of the small diameter bar stock of titanium-based alloys

The paper focuses on the finite element method used to simulate the stress-strain state of a small-diameter bar stock during hot-forming in a combination of radial shear rolling (RSR) and rotary forging (RF). Simulation was carried out using the rheological model of the Ti–6Al–4V titanium-based alloy with the QForm VX software. A combination of radial shear rolling of a workpiece with a diameter of 15 mm to 12 mm bar in one pass and subsequent rotary forging in one, two and three passes to obtain bars with diameters 11, 10 and 8 mm is simulated. During the simulation, step-by-step accumulation of plastic deformation was taken into account in the conditions of its nonuniform distribution. The intermediate and finite fields of plastic deformation, strain rate and average stress are obtained. It is shown that plastic deformation distribution after RSR has an expressed gradient with a maximum value (3 or more) at the periphery of the cross-section and a minimum value (about 1) at the center. As a result of RF, even with small reductions, the stress-strain state becomes much more uniform compared with a workpiece of the same diameter after radial shear rolling only. In addition, residual tensile stresses due to compressive stresses during rotary forging are reduced. Direct experimental testing of the combined deformation method was carried out for a promising medical-grade Ti–Zr–Nb shape memory alloy when manufacturing 7–8 mm diameter rods in experimental production conditions. Qualitative confirmation of modeling results is obtained by metallographic analysis. It is shown that the combination of radial shear rolling and rotary forging is promising for creating industrial technologies for the manufacture of small-diameter rods with a highly uniform finely-dispersed structure.

Keywords: radial shear rolling, rotary forging, finite element method, Qform VX, titanium-based alloy, plastic deformation, strain rate, stress, structure, uniformity.

Ta Dinh Xuan – Graduate student, Department of metal forming, National University of Science and Technology (NUST) «MISIS» (119049, Russia, Moscow, Leninskii pr., 4). E-mail: dinhxuanta@gmail.com.

Sheremetyev V.A. – Cand. Sci. (Tech.), Senior researcher, Department of metal forming, NUST «MISIS». E-mail: sheremetyev@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. (Tech.), Prof., Department of metal forming, NUST «MISIS». E-mail: glk-omd@yandex.ru.

Andreev V.A. – Cand. Sci. (Tech.), 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 (119991, Russia, Moscow, Leninskii pr., 49). 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. – Dr. Sci., Prof., Ecole de Technologie Superieure (Canada, Montreal 1100, Notrie Dame). E-mail: vladimir.brailovski@etsmtl.ca.

Citation: *Ta Dinh Xuan, 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 stress-strain state of the small diameter bar stock of titanium-based alloys. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Universities' Proceedings. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2020. No. 2. P. 22–31 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-2-22-31.

Введение

Активное развитие металловедения для медицины требует создания новых материалов для имплантатов и технологий их обработки. Безникелевые сверхупругие сплавы на основе системы Ti–Zr–Nb являются одним из самых перспективных материалов для изготовления костных имплантатов благодаря уникальному сочетанию биомеханической и биохимической совместимости [1, 2]. Получение из этого сплава длинномерных прутковых заготовок диаметром 3–8 мм, вос-

требуемых при изготовлении костных имплантатов, с высоким комплексом функциональных свойств является важной задачей [3]. Комбинированная высокотемпературная термомеханическая обработка, включающая радиально-сдвиговую прокатку (РСП) и ротационную ковку (РК), может быть эффективным технологическим подходом для ее решения [4].

Математическое моделирование методов обработки металлов давлением (ОМД) весьма эффек-

тивно для изучения особенностей пластической деформации, особенно в процессах со сложной геометрией, а также при возвратно-поступательном перемещении инструментов деформации. Технология РСП является одним из процессов ОМД, который можно использовать для изготовления прутков с круглым сплошным сечением. Он представляет собой вариант винтовой прокатки в области больших углов подачи валков (18° – 21° и более) [5].

Заготовка подвергается деформации тремя валками, расположенными через 120° вокруг ее оси, вращающимися в одном направлении, как показано на рис. 1. Основным преимуществом этого процесса является возможность одинаково эффективно обрабатывать сплавы на основе магния

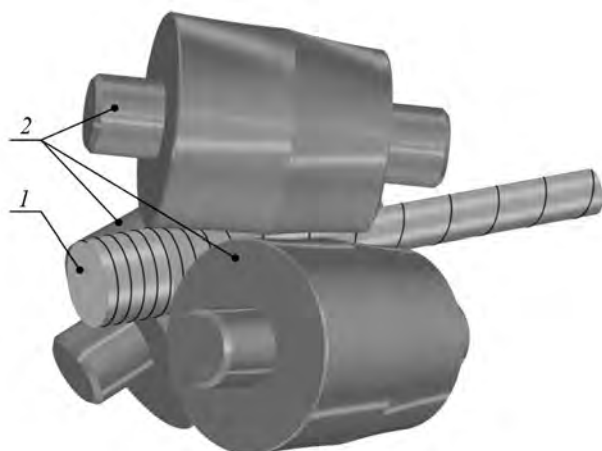


Рис. 1. Схема радиально-сдвиговой прокатки
1 – заготовка с винтовой траекторией перемещения, 2 – валок

[6], алюминия [7], титана [8] и др., а также сложные сплавы, например на основе системы Ti–Zr–Nb [9]. Кроме того, данный метод характеризуется высокими значениями истинных (накопленных) степеней деформаций, высокой производительностью, простотой эксплуатации и доступной стоимостью станков РСП. Однако есть некоторые особенности, связанные с этой технологией, относящиеся к градиентности структуры металла по сечению конечного проката. В прутках из сплавов, регламентирована однородность структуры и свойств по сечению и длине, а также нежелательна чрезмерная градиентность.

Ротационная ковка (РК) — это усовершенствованный метод ОМД, который обычно используется для уменьшения диаметров сплошных или трубчатых изделий постоянного или переменного сечения [10–12]. На рис. 2 показаны принцип и схема РК прутков с помощью двухбойковой ротационно-ковочной машины, в которой обработка заготовки происходит небольшими шагами при высокочастотном возвратно-поступательном движении калиброванных бойков [13]. Рабочая поверхность калибров охватывает практически весь внешний контур очага деформации. Деформирующие усилия радиального направления равномерно сжимают заготовку по периметру. Все это приводит к увеличению однородности пластической деформации по поперечному сечению.

Известно, что изучение таких процессов, как РСП и РК, весьма затруднено сложными трехмерными траекториями движения инструментов и

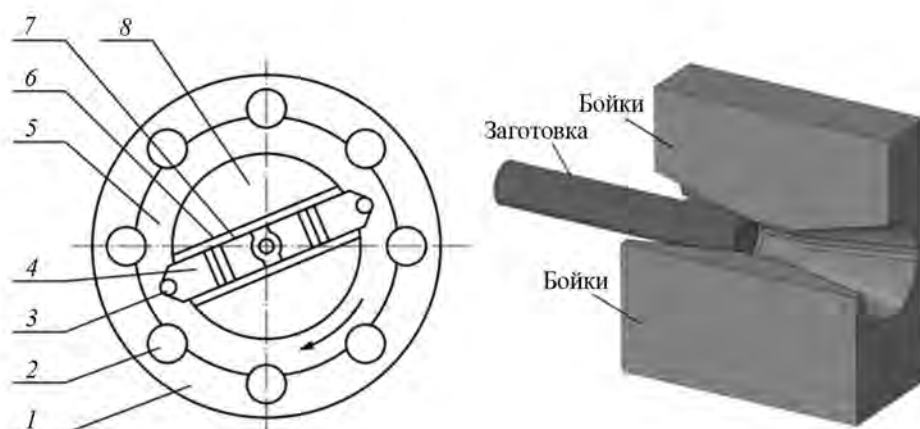


Рис. 2. Схема ковочного узла двухбойковой машины при РК
1 – сепаратор, 2 – ролик сепаратора, 3 – ролик ползуна, 4 – ползун, 5 – регулировочные пластины, 6 – боек, 7 – бойковая плита, 8 – вал

деформируемого металла. Тем не менее их можно успешно исследовать с помощью метода конечных элементов (МКЭ). В более ранних работах некоторые компьютерные программы использовались при моделировании процессов РСП и РК. Например, в [14] рассмотрено влияние горячей РСП на микроструктуру титановых сплавов с помощью пакета LS-DYNA. Авторами [15] использована трехмерная модель конечных элементов на основе программного обеспечения QForm для изучения градиентной структуры. В работе [16] исследовано влияние различных схем термомеханической обработки, которые включают в себя ротационную ковку и интенсивную пластическую деформацию равноканальным угловым прессованием, на структуру, механические и функциональные свойства сплавов TiNi, а в [12] описано течение материала во время подачи в ходе РК с помощью метода конечных элементов с двумерной имитационной моделью. Авторы [17] представили сравнение свойств цилиндров и трубных изделий при многоходовой горячей радиальной ковке с использованием пакета ABAQUS/Explicit. Некоторые другие исследователи [18–20] также изучали процесс ротационнойковки с использованием МКЭ для трубной заготовки различного назначения.

Сочетание РСП с другими процессами описано в ряде публикаций. В работе [21] рассмотрена комбинация РСП и обработки на сортопрокатных станах с применением программы LS-DYNA. Конечно-элементная модель была разработана для оптимизации технологических параметров комбинации РСП и экструзии на основе программы Simfact. Авторы [22, 23] изучали влияние сочетания гидростатической экструзии с последующей ротационной ковкой на свойства коммерчески чистого титана (Grade 2 по ASTM).

Однако исследования совместной реализации РСП и РК с использованием трехмерного конечно-элементного метода до сих пор не проводились, особенно это касается получения прутков малого диаметра из титановых сплавов.

В настоящей работе была разработана комплексная 3D-модель для моделирования сочетания РСП и РК в горячем состоянии с учетом изменения температуры, сложного движения заготовки и инструмента. Целью исследования было определение полей пластической деформаций, скорости деформации и напряжений в длинномерных объемах малого диаметра с использованием пакета QForm VX.

Математическое моделирование

Процесс моделирования включает в себя два основных этапа. На первом, обозначенном РСП1, заготовка длиной 60 мм прокатывается с \varnothing 15 мм до \varnothing 12 мм на стане радиально-сдвиговой прокатки 10-30 (производства МИСиС) при температуре 900 °С. Второй этап содержит три операции ротационнойковки при $t = 800$ °С: РК1 уменьшает диаметр с 12 до 11 мм, РК2 — с 11 до 10 мм, РК3 формирует пруток \varnothing 8 мм. Для сравнения была смоделирована другая схема обработки заготовки \varnothing 12 мм до прутка \varnothing 10 мм только с помощью радиально-сдвиговой прокатки (РСП2). Напряженно-деформированное состояние заготовки после каждой операции фиксировалось и передавалось на следующую операцию в качестве исходного состояния.

Частота вращения валков \varnothing 57 мм при РСП составляла 90 об/мин, угол скрещивания осей валков и прокатки — 20°, тангенциальное смещение оси валка от оси прокатки — 30 мм.

Процедура задания движения инструмента в используемой версии QForm VX не может учесть вращение бойков вокруг обрабатываемой заготовки. Поэтому для моделирования процесса РК предусматривается кинематически эквивалентная замена. Инструмент совершает возвратно-поступательное движение, а заготовка поворачивается и подается вперед в паузе между ударами. Процесс РК моделировался при осевой подаче заготовки 0,95 мм и ее повороте после каждого удара на 45°. Время между ударами составляло 0,029 с. Эти параметры были выбраны на основе характеристики реального оборудования РСП и РК, которое в настоящее время доступно для применения в производстве.

В качестве материала заготовки использован титановый сплав Ti–6Al–4V. Его химический состав следующий, мас. %:

Al.....	5,3–6,8	H.....	≤ 0,015
V.....	3,5–5,3	Si.....	≤ 0,1
Zr.....	≤ 0,3	N.....	≤ 0,05
Fe.....	≤ 0,6	C.....	≤ 0,1
O.....	≤ 0,2	Примеси.....	≤ 0,3

Характеристики его деформационного поведения заимствованы из библиотеки программы QForm VX. Выбор данного материала обусловлен

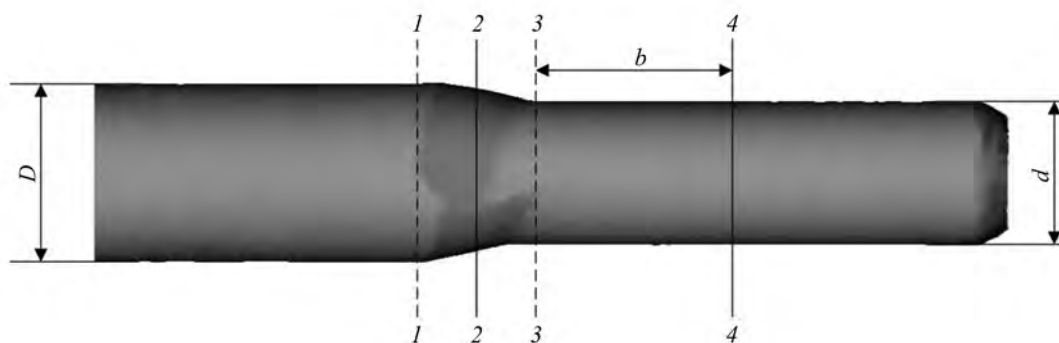


Рис. 3. Характерные сечения в заготовке для построения полей пластической деформации, напряжений и скорости деформации

его наибольшим сходством по химическому составу и деформационному поведению при радиально-сдвиговой прокатке со сплавом Ti—Zr—Nb.

Напряжение сдвига на границе раздела между заготовкой и инструментом выражается в виде закона трения Зибеля:

$$\tau = m \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}},$$

где σ_s — напряжение пластического течения, а m — фактор трения, значения которого были заданы равными 1 и 0,3 для РСП и РК соответственно.

На рис. 3 показаны сечения, выбранные для построения полей пластической деформации, напряжений и скорости деформации. Сечение 1—1 расположено в начале зоны обжатия, 2—2 — в середине и 3—3 — в конце обжимного участка. Сечение 4—4 находится в готовом прутке на расстоянии $b = 25$ мм от выхода из очага деформации. Напряжение и скорость деформации измерялись на участке 2—2, а пластическая деформация — на участке 4—4. В используемой версии программы конечно-элементного моделирования QForm VX 8.2.3 термином «пластическая деформация» обозначена величина, которая тождественна накопленной степени деформации в механике сплошных сред и теории обработки металлов давлением [24]. А термин «скорость деформации» обозначает интенсивность скорости деформации в формулировке [24].

Для сопоставления результатов моделирования с экспериментальными данными была проведена опытная термомеханическая обработка заготовки из сплава состава, ат. %: Ti—18Zr—14Nb, с памятью формы в виде прутка круглого сечения $\varnothing 23$ мм. На первом этапе при температуре 900 °С производилась прокатка заготовки на стане 10-30

до прутка $\varnothing 12,7$ мм за 3 прохода с промежуточными выдержками в печи в течение 3—5 мин перенастройки калибра. На втором этапе прутки-заготовки нагревались в проходной электропечи сопротивления до температуры 800 °С в течение 25 мин. Процесс РК осуществлялся на ротационно-ковочной машине (РКМ-2) до прутка $\varnothing 7,2$ мм за 5 проходов. После каждого этапа отбирались контрольные образцы для анализа структуры металла.

Результаты и их обсуждение

Пластическая деформация в поперечном сечении

На рис. 4 представлены результаты расчета пластической деформации (ϵ) для четырех вариантов обработки. После РСП1 (см. рис. 4, а) имеет место характерная картина с выраженным градиентом. Во внешнем периферийном слое толщиной около 2 мм пластическая деформация достигает максимальных значений — 3 и более, которые по мере приближения к оси прутка снижаются. В центральной зоне образуется круглая область диаметром ~ 6 мм, где пластическая деформация минимальна $\epsilon < 1$.

Рис. 4, б и в показывает, что после одной и двух операций ротационнойковки (РК1 и РК2) поле пластической деформации становится более равномерным, несмотря на небольшое обжатие по диаметру (1 мм за проход). Процесс РК1 с $\varnothing 12$ мм до $\varnothing 11$ мм уменьшает центральную зону минимальной пластической деформации ($\epsilon \leq 1$) с 6 до 2 мм. Повторная ковка РК2 с $\varnothing 11$ мм до $\varnothing 10$ мм повышает минимальный уровень пластической деформации в центре на 20 % до значения 1,2.

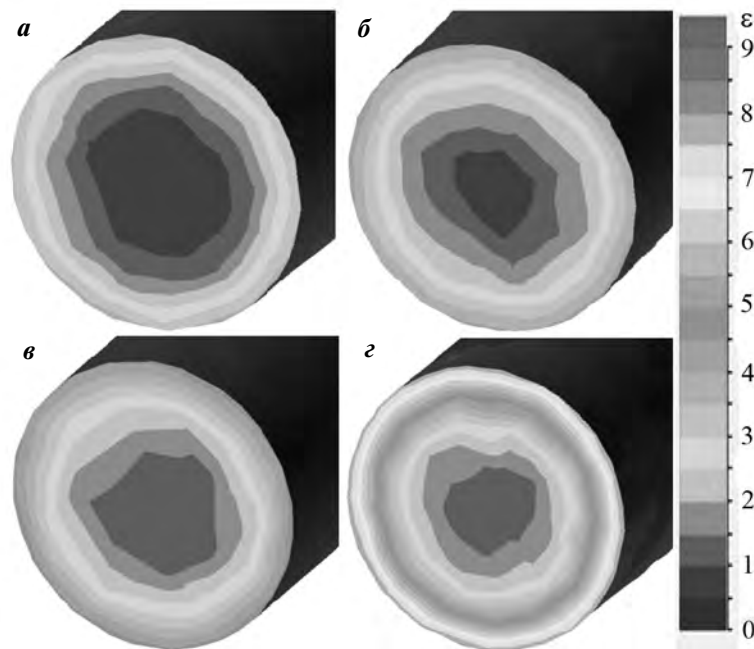


Рис. 4. Пластическая деформация по поперечному сечению заготовки
a – процесс РСП1, *б* – РК1, *в* – РК2, *з* – РСП2

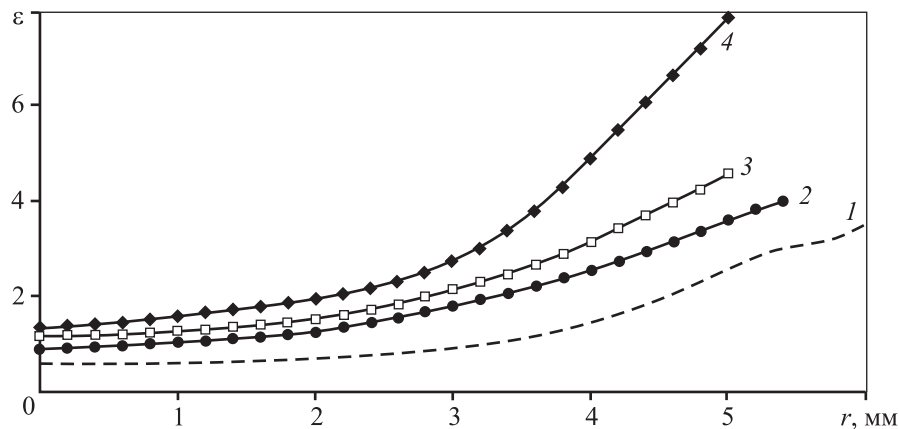


Рис. 5. Зависимость пластической деформации от радиуса заготовки при различных схемах деформирования
1 – РСП1, *2* – РК1, *3* – РК2, *4* – РСП2

При выполнении такого же обжатия $\varnothing 12 \rightarrow \varnothing 10$ мм только радиально-сдвиговой прокаткой (РСП1 + РСП2) наблюдается совершенно иная деформационная картина: резко возрастает пластическая деформация в периферийных слоях до $\varepsilon = 8,1$, а в центре она изменяется незначительно. При этом неравномерность по сечению существенно усиливается, что в контексте решаемой задачи крайне нежелательно.

Для того чтобы графически показать изменение пластической деформации от центра к периферии, была измерена пластическая деформация в точках сечения по схеме и построены графики (рис. 5), ко-

торые наглядно показывают, что радиально-сдвиговая прокатка (кр. *1* и *4*) создает существенно неравномерное (градиентное) распределение пластической деформации по радиусу. Применение ротационнойковки после РСП (кр. *2* и *3*) существенно снижает результирующую неравномерность.

Численные результаты для центральной точки показали, что для процесса РСП1 $\varepsilon = 0,58$ при уменьшении диаметра заготовки на 3 мм, а для РК1 и РК2 $\varepsilon = 0,9$ и $1,2$ соответственно при меньшем обжатии по диаметру $\Delta d = 1$ мм. Для процессов РСП1, РК1 и РК2 отношение $\varepsilon/\Delta d$ равно $0,193$, $0,32$

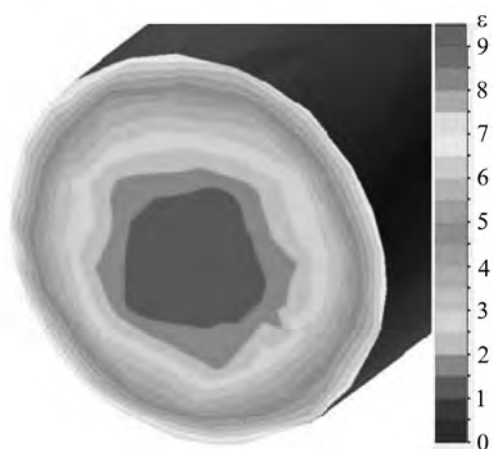


Рис. 6. Поле пластической деформации по сечению после РК3

и 0,3 соответственно. Отсюда видно, что ротационная ковка оказывает более существенное влияние на пластическую деформацию в центральной части заготовки, чем радиально-сдвиговая прокатка.

Далее было проведено дополнительное исследование изменения деформационной картины при уменьшении диаметра заготовки с помощью ротационнойковки $\varnothing 9 \text{ мм} \rightarrow \varnothing 8 \text{ мм}$. При $t = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ (РК3) распределение пластической деформации в поперечном сечении конечной заготовки показано на рис. 6. Значение пластической деформации в центре составило 1,52, а на периферии — 5,2. Таким образом, выявлена устойчивая тенденция повышения величины ϵ в центральной зоне.

Полученные результаты согласуются с исследованиями [21] для процесса РСП и работы [25] для РК. Также установлено, что сочетание процессов радиально-сдвиговой прокатки и ротационнойковки повышает равномерность распределения пластической деформации в поперечном сечении, особенно в центральной зоне заготовки.

Скорость пластической деформации в поперечном сечении

Распределение скорости пластической деформации ($\dot{\epsilon}$) по сечению заготовки в процессах РСП1 и РК1 показано на рис. 7. Видно, что при РСП (рис. 7, а) расчетное поле неравномерно, максимальная скорость деформации локализуется в достаточно узкой приконтактной зоне и составляет более 220 с^{-1} , а минимальные ее значения (4 с^{-1}) зафиксированы в центре. В процессе РК наблюдаются значительно более высокие скорости деформации, которые практически на всей площади поперечного сечения достигают значений 110—210 с^{-1} (рис. 7, б). В зоне приложения ударной нагрузки величина $\dot{\epsilon}$ локально возрастает до уровня 300 с^{-1} .

Повышение равномерности распределения скорости деформации при сочетании РСП1 и РК1 позволяет прогнозировать улучшение механических свойств в отношении их равномерности по сечению прутка.

Аналогичный результат доказан авторами работы [26], в которой для улучшения качества для полых железнодорожных осей после винтовой прошивки была применена радиальная ковка с достаточно равномерным распределением скорости деформации при минимальном ее значении 110 с^{-1} .

Анализ напряжений

Распределение среднего напряжения, в том числе с положительными и отрицательными значениями, в процессах РСП и РК показано на рис. 8. Минимальное напряжение в виде сжатия (-430 МПа) наблюдалось в зоне контакта между заготовкой и валком в ходе РСП, а растягивающее

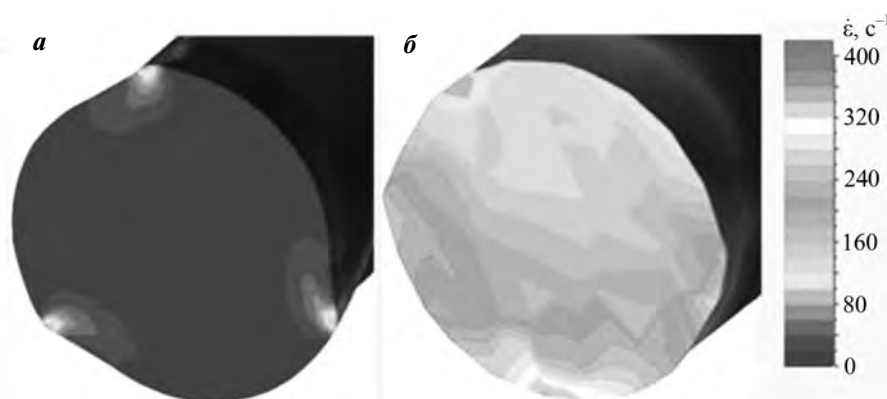


Рис. 7. Скорость деформации на поперечном сечении в процессах РСП1 (а) и РК1 (б)

напряжение (30 МПа) — в центре заготовки. Напротив, среднее распределение напряжений в объеме послековки является полностью отрицательным: от -70 до -550 МПа.

Хорошо известно, что растягивающие напряжения в центральной зоне и их неоднородное распределение обычно вызывают остаточное напряжение в готовом продукте, которое более значительно, когда проводятся два процесса — РСП1 и РСП2. Однако при помощи комбинации РСП + РК может быть получен продукт с минимальным уровнем остаточных напряжений растяжения.

Анализ микроструктуры сплава Ti–Zr–Nb после РСП и РК

На рис. 9 показана зеренная структура образцов после РСП в трех областях поперечного сечения и после РК в двух областях (от периферии до центра). Хорошо видно, что РСП приводит к образованию неоднородной структуры вдоль поперечного сечения. Микроструктура периферийной зоны состоит из динамически рекристаллизованных зерен со средним размером $d = 25$ мкм (рис. 9, в). При переходе в промежуточную зону величина ча-

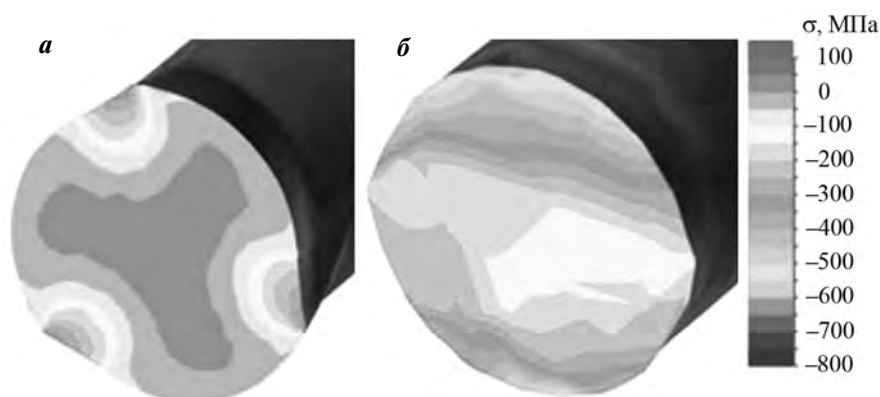


Рис. 8. Распределение среднего напряжения по сечению очага деформации в процессах РСП1 (а) и РК1 (б)

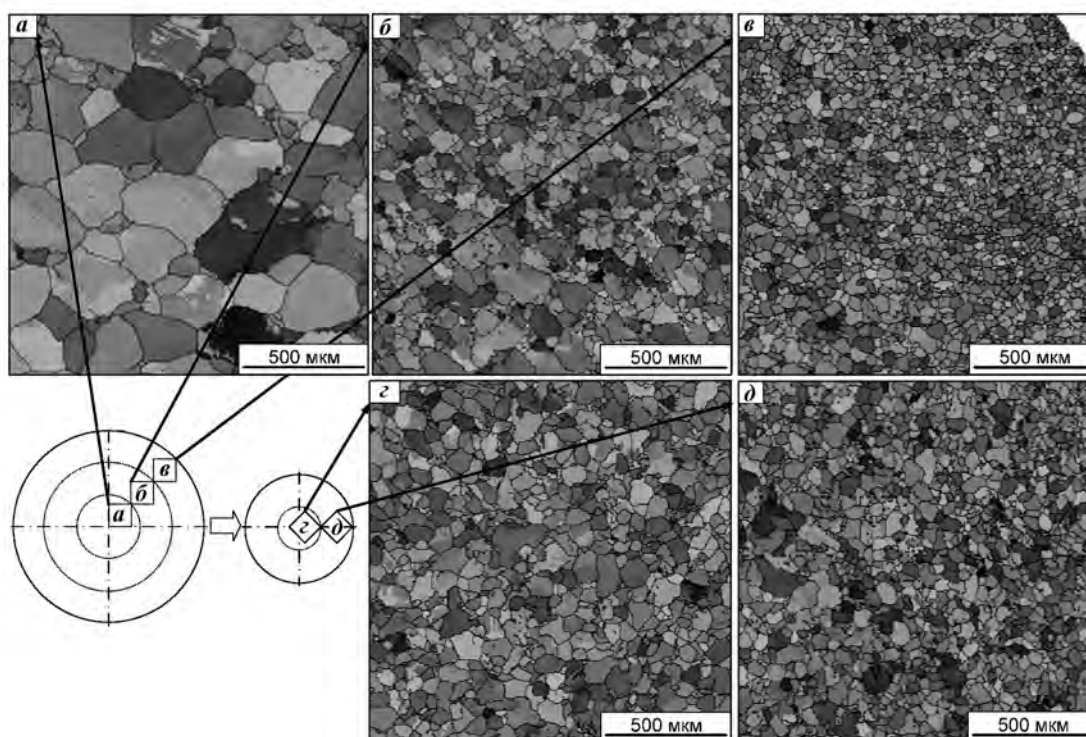


Рис. 9. Микроструктура поперечного сечения прутков из сплава Ti–18Zr–14Nb после процессов РСП (а–в) и РК (з, д)

стиц увеличивается до $d = 44$ мкм, а распределение их размеров проявляет бимодальный характер (рис. 9, б). В этом случае структура состоит из более крупных (~100 мкм) и мелких (~30 мкм) зерен. В центральной зоне большинство зерен крупные ($d = 130$ мкм), окруженные волнистыми границами (рис. 9, а).

Учитывая эти наблюдения, можно утверждать, что динамические процессы структурообразования развиваются от периферии через промежуточную зону в направлении центра в следующей последовательности:

- полная динамическая рекристаллизация;
- частичная динамическая рекристаллизация и динамическая полигонизация, смешанная структура, состоящая из рекристаллизованных зерен и более крупных исходных зерен с динамически полигонизованной субструктурой;

- динамическая полигонизация (и, возможно, статическая рекристаллизация) внутри исходно крупных зерен.

После РК структура сплава становится более однородной. На периферии она мелкозернистая ($d = 34$ мкм), состоящая из рекристаллизованных и нерекристаллизованных зерен, содержащих динамически полигонизованную субструктуру (рис. 9, д). По мере приближения к центру размеры зерен увеличивается до 43 мкм, а их распределение напоминает бимодальное в промежуточной зоне после РСП (ср. рис. 9, б и з).

Заключение

С использованием метода конечных элементов, реализованного в программе QForm VX, проведено моделирование сочетания процессов РСП и РК с целью предсказания распределения пластической деформации изделия по сечению, а также скорости деформации и полей напряжений. Полученные данные сравнивались с результатами, полученными в процессе только РСП, с одинаковыми диаметрами заготовки и продукта. На примере титанового сплава Ti–6Al–4V моделирование показало следующее:

- по сравнению с РСП преимущества комбинированного процесса РСП + РК заключаются в более равномерном распределении пластической деформации и ее скорости, что ожидаемо приводит к улучшению механических свойств, особенно в отношении их равномерности;

- высокий уровень сжимающих напряжений в процессе РК позволяет избежать остаточных

растягивающих напряжений в заготовке, которые могут возникнуть в центральной зоне при РСП.

Экспериментально для сплава Ti–Zr–Nb с памятью формы подтверждено, что при комбинации двух технологий используются преимущества каждой из них — высокий уровень пластической деформации и производительность РСП и однородная по сечению заготовки микроструктура сплава, а также гладкая поверхность после РК. Это обуславливает индустриальную перспективность комбинированного способа деформации для получения длинномерных прутков.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-79-00247).

Литература/References

1. Geetha M., Singh A.K., Asokamani R., Gogia A.K. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants — A review. *Progr. Mater. Sci.* 2009. Vol. 54. Iss. 3. P. 397–425.
2. Kim H.Y., Fu J., Tobe H., Kim J.I., Miyazaki S. Crystal structure, transformation strain, and superelastic property of Ti–Nb–Zr and Ti–Nb–Ta alloys. *Shape Memory and Superelasticity*. 2015. Vol. 1. Iss.2. P. 107–116.
3. 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 ротационной ковки. *Металлург.* 2019. No. 1. С. 45–52. Sheremetyev V.A., Kudryashova A.A., Dinh X.T., Galkin S.P., Prokoshkin S.D., Brailovski 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.
4. 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.
5. Galkin S.P. Trajectory of deformed metal as basis for controlling the radial-shift and screw rolling. *Stal'*. 2004. No. 7. P. 63–66.
6. 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.

7. 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.
8. Карпов Б.В., Патрин П.В., Галкин С.П., Харитонов Е.А., Карпов И.Б. Радиально-сдвиговая прокатка прутков титанового сплава ВТ-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.
9. Sheremetyev V., Kudryashova A., Dubinskiy S., Galkin S., Prokoshkin S., Brailovski V. Structure and functional properties of metastable beta Ti—18Zr—14Nb (at.%) alloy for biomedical applications subjected to radial shear rolling and thermomechanical treatment. *J. Alloys Compd.* 2018. Vol. 737. P. 678—683.
10. Liu Y., Herrmann M., Schenck C., Kuhfuss B. Plastic deformation components in mandrel free infeed rotary swaging of tubes. *Procedia Manufactur.* 2019. Vol. 27. P. 33—38.
11. Al-Khazraji H., El-Danaf E., Wollmann M., Wagner L. Microstructure, mechanical, and fatigue strength of Ti—54M processed by rotary swaging. *J. Mater. Eng. Perform.* 2015. Vol. 24. Iss. 5. P. 2074—2084.
12. Moumi E., Ishkina S., Kuhfuss B., Hochrainer T., Struss A., Hunkel M. 2D-simulation of material flow during infeed rotary swaging using finite element method. *Procedia Eng.* 2014. Vol. 81. P. 2342—2347.
13. Vollertsen F. *Micro Metal Forming.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
14. Lopatin N.V. Effect of hot rolling by screw mill on microstructure of a Ti—6Al—4V titanium alloy. *Int. J. Mater. Form.* 2013. Vol. 6. No. 4. P. 459—465.
15. Wang Y.L., Molotnikov A., Diez M., Lapovok R., Kim H-E., Wang J.T., Estrin Y. Gradient structure produced by three roll planetary milling: Numerical simulation and microstructural observations. *Mater. Sci. Eng. A.* 2015. Vol. 639. P. 165—172.
16. Андреев В.А., Юсупов В.С., Перкас М.М., Просвирнин В.В., Шелест А.Е., Прокошкин С.Д., Хмелевская И.Ю., Коротицкий А.В., Бондарева С.А., Карелин Р.Д. Механические и функциональные свойства промышленных полуфабрикатов из сплава ТН-1, полученных теплой ротационной ковкой и РКУП. *Деформация и разрушение материалов.* 2017. No. 4. С. 43—48.
Andreev V.A., Yusupov V.S., Perkas M.M., Prosvirnin V.V., Shelest A.E., Prokoshkin S.D., Khmelevskaya I.Yu., Korotitskii A.V., Bondareva S.A., Karelin R.D. Mechanical and functional properties of commercial alloy TN-1 semiproducts fabricated by warm rotary forging and ECAP. *Russ. Metallurgy (Metally).* 2017. Vol. 2017. Iss. 10. P. 890—894.
17. Abedian A., Poursina M., Golestanian H. A comparison between the properties of solid cylinders and tube products in multi-pass hot radial forging using finite element method. In: *AIP Conf. Proc. (NUMIFORM, Porto, Portugal, 17—21 June 2007).* Vol. 908. Iss. 1. P. 963—968.
18. Zhang Q., Jin K., Mu D., Zhang Y., Li Y. Energy-controlled rotary swaging process for tube workpiece. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2015. Vol. 80. Iss. 9-12. P. 2015—2026.
19. Zhang Q., Jin K., Mu D. Tube/tube joining technology by using rotary swaging forming method. *J. Mater. Process. Technol. Elsevier B.V.* 2014. Vol. 214. Iss. 10. P. 2085—2094.
20. Zhang Q., Jin K., Mu D., Ma P., Tian J. Rotary swaging forming process of tube workpieces. *Procedia Eng. Elsevier B.V.* 2014. Vol. 81. P. 2336—2341.
21. Лопатин Н.В., Галкин С.П. Влияние комбинированной прокатки на структуру и свойства прутков титана ВТ1-0. *Известия вузов. Цветная металлургия.* 2013. No. 2. С. 39—46.
Lopatin N.V., Galkin S.P. The effect of combined rolling on the structure and properties of VT1-0 Titanium rods. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Universities' Proceedings Non-Ferrous Metallurgy).* 2013. No. 2. P. 39—46 (In Russ.).
22. Naizabekov A., Lezhnev S., Arbutov A., Panin E. Computer simulation of the combined process «Helical Rolling-Pressing». *Key Eng. Mater.* 2016. Vol. 716. P. 614—619.
23. Pachla W., Kulczyk M., Przybysz S., Skiba J., Wojciechowski K., Przybysz M., Topolski K., Sobolewski A., Charkiewicz M. Effect of severe plastic deformation realized by hydrostatic extrusion and rotary swaging on the properties of CP Ti grade 2. *J. Mater. Process. Technol.* 2015. Vol. 221. P. 255—268.
24. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1986.
Kolmogorov V.L. Metal forming mechanics. Moscow: Metallurgiya, 1986 (In Russ.).
25. Wu Y., Dong X., Yu Q. Upper bound analysis of axial metal flow inhomogeneity in radial forging process. *Int. J. Mech. Sci. Pergamon.* 2015. Vol. 93. P. 102—110.
26. Романенко В.П., Степанов П.П., Крискович С.М. Производство полых вагонных осей методами винтовой прошивки и радиальнойковки. *Металлург.* 2017. No. 10. С. 44—48.
Romanenko V.P., Stepanov P.P., Kriskovich S.M. Production of hollow railroad axles by screw piercing and radial forging. *Metallurgist.* 2018. Vol. 61. No. 9-10. P. 873—877.