

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ТА ДИНЬ СУАН

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ПРУТКОВ МЕЛКИХ СЕЧЕНИЙ ИЗ БИОСОВМЕСТИМЫХ СВЕРХУПРУГИХ СПЛАВОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ СИСТЕМЫ Ti-Zr-Nb С ПРИМЕНЕНИЕМ РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКИ И РОТАЦИОННОЙ КОВКИ

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
д.т.н., проф. Галкин Сергей Павлович

Научный консультант
к.т.н., доцент, с.н.с. Шереметьев Вадим Алексеевич

Москва – 2020

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Для решения проблемы изготовления высококачественных длинномерных прутков малого круглого сечения технического и медицинского назначения, перспективным является способ радиально-сдвиговой прокатки (РСП) и его комбинирование с другими методами обработки металлов давления, такими как ротационная ковка (РК), прокатка, или прессование. Традиционные способы (прокатка, прессование, волочение и другие) имеют ряд ограничений, а методы интенсивной пластической деформации не позволяют получать длинномерные полуфабрикаты. Преимущества сочетания радиально-сдвиговой прокатки и ротационнойковки заключаются в формировании однородной по сечению заготовки микроструктуры и высокого качества поверхности длинномерных прутков. Кроме того, преимуществами этого подхода также являются низкая энергоемкость и высокая эффективность получения малых (до 1т) партий полуфабрикатов для изготовления костных имплантатов.

Для обеспечения наилучшей биомеханической совместимости материала, замещающего костную ткань важна не только близость основных механических характеристик к характеристикам костной ткани, но и крайне желательна схожесть их поведения во время деформации. Материал должен обладать низким значением модуля Юнга, близким к таковым для костной ткани (до 30ГПа). Сплавы с памятью формы за счет низкого модуля упругости и эффекта сверхупругости, в отличие от большинства металлов, проявляют наиболее близкое к костной ткани механическое поведение. Среди этих сплавов, состоящих только из биосовместимых для организма человека металлов, одними из самых перспективных являются сплавы на основе системы Ti-Zr-Nb. Известно, что термомеханическая обработка сплавов с памятью формы служит эффективным инструментом формирования структуры и управления комплексом функциональных свойств.

Разработка промышленных технологий получения из этих сплавов высококачественных прутковых заготовок, пригодных для изготовления высокобиосовместимых костных имплантатов, является актуальной и востребованной задачей, решение которой может быть обеспечено путем применения термомеханической обработки, включающей радиально-сдвиговую прокатку и ротационную ковку.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы являются исследование и разработка технологического процесса получения высококачественных длинномерных заготовок малых диаметров из сплавов системы Ti-Zr-Nb на основе сочетания радиально-сдвиговой прокатки (РСП) и ротационнойковки (РК).

Для достижения поставленной цели в этой исследовании определены следующие задачи:

1. Установить постоянные очага деформации РСП в условиях геликоидального течения металла и цикличности процесса. Определить аналитические зависимости деформационных, скоростных и геометрических параметров радиально-сдвиговой прокатки от числа циклов деформации. Разработать методику аддитивного построения процесса РСП из циклов с изменяющимися деформационно-геометрическими параметрами.

2. Выполнить экспериментальное исследование реологических свойств перспективного сплава системы Ti-Zr-Nb в условиях горячей деформации и экспортировать данные в программный комплекс конечно-элементного моделирования Qform.

3. Провести сравнительное моделирование процесса РСП перспективного сплава системы Ti-Zr-Nb и серийного сплава ВТ6 с помощью Qform.

4. Исследовать комбинированный процесс (РСП +РК) получения прутков диаметром 6-9мм из сплава Ti-Zr-Nb с применением компьютерного моделирования в Qform.

5. Выполнить прямое экспериментальное опробование комбинированного процесса (РСП +РК) непосредственно в производственных условиях. Оценить структуру и свойства получаемых прутков сплава Ti-Zr-Nb по этапам технологического передела.

Научная новизна. Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Построена деформационно-геометрическая модель процесса РСП, с учетом цикличности процесса деформации и геометрических факторов, включающая, в частности, новые константы очага деформации и новые зависимости скорости и степени деформации в каждом цикле от параметров траектории истечения металла и настройки стана;

2. С применением компьютерного моделирования установлено влияние угла подачи, коэффициента вытяжки и температур на напряженно-деформированное состояние и другие параметры (утяжка, усилие, мощность) РСП заготовок из сплава нового поколения системы Ti-Zr-Nb в сравнении с серийным сплавом ВТ6;

3. Выявлены особенности развития пластической деформации в комбинированном процессе получения прутков мелких сечений из сверхупругого сплава системы Ti-Zr-Nb на основе сочетания РСП и РК;

4. Прямыми экспериментами на опытно-промышленном оборудовании показано, что высокотемпературная деформация с использованием сочетания РСП и РК по разработанным режимам способствует глубокой проработке структуры сплава Ti-Zr-Nb с формированием однородного по сечению мелкого зерна.

Методики и методы исследований. Методы исследования, заключается в активной теоретико-моделирующей деятельности и эксперимента процесса технологической деформации, были проведены для медицинского материалов (ВТ6 и TZN).

Практическая значимость

- деформационно-геометрическая модель процесса РСП устанавливает практически важные соотношения связи скорости и степени деформации в каждом цикле с параметрами настройки стана.

- данные моделирования процесса РСП и сочетания РСП и РК позволяют прогнозировать качество получаемых прутков и определять рациональные технологические параметры.

- разработана и экспериментально опробована технология термомеханической обработки сплава системы Ti-Zr-Nb с памятью формы, позволяющей получать прутки диаметром 3-8 мм длиной более 2 м с размером зерна около 40 мкм, с благоприятным сочетанием низкого модуля Юнга ($E = 39$ ГПа), достаточно высокой прочности ($\sigma_b = 618$ МПа) и сверхупругого поведения при комнатной температуре для медицинского применения.

- результаты теоретических и экспериментальных исследований используются при выполнении практических и лабораторных занятий студентами бакалавриата и магистратуры на кафедре ОМД НИТУ «МИСиС».

Основные положения, выносимые на защиту

- Деформационно-геометрическая модель процесса РСП, с учетом цикличности процесса деформации и геометрических факторов;

- Влияние технологических параметров РСП на напряженно-деформированное состояние заготовок из сплава системы Ti-Zr-Nb в сравнении с серийным титановым сплавом ВТ6; Температурно-деформационные и скоростные режимы РСП и РК для получения прутков мелких сечений из сплавов системы Ti-Zr-Nb

- Влияние сочетания процесса РСП и РК на структуру медицинских сплавов;

- Свойства и сверхупругое поведение сплава системы Ti-Zr-Nb из полученных прутков при комнатной температуре.

Апробация работы

Основные материалы диссертационной работы доложены и обсуждены:

Magnitogorsk rolling practice 2018 — International youth scientific-practical conference in the nosov magnitogorsk state technical university; International Conference on Engineering Research and Applications - ICERA 2019: Advances in Engineering Research and Application.

Публикации

Результаты исследования изложены в 3 рецензируемых печатных изданиях, входящих в перечень ВАК и входящих в базы данных Scopus, ISI.

Структура и объём диссертации

Работа состоит из введения, четыре главы, заключения, списка литературы из 75 наименований отечественных и зарубежных авторов, 4 приложений. Диссертация изложена на 139 страницах и включает 68 рисунков и 18 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель, и поставлены задачи исследования, изложена научная новизна полученных результатов, а также представлены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлена подготовка обзора литературы по тематике исследований; сравнительный анализ современных технологий получения сплошных и пористых материалов для внутрикостных имплантатов на основе титановых сплавов.

Индустриальные, традиционные способы, широко применяемы в металлургии и машиностроении. В эту группу входят: прессование, ковка, штамповка и прокатка. Данные процессы ориентированы, в основном, на получение металлопродукции заданной геометрической формы (профиля) и размеров. Регламентированные параметры структурного строения (если таковые имеются) и требуемый уровень физических свойств конечных изделий достигаются легированием и/или термообработкой, в том числе термомеханической. Такие способы (сортовая прокатка, прессование, волочение и другие) не позволяют получать однородную ультрамелкозернистую структуру из-за ограничивающей степени деформации обрабатываемой заготовки.

Способы интенсивной пластической деформации (ИПД) направлены на получение «новых» материалов с рекордными уровнями прочности и пластичности, за счет мелко- и сверхмелкозернистого строения. На современном этапе развития данных технологий геометрические параметры получаемых объемов относят к параметрам второго уровня, обозначая их общим термином типа «объемные наноматериалы» или «объемные наноструктурные металлические материалы». Однако большинство результатов не получили адекватного практиче-

ского применения. Основная проблема состоит в том, что на сегодняшний день, ни один из предлагаемых процессов ИПД не позволяет в производственных условиях получить изделия, приемлемые по форме и габаритным размерам для широкого практического конструирования. В первую очередь это касается возможности производства структурированного металла в виде длинномерных изделий, типа прутков и штанг.

В решении этой проблемы существенное продвижение может быть достигнуто с помощью процессов винтовой, и ее частного случая, радиально-сдвиговой прокатки.

Из изложенного следует, что на сегодняшний день радиально-сдвиговая прокатка является одним из наиболее эффективных способов глубокой проработки структуры металла в длинномерных изделиях типа штанг и прутков.

Кроме того, она позволяет:

- прокатывать практически все деформируемые сплавы на основе Fe, Ti, Cu, Ni, Al и др. включая сложнелегированные, малопластичные, непрерывнолитые;
- получать прокат высокой точности;
- достигать с уникальных служебных и физико-механических свойств.

Мини-станы РСП представляют собой компактное оборудование с уникальными массогабаритными характеристиками, низкий уровень деформирующих усилий и потребляемой мощности. Оснащены универсальным инструментом для широкого размерно-марочного сортамента.

Процесс и станы РСП могут быть, как автономно, так и в сочетании с другими способами ОМД, положены в основу создания перспективных технологий ТМО для широкого промышленного применения.

Во **второй главе** построена деформационно-геометрическая модель радиально-сдвиговой прокатки.

Деформации, скорости, траектории конечного формоизменения

Для процесса радиально-сдвиговой прокатки сплошных заготовок характерны широкие пределы варьирования радиальных обжатий (коэффициентов вытяжки) за проход. Уменьшение диаметра прокатываемой заготовки, совершающей винтовое движение, создает своеобразную кинематическую картину процесса, существенно отличающуюся от кинематики винтовой прокатки трубных заготовок с меньшими перепадами диаметра. Как указывалось выше, числу фундаментальных отличий РСП от других стационарных процессов прокатки и обработки давлением относится уменьшение скорости движения периферийных слоев металла при одновременном ускорении центральных слоев.

Это явление может быть продуктивно исследовано методом траекторно-скоростного анализа, основные положения и общие выводы которого подробно изложены в основополагающем исследовании. В этой работе выявлены наиболее общие закономерности конечного изменения внутренней геометрии винтовых траекторий и скоростей движения частиц металла, сопровождающего пластическое формоизменение заготовки в процессе РСП. Установлен ряд фундаментальных траекторно-скоростных соотношений, для конечного формоизменения. Обнаружен и описан новый вид неравномерности деформации, обусловленный различиями в траекториях и скоростях течения металла. Разработаны практически значимые положения о связи траекторий истечения металла с характером формирования структуры металла в различных слоях заготовки. Научно обосновано получение градиентной структуры металла и

определены основные факторы влияния.

Далее, в настоящем разделе развивается траекторно-скоростной метод анализа процесса РСП, с учетом цикличности процесса деформации.

Предполагается что:

- точки, лежащие на поверхности исходной заготовки до деформации, остаются на поверхности получаемого проката и после деформации;
- угловые скорости вращения заготовки и проката равны;
- процесс формоизменения стационарный и в каждом отдельном цикле деформации соблюдается закон постоянства секундных объемов.

Исследуемая схема процесса представлена на рисунке 1

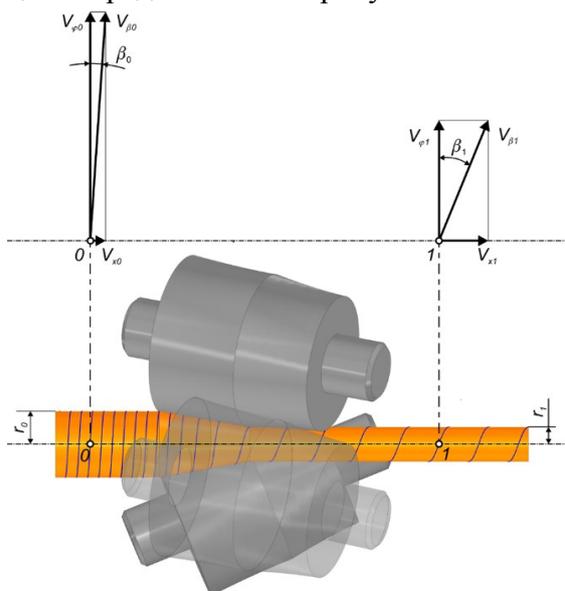


Рисунок 1 – Схема процесса РСП

В качестве количественных параметров формоизменения обычно используют:

- коэффициент радиального обжатия $\lambda = \frac{r_0}{r_1}$; - коэффициент вытяжки $\mu = \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^2$;

В этом случае между скоростями движения, углами подъема винтовых траекторий в конечном и исходном состояниях существуют соотношения:

$$\frac{V_{\varphi 1}}{V_{\varphi 0}} = \frac{r_1}{r_0} = \lambda^{-1}; \quad \frac{V_{x1}}{V_{x0}} = \left(\frac{r_1}{r_0} \right)^2 = \mu; \quad \frac{\operatorname{tg} \beta_1}{\operatorname{tg} \beta_0} = \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^3 \quad (1)$$

Последняя формула дает основание для введения в теорию и практику радиально-сдвиговой прокатки дополнительного коэффициента ζ (греческая дзетта), который характеризует изменение тангенса угла подъема винтовой траектории на поверхности раската и численно равен кубу отношения исходного и конечного радиусов (диаметров), т.е.

$$\zeta = \frac{\operatorname{tg} \beta_1}{\operatorname{tg} \beta_0} = \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^3 \quad (2)$$

Вдоль траектории движения выбранной материальной точки, между крайними сечениями в каждом сечении очага деформации 1 и 0 и в любом произвольном сечении j соблюдается равенство

$$r_1^3 \cdot \operatorname{tg} \beta_1 = r_0^3 \operatorname{tg} \beta_0 = r_j^3 \operatorname{tg} \beta_j = C_t \quad (3)$$

где C_t – постоянная траектории.

Число циклов деформации N может быть определено по формуле:

$$N = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta_1} \left[\left(\frac{r_0}{r_1} \right)^3 - 1 \right] \quad (4)$$

Или с учетом (2)

$$N = \frac{1}{C} (\zeta - 1), \text{ и } N = \frac{1}{C_\alpha} \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \beta_0} - \frac{1}{\operatorname{tg} \beta_1} \right) \quad (5)$$

где $C = 2\pi \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta_1$ и $C_\alpha = 2\pi \cdot \operatorname{tg} \alpha$ постоянные очага деформации.

В этих условиях для процесса обжатия в один цикл деформации на обжимном участке справедливо соотношение, которое находится подстановкой $N=1$ в (5) и разрешенное относительно коэффициента подъема траектории ζ

$$\zeta(1) = C + 1, \quad (6)$$

здесь и далее запись вида $\zeta(1)$ означает значение циклически изменяющегося параметра в зависимости от числа циклов, т.е. в данном случае это коэффициент ζ , соответствующий одному циклу деформации.

В общем случае для обжимного участка, составленного из j циклов, имеет место равенство

$$\zeta(j) = jC + 1 \quad (7)$$

Далее вычисляются тангенсы углов подъема винтовой траектории на исходной заготовке при прокатке в 1, 2 и j циклов деформации, соответственно. Действительно из определения коэффициента ζ следует, что в j цикле будет справедливо:

$$\operatorname{tg} \beta_0(j) = \frac{\operatorname{tg} \beta_1}{jC + 1} \quad (8)$$

При этом сам угол составит

$$\beta_0(j) = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{tg} \beta_1}{jC + 1} \right) \text{ или } \beta_0(j) = \operatorname{arcctg} (jC_\alpha + \operatorname{ctg} \beta_1) \quad (9)$$

Эта формула более удобна для практических расчетов, т.к. константа очага деформации C_α не зависит от угла подачи, в отличие от константы процесса C в формулах (8) и (9). Соотношение (9) можно интерпретировать так, что каждый добавленный цикл уменьшает тангенс угла β_0 подъема траектории на входе в очаг деформации на величину $C+1$.

Коэффициент вытяжки в зависимости от количества циклов может быть определен по формуле

$$\mu(j) = (jC + 1)^{\frac{2}{3}} \quad (10)$$

Типичный графический вид установленных зависимостей представлен на рисунке 2. Теоретически и практически важным следствием из полученных является тот факт, что угол подъема траектории на поверхности исходной заготовки уменьшается с каждым следующим присоединяемым циклом. Характер этого уменьшения не связан с линейными размерами очага деформации, а определяется только исходными угловыми настройками процесса. При этом с увеличением угла подачи интенсивность падения угла подъема траектории в зависимости от числа циклов резко возрастает. При числе циклов более 8 (что соответствует меньше, чем трем оборотам) прокатка идет с углами меньше 5° практически вне зависимости от начального угла подачи.

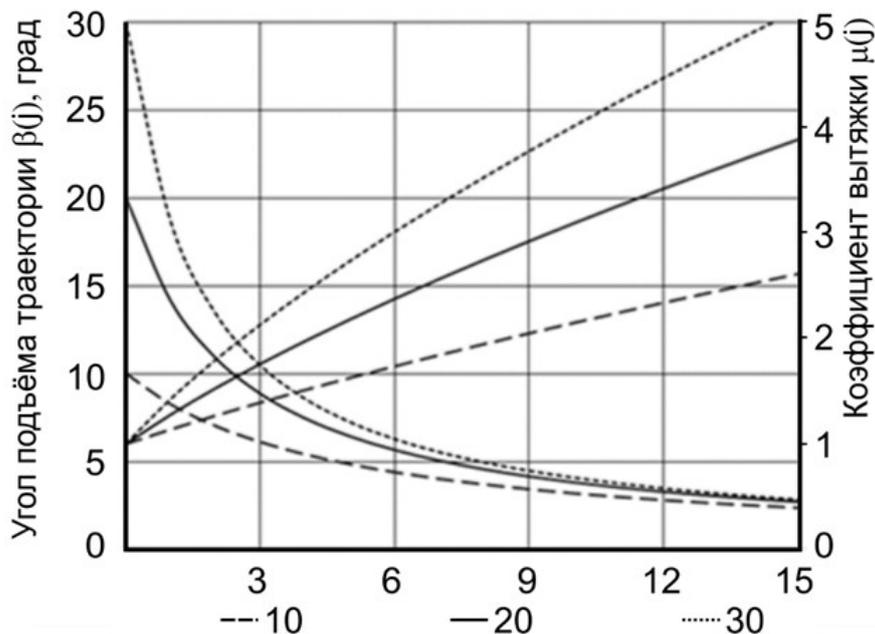


Рисунок 2 – Зависимость угла подъема траектории $\beta(j)$ и коэффициента вытяжки $\mu(j)$ от числа циклов j деформации при углах подачи в пережиге 10, 20 и 30 град (j отсчитывается против хода прокатки)

Из того следует, что эффект больших углов подачи (18-30°) локализуется на выходном отрезке обжимного участка протяженностью в 3-6 цикла от сечения пережиге или при коэффициентах вытяжки до 2,5 при углах подачи 20°.

Линейные размеры продольного профиля очагов деформации находятся через определение радиуса исходной заготовки по первому соотношению (5) при заданном числе циклов. Подставляя $N = 1, 2, \dots, j$ и разрешая относительно исходных радиусов r_0 , находим:

$$r_0(1) = r_1 \sqrt[3]{C+1}; r_0(2) = r_1 \sqrt[3]{2C+1} \text{ и } r_0(j) = r_1 \sqrt[3]{jC+1}. \quad (11)$$

Длина очага деформации в этих случаях определяется как высота усеченного конуса с известным углом конусности α , и известными радиусами оснований. Длина очага деформации составленного из j циклов будет равна

$$x(j) = \frac{r_1 \left(\sqrt[3]{jC+1} - 1 \right)}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (12)$$

Разность двух последовательных длин $x(j)$ и $x(j-1)$ представляет собой длину присоединяемого объема металла или шаг подачи в определенном j цикле деформации. В первом цикле шаг подачи $S(1)$ совпадает с длиной $x(1)$, а далее вычисляется по общей формуле

$$S(j) = x(j) - x(j-1) = \frac{r_1 \left(\sqrt[3]{jC+1} - \sqrt[3]{(j-1)C+1} \right)}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (13)$$

Таким образом получены выражения для расчета и построения очага деформации по заданному числу циклов. Очаг деформации рассчитывается по сечениям. Для каждого цикла определены радиус сечения в начале цикла и его расстояние от технологического пережиге или дистанция до начала предыдущего цикла.

Практическая реализация формоизменения металла в построенном очаге деформации складывается из непрерывной последовательности циклов, каждый из которых происходит по схеме представленной на рисунке 3.

Циклы хронологически индексируются $i = 1, 2, 3, \dots, j$, начиная от сечения входа металла в валки, т.е. индексы i и j отсчитываются в противоположных направлениях. Последний цикл $j=N$, пристроенный к очагу деформации на этапе проектирования, становится первым $i=1$ на этапе реализации процесса. Это необходимо для учета тангенциальной раскатки металла.

Внешний контур фактического очага деформации формируется как результат винтового движения прокатываемого металла в сужающемся, незамкнутом пространстве между валками. Деформирующее воздействие со стороны валков прикладывается локально, через три контактные поверхности, суммарная площадь которых составляет относительно меньшую часть общей площади поверхности очага деформации. Большая часть внешнего контура, располагающаяся в зазорах между валками, свободна от каких-либо контактных

усилий - деформирующих, направляющих и др.

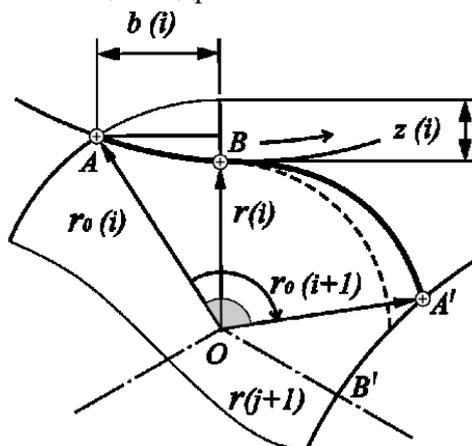


Рисунок 3 – Схема изменения радиуса очага деформации в произвольном цикле

Линия ABA' представляет собой проекцию траектории движения некоторой точки (\oplus) на плоскость поперечного сечения заготовки в пределах одного произвольного цикла деформации с индексом i . Заготовка вращается по часовой стрелке. Границы цикла определяются начальными точками A и A' двух последовательных дуг контакта заготовки с валками. Точка B соответствует кратчайшему расстоянию от оси прокатки до поверхности валков в данном цикле. В этой точке радиус траектории вычисляется по полученным выше формулам в зависимости от настройки валков и номера цикла. Угол $\angle AOA'$ поворота следящего радиус-вектора в одном цикле равен 120° , что соответствует повороту заготовки на $1/3$ оборота. За один полный оборот каждый элементарный объем металла проходит 3 цикла деформации (где 3 - число рабочих валков стана РСП).

Движение вектора-свидетеля и процесс формоизменения металла естественным образом структурированы на циклы деформации. В винтовой прокатке последовательность циклов непрерывна. Начало и конец произвольного цикла деформации устанавливаются двумя последовательными начальными точками дуг контакта заготовки с валками.

В произвольный момент времени прокатки радиус траектории (радиус внешнего контура очага деформации) составляет r_T , который в процессе циклической деформации пульсирующим образом изменяется от начального значения r_0 , равного радиусу исходной заготовки, до конечного r_k - радиуса получаемого прутка. На дуге контакта AB происходит обжатие металла валками и r_T уменьшается на величину частного обжатия

$$z(i) = r_0(i) - r(i). \quad (14)$$

После прохождения точки B , ближайшей к оси прокатки, радиус траектории несколько возрастает и концу очередного цикла (началу следующего) радиус траектории, достигает значения $r_0(i+1)$. Это обусловлено боковым вытеснением части обжимаемого металла в свободные межвалковые пространства. Данное явление относится к фундаментальным особенностям винтовой и радиально-сдвиговой прокатки. Его принято называть тангенциальной раскаткой.

Тангенциальная раскатка оказывает непосредственное влияние на:

- истинную (логарифмическую) степень деформации, уровень частных обжатий,

ширину и площадь контактной, поверхности энергосиловые параметры процесса, глубину проработки металла по сечению заготовки и другие деформационные параметры;

– скольжение металла относительно поверхности валков, стабильность процесса, характер износа и стойкость рабочего инструмента, качество поверхности получаемого проката;

– точность геометрических размеров и правильность профиля получаемого проката.

По физическому смыслу тангенциальная раскатка аналогична уширению при продольной прокатке.

Адекватная количественная оценка влияния тангенциальной раскатки на параметры исследуемого процесса выполнена по методике, с помощью коэффициента тангенциальной раскатки a , который измеряется экспериментально и теоретически лежит в пределах от 0 до 1 .

Радиусы очага деформации в точках траектории A , B и A' связаны соотношением

$$r_0(i+1) = r_0(i)^{1-a} \cdot r(i)^a, \quad (15)$$

При $a = 1$ тангенциальная раскатка отсутствует. Все радиальное обжатие смещается в осевом направлении и идет на увеличение шага подачи. В зазоре между валками радиус внешнего контура очага деформации остается постоянным, т.е. $r_0(i+1) = r(i)$. Такой случай и соответствующие ему параметры называют теоретическими.

Когда $a = 0$, тангенциальная раскатка максимальна, осевая деформация (вытяжка) отсутствует. Несмотря на радиальное обжатие на дуге контакта, в зазоре между валками радиус восстанавливается до первоначального значения, т.е. $r_0(i+1) = r_0(i)$.

В реальном процессе коэффициент a принимает промежуточное значение $0 < a < 1$, которое можно определить экспериментально по геометрии фактического очага деформации, фиксируемого недокатанной (остановленной в стане) заготовкой. Характерным режимам винтовой прокатки соответствует $a = 0,21 \dots 0,35$ в зависимости от свойств прокатываемого металла.

Данное выражение дает возможность проследить всю историю волнообразного изменения радиуса траектории от первого цикла, до конечного. Здесь нумерация циклов ведется по ходу прокатки. Начальный радиус перед первым циклом составляет

$$r_0(1) = r_0, \quad (16)$$

а в конце цикла, т.е. перед вторым

$$r_0(2) = r_0(1)^{1-a} \cdot r(1)^a. \quad (17)$$

Аналогично, имея набор радиусов кратчайших расстояний $r(0)$, $r(1)$, $r(2) \dots r(J)$ (см. формулы (11)), можно определить фактический радиус в начале цикла деформации с произвольным порядковым номером J , считая по ходу прокатки

$$r_0(J) = r(0)^{(1-a)^J} \dots r(k)^{a(1-a)^{J-k}} \dots r(J)^a \quad (18)$$

где $k = 0, 1 \dots J$.

Если принять, что схема формоизменения металла в отдельном цикле близка к осесимметричной, то истинная (логарифмическая) деформация в J -ом цикле будет равна:

$$\Lambda(J) = 2 \ln \left(\frac{r_0(J)}{r_1(J)} \right) \quad (19)$$

С учетом известной формулы для частоты вращения заготовки, время цикла деформации (поворота заготовки на $1/3$ оборота) составит:

$$t_u = \frac{20d_1}{D_B n_B \cos \beta_B} \quad (19)$$

и скорость деформации соответственно равна

$$H(j) = \frac{\Lambda(j)}{t_u} \quad (21)$$

На рисунках 4 и 5 представлены графики для зависимостей истинной степени деформации и скорости деформации от номера и числа циклов.

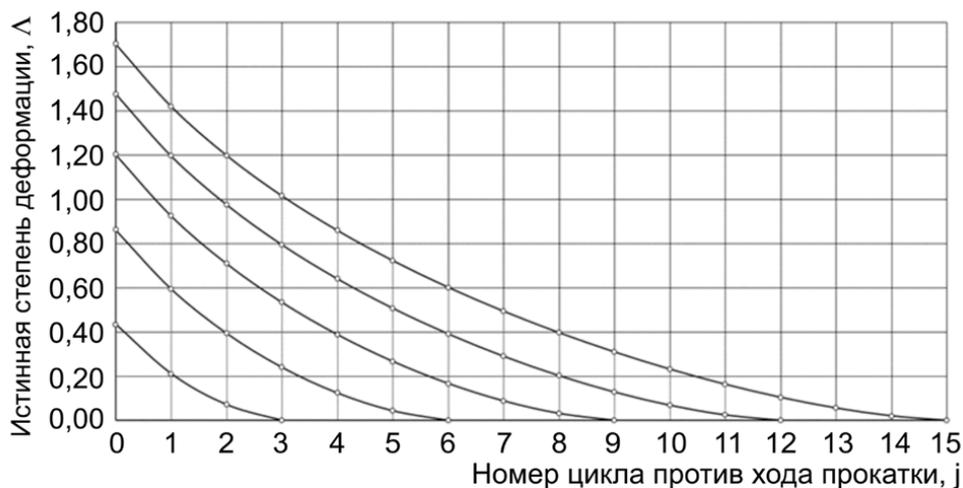


Рисунок 4 – Зависимость истинной деформации от номера цикла и числа циклов

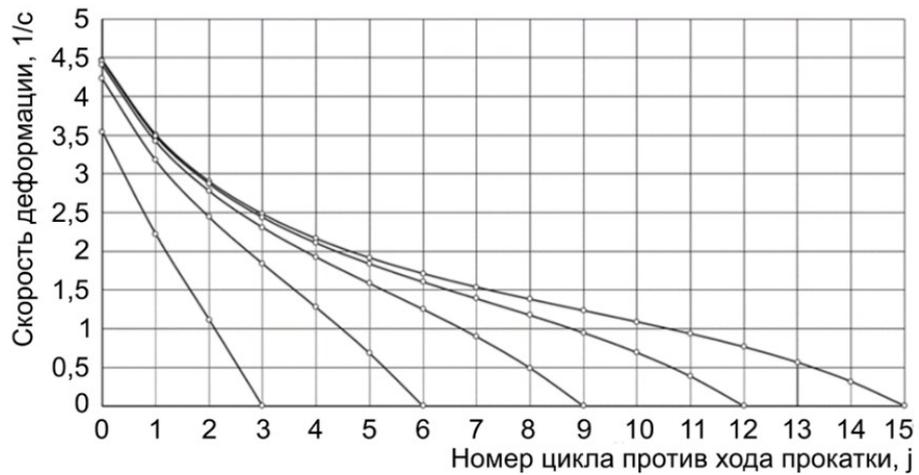


Рисунок 5 – Зависимость скорости деформации от номера цикла и числа циклов.

Аддитивное построение очага деформации позволяет получить его продольный профиль в виде функции $r(x)$. Для инструментального исполнения такого профиля требуется валки, калибровка которых обеспечивает контакт с телом вращения такого профиля, с учетом скрещивания их осей с осью прокатки.

Методика использует схему, представленную на рисунке 6а, где:

- Z рассматриваемое сечение заготовки радиусом r_p с центром в точке O ;
- B сечение вала радиусом R_p с центром в точке O_B , контактирующее в точке F с сечением заготовки Z ;
- Ol и CL оси прокатки (заготовки, очага деформации) и вала, соответственно;
- GG_B - общий перпендикуляр (эксцентриситет) длиной E к осям вала и прокатки, т.е. $\angle OGG_B = \angle CG_BG = 90^\circ$;
- OC - перпендикуляр к оси прокатки длиной P , пересекающий ось вала, т.е. $\angle COG = 90^\circ$. В станах барабанного типа OC лежит на оси барабана;
- β, δ, γ - соответственно, углы подачи, раскатки и скрещивания.

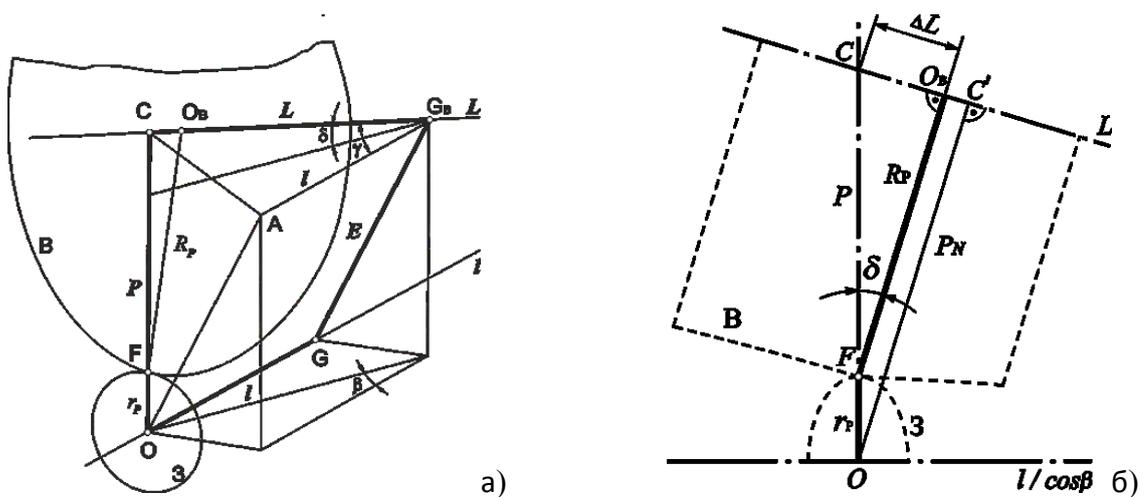


Рисунок 6 – Геометрическая схема процесса РСП

а) Схема взаимного расположения осей валка С1 и прокатки О1; б) Схема контакта заготовки и валка в технологическом пережиме

В описании используется ряд терминов и понятий, предложенных Ю.М. Мироновым и П.К. Тетериным. В частности:

- «технологический пережим» - сечение, перпендикулярное оси прокатки и содержащее ось разворота валков на угол подачи;

- «геометрический пережим» - сечение, перпендикулярное оси прокатки и содержащее общий перпендикуляр к осям валка и прокатки;

- «конструктивная схема» винтовой прокатки – это схема, в которой рабочее положение осей валков относительно оси прокатки задано углами подачи β и раскатки δ , а также расстоянием P между осями валков и прокатки в технологическом пережиме;

- «общая схема» винтовой прокатки – это схема, в которой положение валков определяется углом скрещивания γ осей валков и прокатки, кратчайшим расстоянием E (эксцентриситетом) между ними (осями) и расстоянием l по оси прокатки от контрольного сечения до геометрического пережима.

Рассматриваем стан барабанного типа (рисунок 6б). Настройкой валков заданы углы подачи β , раскатки δ , радиусы валка R_P и заготовки r_P .

В сечении пережима справедливо соотношение

$$\frac{r_P}{P} + \frac{R_P}{P_N} = 1 \quad \text{и} \quad \cos \delta = \frac{P_N}{P} \quad (20)$$

а расстояние $\Delta L_R = CO_B$ от оси барабана до центра сечения валка составляет

$$\Delta L_R = R_P \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (23)$$

Переход от конструктивной схемы к общей (прямой переход) выполняется соотношениями для инвариантных величин γ и E

$$\cos \gamma = \cos \beta \cdot \cos \delta \quad \text{и} \quad E = P \frac{\sin \beta \cdot \cos \delta}{\sin \gamma}, \quad (21)$$

И для переменных величин L и l

$$L = P \frac{\sin \delta}{\sin^2 \gamma} \quad \text{и (или)} \quad l = P \frac{\sin \delta \cdot \operatorname{tg} \gamma}{\sin \gamma} \quad (25)$$

Константы положения γ и E , не только сами не изменятся вдоль оси прокатки, но и позволяют построить весьма информативный инвариант G взаимного расположения осей, который объединяет анализируемые схемы в единый геометрический объект. Рассматривая совместно уравнения (21) легко видеть, что

$$G = E \operatorname{tg} \gamma = P \operatorname{tg} \beta = \operatorname{const} \quad (26)$$

Инвариант G прямо связывает углы подачи, а через формулы (21) и углы раскатки, с факторами общей схемы γ и E и расстоянием P между осями валков и прокатки в рассматриваемом сечении.

Расчет профиля валка, соответствующего построенному очагу деформации, производится по сечениям с применением известных геометрических соотношений для рисунка 6. С тем отличаем, что в качестве конечного аргумента, определяющего положение сечений очага деформации на его оси прокатки, используется порядковый номер цикла, отсчитываемый от сечения технологического пережима против направления.

Сечение начала j -го имеет радиус $r(j)$ и расстояние до технологического пережима $x(j)$. Удаление от геометрического пережима составляет

$$l(j) = x(j) + l = \frac{r_1 (\sqrt[3]{jC+1} - 1)}{\operatorname{tg} \alpha} + P \frac{\sin \delta \cdot \operatorname{tg} \gamma}{\sin \gamma} \quad (27)$$

Перпендикуляр к оси прокатки, проведённый в рассматриваемом сечении до пресечения с осью валка, имеет длину

$$P(j) = \sqrt{[l(j) \cdot \operatorname{tg} \gamma]^2 + E^2} \quad (28)$$

Для фактического угла раскатки справедливо равенство

$$\cos \delta(j) = \frac{\sqrt{[l(j) \cdot \sin \gamma]^2 + E^2}}{P(j)} \quad (29)$$

Полученные текущие значения $P(j)$, $\cos \delta(j)$ можно рассматривать как параметры некоторого виртуального пережима, для которого справедлива схема на рисунке 6б и формула (20) реального технологического пережима.

Из этого следует формула для расчета искомого радиуса сечения валка, находящегося в контакте j -м сечением очага деформации

$$R(j) = \cos \delta(j) [P(j) - r(j)] \quad (30)$$

Положение этого сечения на оси валка определяется с помощью расстояний до геометрического и технологического пережимов по схеме на рисунке 6.

Фактический угол подачи для этого сечения валка легко находится через геометрический инвариант G

$$\operatorname{tg} \beta(j) = \frac{G}{P(j)} \quad (31)$$

Таким образом получена исчерпывающая последовательность формул, позволяющая определить геометрические параметры сечения валка для каждого сечения очага деформации, заданного номером цикла j (здесь индекс j отсчитывается от конечного состояния против хода прокатки)

При необходимости вычисляются могут быть вычислены и другие величины, характеризующие формоизменение металла, как в отдельных циклах, так и для очага деформации в целом.

На рисунке 7 показаны этапы аддитивного построения деформационно-геометрической модели, содержащего 15 циклов или 5 оборотов заготовки, и соответствующей калибровки валков.

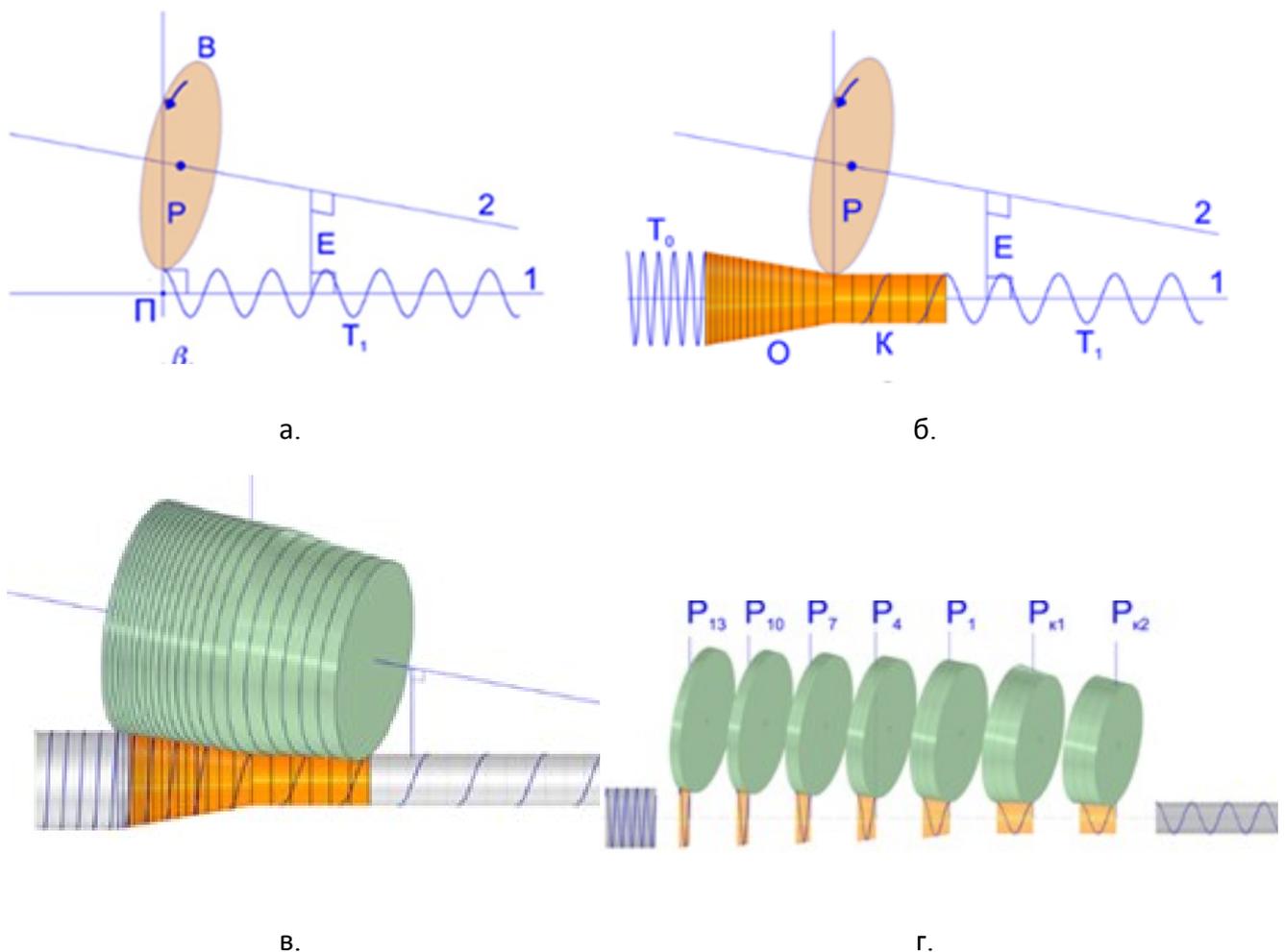


Рисунок 7 – Этапы аддитивного построения деформационно-геометрической модели: а.- определение взаимного положения осей прокатки 1 и валков 2 по параметрам технологического пережима; б.- аддитивное составление очага деформации из 15 циклов на обжимном участке и 6 циклов на калибрующем; в - аддитивное построение валков из дисков, соответственно очагу с присоединением фрагментов исходной заготовки и получаемого проката; г.-

элементы составного очага деформации и валков, соответствующие одному обороту заготовки.

В третьей главе представлены результаты моделирования процесса РСП и сочетание РСП и РК.

Моделирование процесса РСП в программе Qform V9 осуществлялось при угле раскатки $\delta = 10^\circ$, угле подачи валков $\beta_1 = 10^\circ$; $\beta_2 = 15^\circ$; $\beta_3 = 20^\circ$; $\beta_4 = 25^\circ$ и скорости вращения валков $n = 60$ об/мин. Температура инструмента принята постоянной и равной 70°C , а температура заготовки перед РСП составляет $T_1 = 930^\circ\text{C}$, $T_2 = 1000^\circ\text{C}$ и $T_3 = 1070^\circ\text{C}$. Процесс РСП диаметром 80 мм и длиной 300 мм осуществляется до диаметра 70 мм; 60 мм; 50 мм и 40 мм, соответственно коэффициенты вытяжки за проход $\mu_1 = 1,31$; $\mu_2 = 1,78$; $\mu_3 = 2,56$ и $\mu_4 = 4$.

Для определения реологических свойств сверхупругого сплава Ti-18Zr-14Nb был проведен эксперимент по осадке образцов диаметром 5мм высотой 10мм на испытательном комплексе горячей деформации WUMSI. Испытания проводились при температурах 600, 700, 800, 900 и 1000⁰С при скоростях деформации 10; 1; 0,1 с⁻¹. Результаты испытаний представлены на рисунке 8. Эти данные экспортированы в Qform для сравнительного моделирования с серийным сплавом ВТ6.

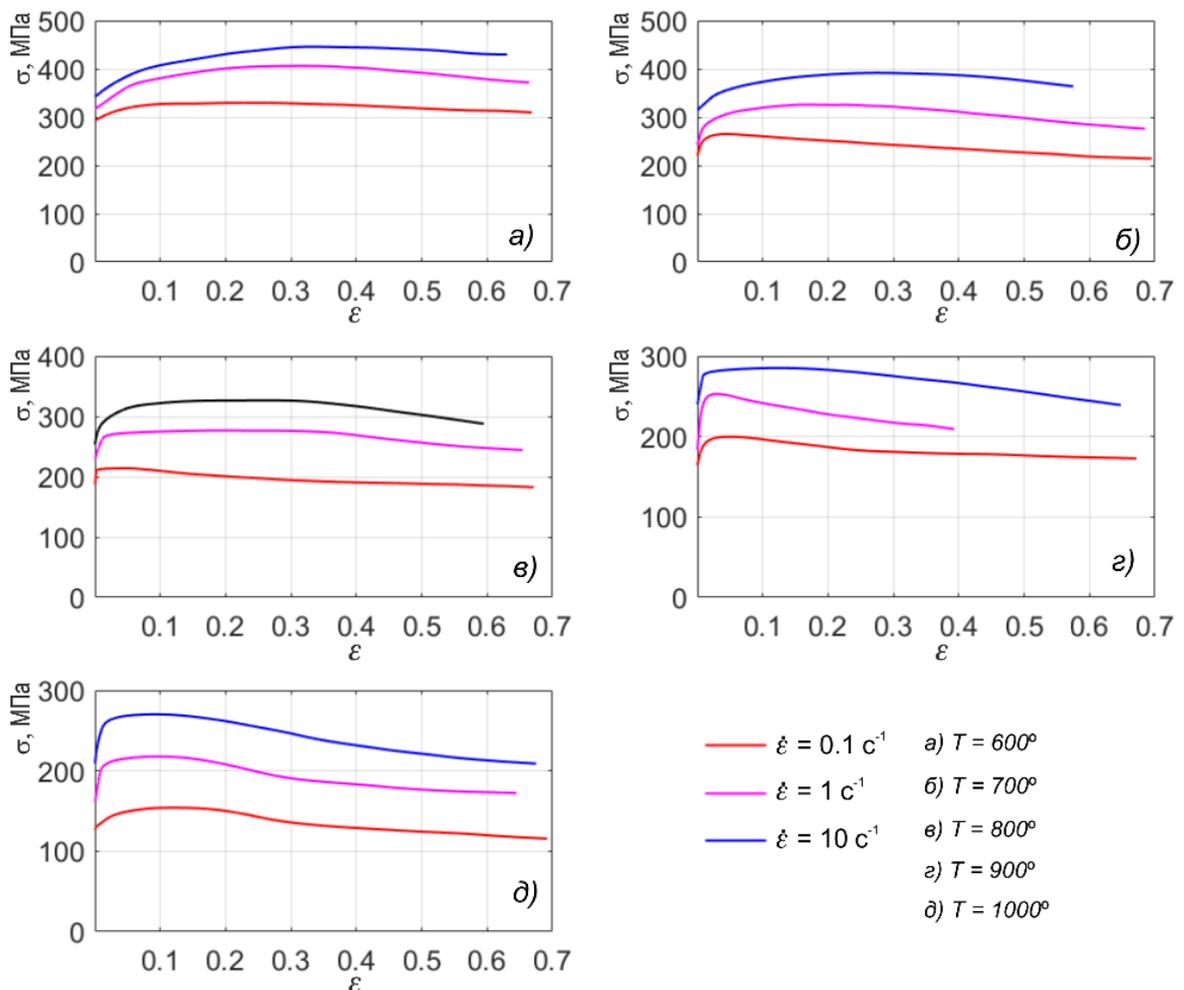


Рисунок 8 – Экспериментальные зависимости (кривые течения) сопротивления деформации сверхупругого сплава Ti-18Zr-14Nb от температуры, степени и скорости деформации.

Установлено, что кривые течения имеют выраженный максимум в начальной стадии деформирования при температурах 900^0 - 1000^0 . При более низких температурах 600 - 800^0 максимум практически отсутствует. Реологические свойства сплава ВТ6 выбраны из встроенной библиотеки материалов Qform.

Анализ результатов из моделирования процесса РСП

Накопленная деформация

Как видно из рисунка 9, с увеличением коэффициента вытяжки разница повышается. При температуре $T_l = 930$ °С, различие в степени деформации на поверхности и в осевой зоне с углом подачи $\beta_l = 10^\circ$ составляет 3,34, а углы подачи $\beta = 15^\circ; 20^\circ; 25^\circ$ составляют 5,04; 6,91 и 8,38. Однако при увеличении углов подачи разница уменьшается. При обработке с большим углом подачи однородность степени пластической деформации увеличивается, особенно при выше температуре эта разница незначительно зависит от коэффициента вытяжки.

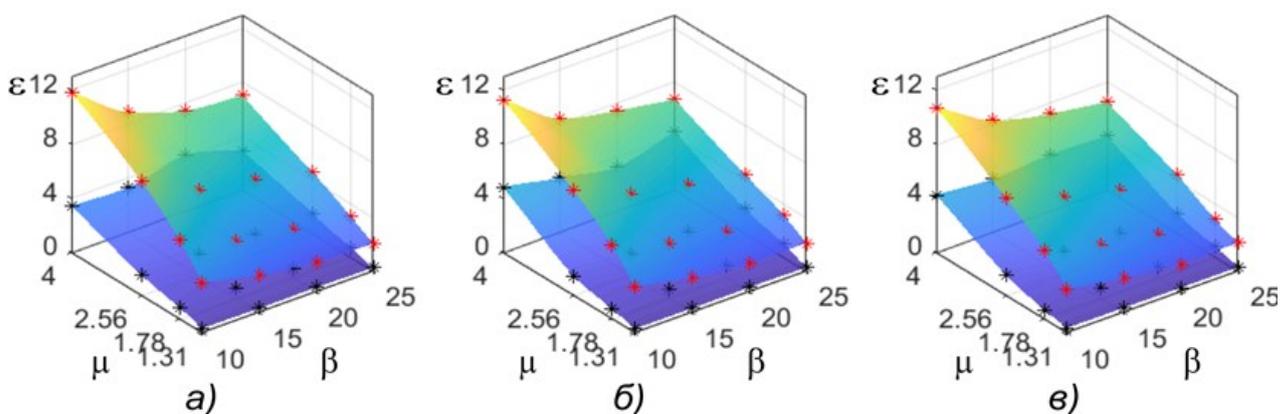


Рисунок 9 – График зависимости накопленной деформации при РСП сплава ВТ6

а) $T_l = 930$ °С; б) $T_l = 1000$ °С; в) $T_l = 1070$ °С

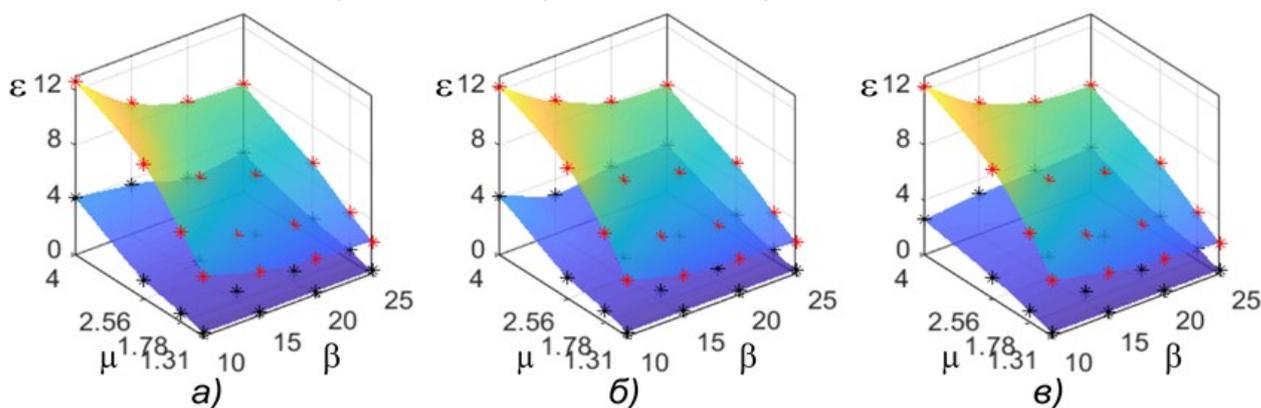


Рисунок 10 – График зависимости накопленной деформации при РСП сплава TiZn

а) $T_l = 930$ °С; б) $T_l = 1000$ °С; в) $T_l = 1070$ °С

Поверхности в графике на рисунке 10 соответствует максимальной и минимальной деформации для сплава Ti-18Zr-14Nb. В общем, они похожи на сплав ВТ6. Однако это сплав

отличается от сплава ВТ6 тем, что имеет большую накопленную деформацию. Кроме того, разница между максимальным и минимальным значениями значительно зависит не только от углов подачи, но и от коэффициента вытяжки. При углах подачи $\beta_1 = 10^\circ$ и коэффициенте вытяжки $\mu_4 = 4$ максимальные значения деформации составляют 12,6 (T_1); 12,24 (T_2) и 12,29 (T_3), а для сплава ВТ6 они имеют значение при аналогичных параметрах в диапазоне от 10,69 до 11,82. Абсолютная разница максимальной и минимальных значений степени деформации как для сплава ВТ6, так и для сплава TZN из валков одинакова – $\Delta\varepsilon = 6,45 \div 8,38$ и $\Delta\varepsilon = 8,44 \div 9,71$. В других случаях параметров (T , μ , β) различие значения на поверхности и осевой зоне сплава TZN более по сравнению с сплавом ВТ6.

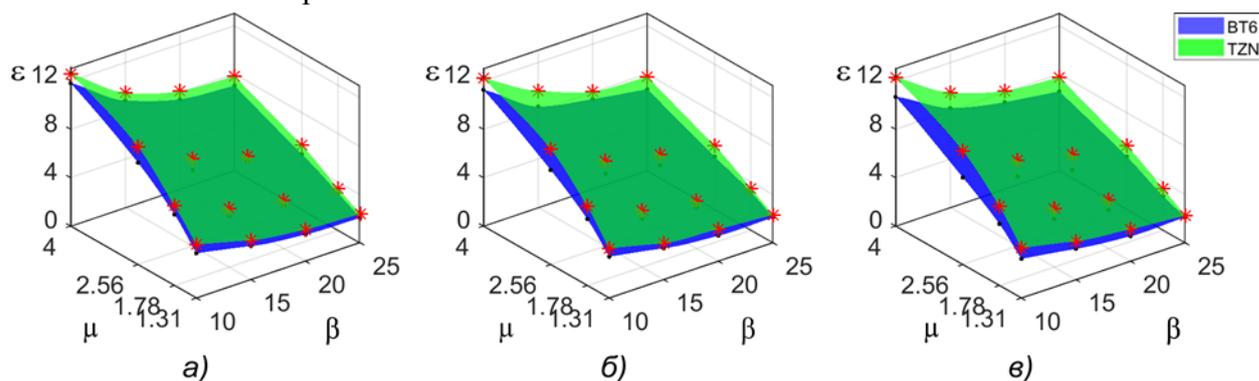


Рисунок 11 – Максимальное значение по поперечному сечению для сплава ВТ6 и TZN при температуре а) 930 °С; б) 1000 °С; в) 1070 °С

Уровень сжимающих напряжений

Видно, что при увеличении значения угла подачи эффективность процесса повышается т.е. возрастает технологическая пластичность. Аналогичный характер имеет эта тенденция при увеличении коэффициента вытяжки. Известно, что при увеличении углы подачи и коэффициента вытяжки про привести к значительным усилиям, моментами и мощностями, действующими непосредственно на валки. Поэтому влияние μ и β на критическое обжатие изучено достаточно для каждого материала с другими параметрами (рисунок 12).

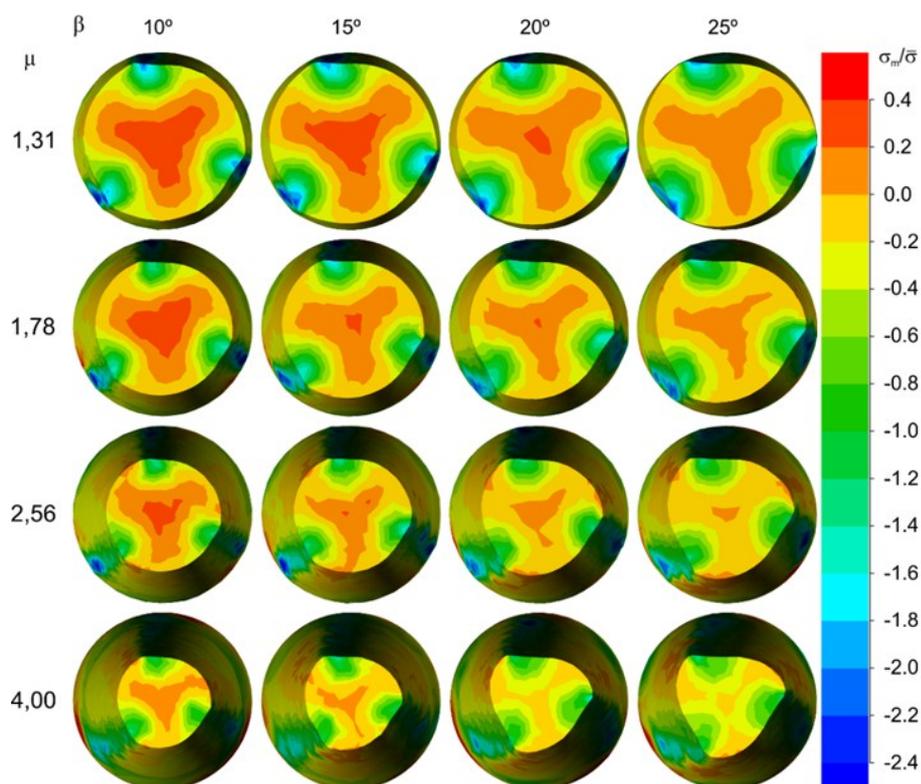


Рисунок 12 – Распределение η по поперечному сечению процесса РСП сплава ВТ6 при температуре 930 °С

Утяжки

Целью исследования было определение влияния угла подачи, коэффициента вытяжки и температуры заготовки на формоизменение его при РСП. По данным моделирования были построены графики зависимости глубины утяжины от параметров μ , β , T на рисунке 13. Из этих рисунок видно, что при увеличении коэффициента вытяжки глубина утяжины u . С другой стороны, с увеличением угла подачи утяжка уменьшается. Глубина утяжины составляет 60 мм и выше при $\beta = 10^\circ$, $\mu = 4$ обоих сплавов и во всех исследованных температурах, в то время как утяжка составляет около 10 мм при $\beta = 25^\circ$, $\mu = 1,31$. Различия в утяжке заготовки между $\beta = 10^\circ$ и $\beta = 25^\circ$ составляют 5 мм, 6 мм, 10 мм и 15 мм, соответственно $\mu = 1,31$; 1,78; 2,56 и 4. Это означает, что при большем коэффициенте вытяжки μ уровень уменьшения глубины утяжины происходит быстрее, чем изменения в малом значении. Кроме того, значения глубины утяжины для сплава TZN выше по сравнению с утяжкой заготовки для ВТ6.

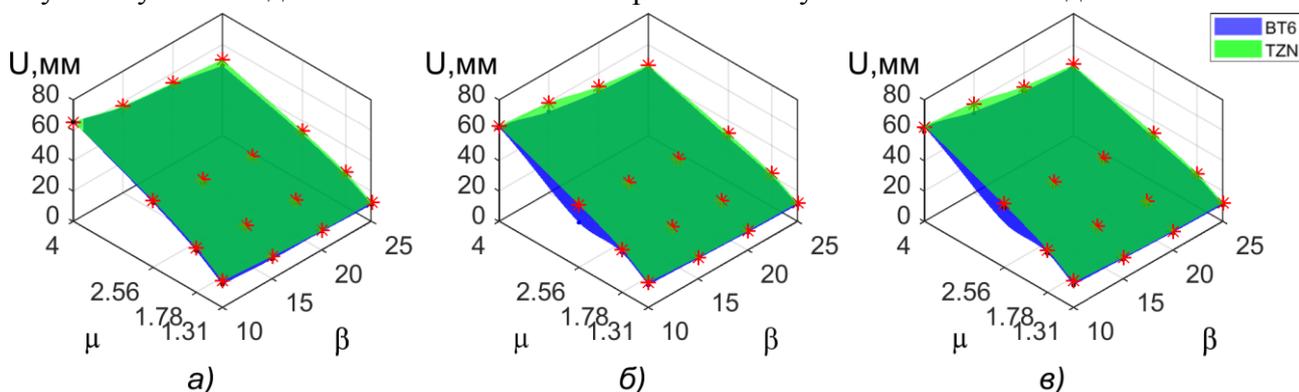


Рисунок 13 – График зависимости глубины утяжины при РСП сплавов ВТ6 и TZN
а) $T_I = 930$ °С; б) $T_I = 1000$ °С; в) $T_I = 1070$ °С

Моделирование процесса сочетания РСП и РК

Процесс моделирования включает в себя два основных этапа. На первом этапе, обозначенном РСП1, заготовка прокатывается с диаметра 15 (длина - 60 мм) до диаметра 12 мм на стане радиально-сдвиговой прокатки «10-30» (МИСиС) при температуре 900 °С. Второй этап содержит три операции ротационной ковки при температуре 800 °С. Последовательность обработки следующая: первая операция (обозначаемая РК1) уменьшает диаметр с 12 мм до 11 мм, вторая операция (РК2) также уменьшает диаметр с 11 мм до 10 мм, а последняя операция (РК3) формирует прутки диаметром 8 мм. Для сравнения была смоделирована другая схема обработки заготовки диаметром 12 мм до прутка диаметром 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 при РСП составляла 90 об/мин. Диаметр валков – 57мм. Угол скрещивания осей валков и прокатки 20°. Тангенциальное смещение оси валка от оси прокатки 30 мм.

Основные параметры процессов включают процесс РК: время между ударами соответственно равно 0,029 с. Подача между ударами равна за время между ударами 0,95 мм. Угол поворота бойков (8 роликов) 45 градусов. Скорость движения бойка 0,667 м/с. Титановый сплав ВТ6 был выбран из библиотеки в программе Qform 9. Сопrotивление деформации сплава TZN был взят из эксперимента. Фактор трения был задан равным 1 и 0,3 для РСП и РК, соответственно.

Анализ результатов из моделирования сочетания РСП и РК

Пластическая деформация на сечении заготовки

На рисунке 14 и 15 также видно, что в диапазоне радиусов от 0 мм до 3 мм градиент трех кривых заметно отличается. Очевидно, что наклон сплошной линии, соответствующий процессу РК, немного выше, чем пунктирная линия. Кроме того, эти сплошные линии сохраняют устойчивость склона, что означает, что распределение пластических деформаций является более однородным. Численные результаты, сравниваемые между этими операциями в центральной точке показали, что значение пластической деформации составляет 0,58 для процесса РСП1 при уменьшении диаметра на 3 мм, в то время как оно составляет 0,9 и 1,2 для РК1 и РК2, соответственно, при уменьшении на 1 мм в диаметре. Видно, что увеличение пластической деформации в центре при ротационной ковке выше, чем при радиально-сдвиговой прокатке.

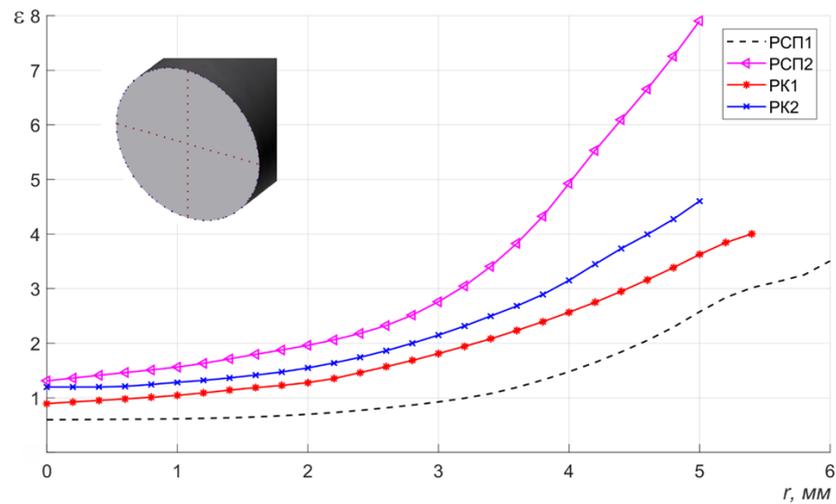


Рисунок 14 – Зависимость пластической деформации от радиуса заготовки при различных схемах деформирования для сплава ВТ6

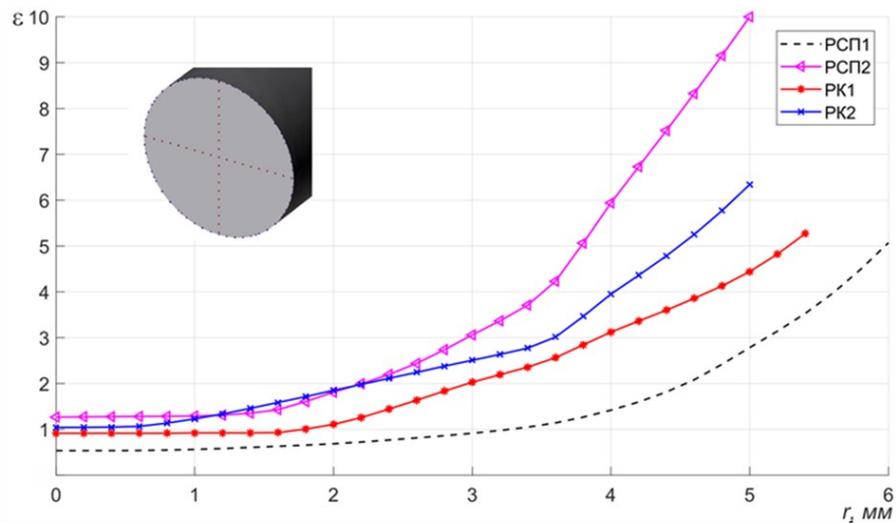


Рисунок 15 – Зависимость пластической деформации от радиуса заготовки при различных схемах деформирования для сплава TiZrNb

Провести анализ скорости деформации

Графики процента площади скорости деформации по поперечному сечению показаны на рисунке 16.

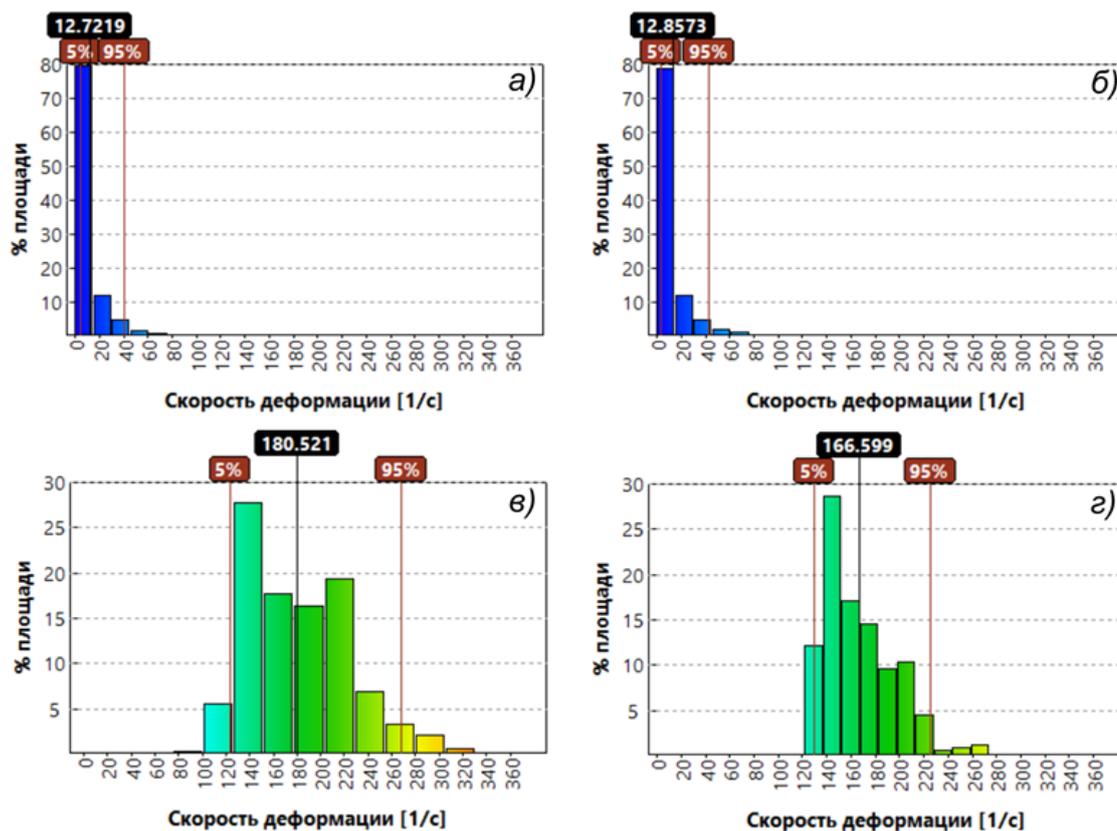


Рисунок 16 – График процента площади скорости деформации на сечении

а) процесс РСП1- ВТ6; б) процесс РСП1- TZN в) процесс РК1- ВТ6;
г) процесс РК1- TZN

Видно, что распределение скорости деформации обладает большим различием по сечению в процессе РСП. В этом случае скорость деформации меньше 10 с^{-1} достигает 80 % по площади для оба сплава ВТ6 и TZN. В противном случае наблюдается маленькое количество процента с значение высокой скорости деформации ($70 - 80 \text{ с}^{-1}$), составляющих $\approx 1\%$. Процесс РК отличается от РСП тем, что скорость деформации распределяется равномерно по сечению. Кроме того, минимальное значение скорости деформации свыше 80 с^{-1} для ВТ6 и свыше 120 с^{-1} для сплава TZN.

Среднее напряжение и интенсивность напряжений

Распределение среднего напряжения показано на рисунке 17, где напряжение, в том числе с положительными и отрицательными значениями, возникает в процессе РСП (а, б), а поле напряжения представляет собой полное сжатие в ковальной заготовке (в, г). Наблюдается, что напряжение представляет собой сжатие, минимум равен -430 МПа в зоне контакта между заготовкой и валком в ходе процесса РСП, при этом растягивающее напряжение наблюдалось в центральной зоне, равное 30 МПа . Напротив, среднее распределение напряжений в объеме послековки является полностью отрицательным в диапазоне от -70 МПа до -550 МПа .

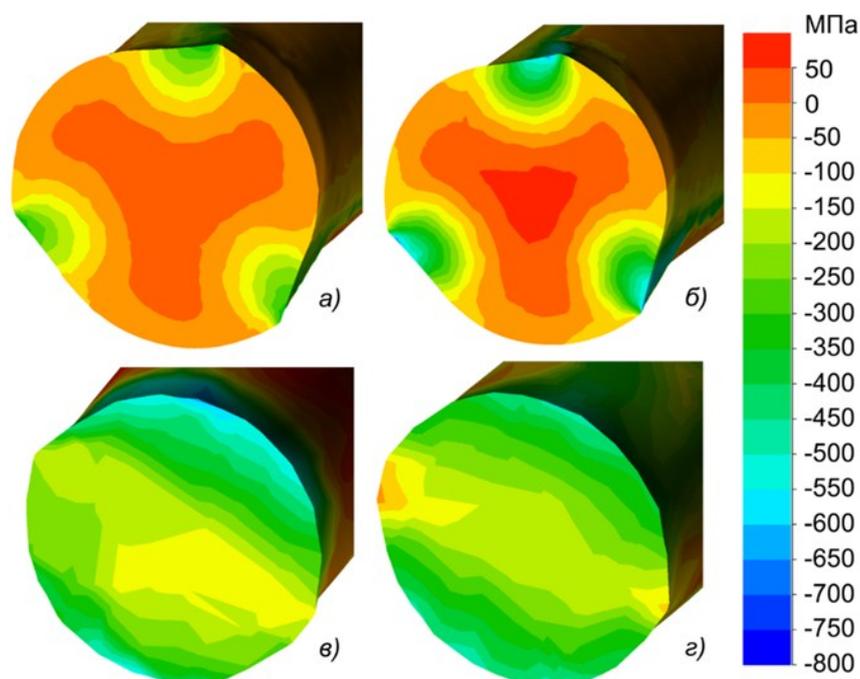


Рисунок 17 – Среднее напряжение по сечению в очаге деформации
 а) процесс РСП1- ВТ6; б) процесс РСП1- TZN в) процесс РК1- ВТ6;
 г) процесс РК1- TZN

Прогноз изменения структуры на Qform

Прогноз структуры осуществляется модулем эволюции микроструктуры на Qform 9. В моделировании марка ВТ6 была выбрана из библиотеки материалов с моделью изменением микроструктуры Джонсона-Мейла-Аврами-Колмогорова (ЖМАК). Средний размер зерна составляет 100 мкм в объеме заготовки. Результаты изменения эволюции микроструктуры показал на рисунке 18.

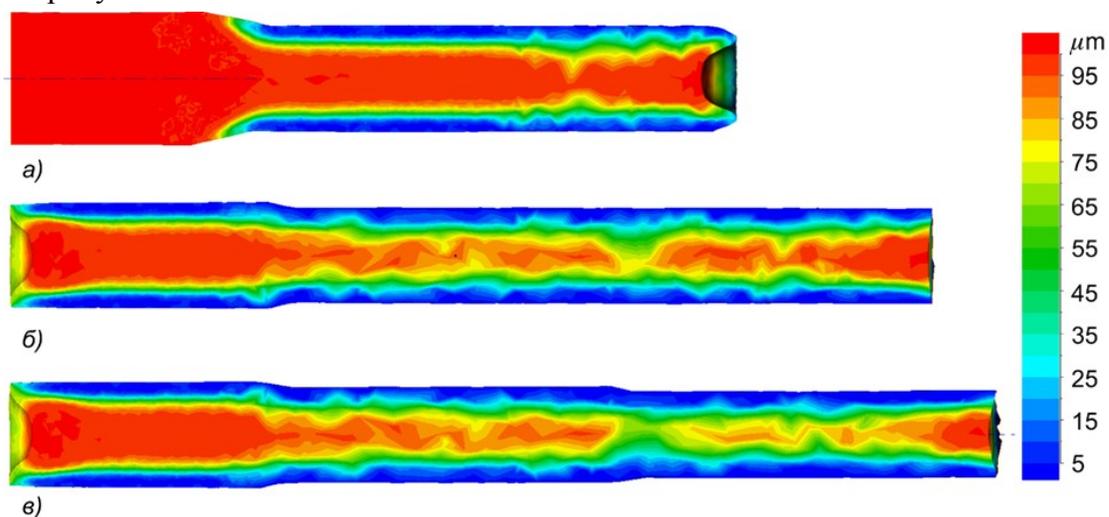


Рисунок 18 – Средний размер зерна по продольному сечению
 а) Процесс РСП1; б) процесс РК1; в) процесс РК2

Видно, что после процесса РСП1 в осевой зоне заготовки незначительно изменяется средний размер зерна, составляющий 95-100 мкм в пределах $0,4r$ (r – радиус полученной заготовки). В периферийный слоях размер зерна резко понижается. С следующими процессами (РК1 и РК2) микроструктура повышается по направлению снижения неоднородности.

В **четвертой главе** выполнено экспериментальное исследование сочетания процесса РСП и РК из сплава TiZrNb. Зёрненная структура и механическое свойство образцов были проведены.

Слиток сплава Ti-18Zr-14Nb (в ат. %) (TZN) диаметром 50 мм, длиной 660 мм и массой около 10 кг был выплавлен методом вакуумной индукционной плавки Flowserve Corporation (США). Полученный слиток подвергался горячему изостатическому прессованию при температуре 900°C и давлении 100 МПа в течение 2 часов. После обработки в газостате, слиток охлаждался на воздухе. Далее производилась обточка слитка до диаметра 44,9 мм и отбирались контрольные пробы на образцы для исследования структуры и свойств.

Радиально-сдвиговая прокатка слитков диаметром 44,9 мм на пруток диаметром 12 мм производилась в условиях научно-производственного центра кафедры ОМД НИТУ «МИСиС» на мини-станках 14-40 и 10-30.

Далее полученные прутки подвергались ротационной ковке на окончательный размер. Пруток-заготовка диаметром 12,6 мм нагревался в проходной электропечи сопротивления до температуры 800 °С в течение 25 минут. Ротационная ковка производилась на машине РКМ-2 до прутка 7,2 мм за 5 переходов. После каждого перехода пруток помещался в печь с температурой 800 °С для замены бойков под очередное обжатие.

Анализ микроструктуры заготовки

Результаты расчета размера структурных элементов представлены на рисунке 19. Структура исходной заготовки представляет собой смесь равноосных рекристаллизованных зерен размером ($d = 42$ мкм) внутри областей размером 100–250 мкм, обрамленных утолщенными границами на рисунке 19а).

РСП1 приводит к существенному изменению зеренной структуры (рисунок 19б). На периферии поперечного сечения заготовки структура представляет собой смесь мелких (менее 15 мкм) рекристаллизованных зерен и более крупных зерен, в которых, судя по тому, как выявлена их структура в результате травления (фигуры растрыва, соответствующие дефектам решетки, в т.ч. малоугловым границам), протекает процесс динамической полигонизации. Ранее было показано, что в структуре сплава Ti-18Zr-14Nb в результате РСП формируются субзерна размером 1–2 мкм вследствие динамической полигонизации. При движении от края к центру заготовки по сечению средний размер зерна увеличивается с 35 мкм до 85 мкм (рисунок 20I). Такое изменение размера структурных элементов по сечению заготовки обусловлено существенным различием степени деформации на периферии и в центре заготовки при РСП. Предполагается, что процесс динамической рекристаллизации (на краю сечения) сменяется процессом динамической полигонизации (ближе к центру сечения) в соответствии с изменением условий деформации.

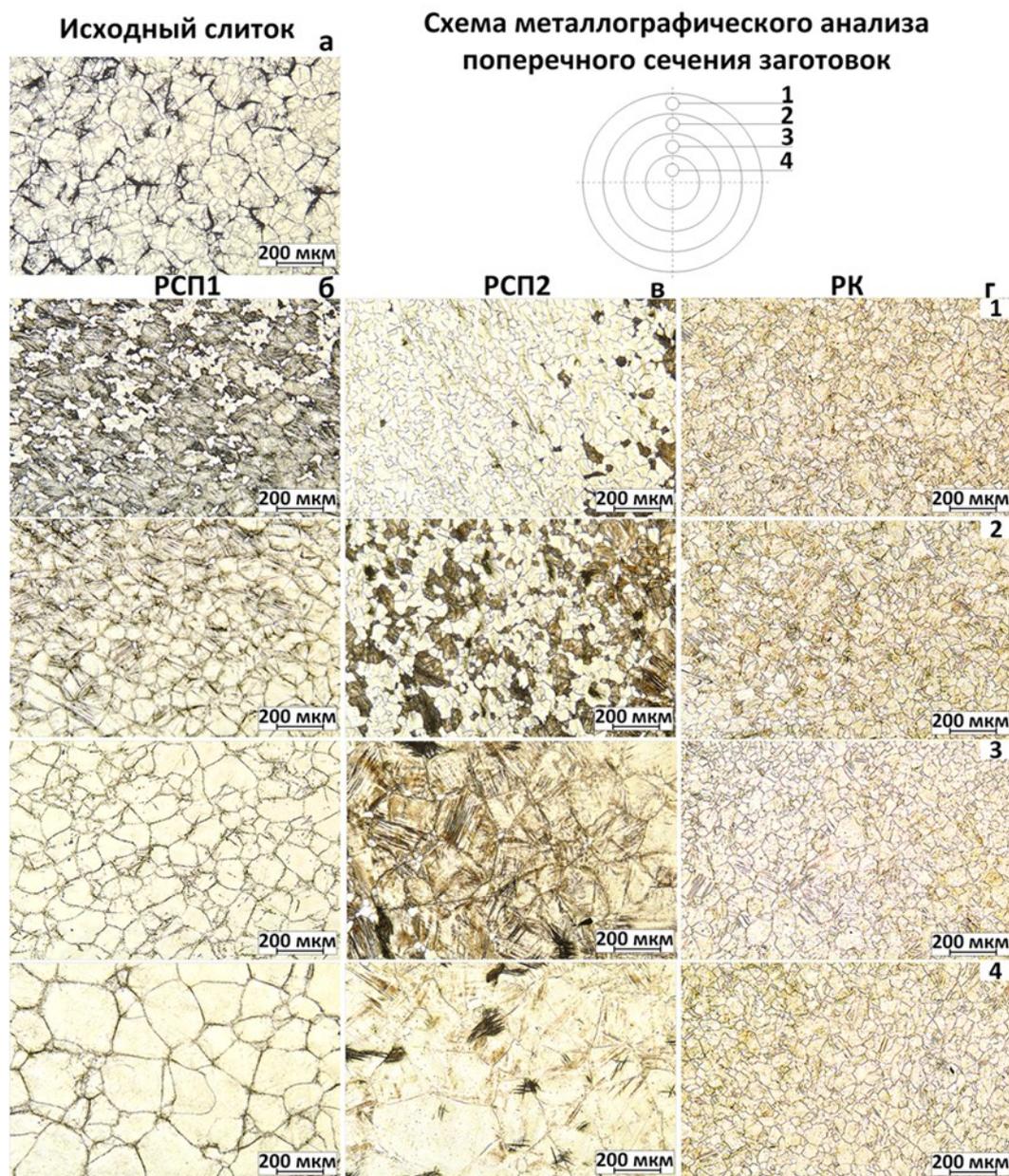


Рисунок 19 – Микроструктура заготовок в исходном состоянии (а), после РСП1 (б), РСП2 (в) и РК (г) от периферийной к центральной части поперечного сечения заготовок (1–4)

Схожий характер неоднородности проявляет структура после РСП2. В отличие от РСП1, на периферии сечения заготовки после РСП2 значительно больше мелких рекристаллизованных зерен, их можно наблюдать и в зоне 2 (рисунок 19в2). Стоит особо отметить гораздо более значительное изменение размера зерна по сечению от 25 до 125 мкм. Это объясняется различными условиями деформации: значительно более высокими значениями степени и скорости деформации в проходе. Изучение микроструктуры показало, что последующая РК приводит к выравниванию размера зерна (около 40 мкм) по сечению заготовки (рисунок 19г). Такой эффект достигается благодаря другим в отличие от РСП условиям деформации в ходе РК, при которых центральная часть заготовки подвергается большим локальным деформациям.

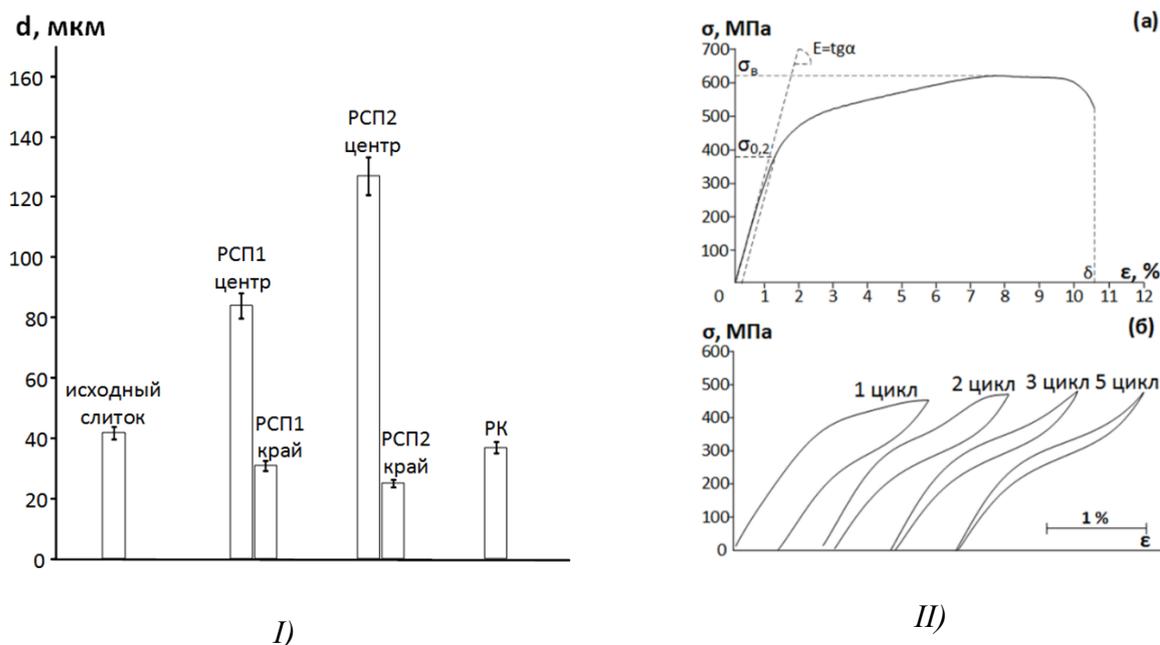


Рисунок 20 – I) Средний размер зерна по сечению заготовки в исходном состоянии, после РСП1, РСП2 и РК; II) Диаграмма деформации растяжением до разрушения (а) и диаграммы деформации-разгрузки, полученные в результате сверхупругого механоциклирования (б) заготовки после РК

Диаграмма деформации, полученная в результате испытания на растяжение образца после РК, представлена на рисунке 20-II. По полученной диаграмме, определяли предел текучести ($\sigma_{0,2}$), предел прочности (σ_b), модуль Юнга (E) и относительное удлинение до разрушения (δ). Сплав после РК проявляет достаточно высокие прочностные характеристики: предел текучести $\sigma_{0,2}=381$ МПа и предел прочности $\sigma_b=618$ МПа. Материал демонстрирует низкое значение модуля Юнга (39 ГПа), близкое к такой характеристике у плотной костной ткани (9-32 ГПа). Такое сочетание механических свойств определяет высокий потенциал применения материала для изготовления костных материалов.

Для оценки особенностей сверхупругого поведения образец после РК подвергли механоциклированию по схеме «деформация растяжением на 2 % – разгрузка» (5 циклов) при комнатной температуре. На рисунке 20-II, б представлены диаграммы деформации-разгрузки по циклам. В первом цикле наблюдается несовершенное сверхупругое поведение, о чем можно судить по незамкнутой сверхупругой петле. По мере увеличения количества циклов сверхупругое поведение сплавов совершенствуется, и уже в 5-ом цикле сплав демонстрирует сверхупругую петлю, близкую к идеальной, с минимальной остаточной деформацией (рисунок 20-II, б).

ВЫВОДЫ

1. Выполнено развитие траекторно-скоростного метода анализа процесса РСП, с учетом цикличности процесса и с применением констант очага деформации. Выявлены наиболее общие закономерности конечного изменения внутренней геометрии винтовых траекторий и скоростей движения частиц металла, сопровождающего пластическое формоизменение заготовки в процессе РСП. С увеличением числа циклов угол подъема траектории на входе в валки уменьшается. При этом, чем больше угол подачи, тем круче падение угла подъема траектории; при 15 циклах угол подъема составляет 2,5-3,5 град. практически независимо от угла подачи (10, 20 и 30 град.); прокатка с количеством циклов больше 6, снижает угол подъема на входе до уровня меньше 10 град. (это не желательные условия для сплошных заготовок).
2. Проведено экспериментальное исследование реологических свойств сверхупругого сплава системы Ti-Zr-Nb в условиях горячей деформации сжатия. Установлено, что зависимости сопротивления деформации от степени деформации имеют максимум в начальной стадии деформирования при температурах 900° - 1000° , при более низких температурах 600° - 800° максимум практически отсутствует. Данные экспортированы в программный комплекс Qform для конечно-элементного моделирования в сравнении с серийным сплавом ВТ6.
3. Сравнительное компьютерное моделирование процесса РСП сплава системы Ti-Zr-Nb и серийного сплава ВТ6 с помощью Qform показало, что новый сплав проявляет более высокую склонность к развитию неравномерности деформации по сечению заготовки, что связано с особенностями реологического поведения и обуславливает необходимость сочетания РСП и РК при обработке.
4. Результаты моделирования сочетания РСП и РК показывают, что по сравнению с РСП, преимущества комбинированного процесса РСП и РК заключаются в более равномерном распределении пластической деформации и скорости деформации, что ожидаемо приводит к улучшению структурного состояния и механических свойств.
5. Разработан и реализован в опытно-промышленных условиях процесс получения прутков мелких сечений из сверхупругого сплава системы Ti-Zr-Nb, включающий радиально-сдвиговую прокатку слитка диаметром 45 мм на министанах 14-40 и 10-30 с получением промежуточной заготовки диаметром 12 мм и её последующую ротационную ковку за несколько переходов на пруток диаметром 3-8 мм и длиной более 2 метров.
6. Экспериментально доказано, что высокотемпературная термомеханическая обработка с применением сочетания РСП и РК обеспечивает глубокую проработку структуры с однородным по сечению готового прутка размером зерна и позволяет получать прутки диаметром 3-8 мм длиной более 2 м с размером зерна около 40 мкм, с благоприятным сочетанием низкого модуля Юнга ($E = 39$ ГПа), достаточно высокой прочности ($\sigma_s = 618$ МПа) и сверхупругого поведения при комнатной температуре для медицинского применения.
7. Технология имеет высокую степень готовности к непосредственному промышленному применению.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Та Динь Суан. Влияние комбинации радиально-сдвиговой прокатки и ротационнойковки на напряженно-деформированное состояние прутковой заготовки малого диаметра из титановых сплавов / Та Д.С., Шереметьев В.А., Кудряшова А.А., Галкин С.П., Андреев В.А., Прокошкин С.Д., Браиловский В. // Известия вузов. Цветная металлургия – 2020. – № 2 – С.22–31.

Ta Dinh Xuan, 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 / Ta Dinh Xuan, Shere-metyev V., Kudryashova A., Galkin S., Andreev V.A., Prokoshkin S.D., Brailovski V. // Rus-sian Journal of Non-Ferrous Metals – 2020. – Т. 61 – С.271–279.

2. Шереметьев В. Перспективная технология получения прутков из сверхупругого сплава Ti-Zr-Nb медицинского назначения на основе сочетания радиально-сдвиговой прокатки и рота-ционнойковки / Шереметьев В., Кудряшова А., Та Динь Суан, Галкин С. П., Прокошкин С. Д., Браиловский В. // Металлург – 2019. – № 1 – С.45–52.

Sheremet'ev V.A. Advanced Technology for Preparing Bar from Medical Grade Ti-Zr-Nb Superelastic Alloy Based on Combination of Radial-Shear Rolling and Rotary Forging / Sheremet'ev V.A., Kudryashova A.A., Xuan T.D., Galkin S.P., Prokoshkin S.D., Brailovskii V. // Metallurgist – 2019. – Т. 63 – № 1–2 – С.51–61.

3. Галкин С.П. Ресурсосберегающая технология производства круглого сортового проката из бывших в употреблении осей подвижного железнодорожного состава / Галкин С. П., Роман-цев Б. А., Та Динь Суан, Гамин Ю. В. // Черные металлы – 2018. – № 4 – С.20–27.

4. Ta Dinh Xuan. Effects of the Die Inlet Angle and Axial Feed on Rotary Swaged Ti-6Al-4V Al-loy Rods ВТ - Advances in Engineering Research and Application / Та D.X., Le V.T., Nguyen V.C. – 2019. – С.290–295.

5. Та Динь Суан. Компьютерное моделирование процесса прокатки ступенчатых заготовок, // Гамин Ю.В. / Magnitogorsk Rolling Practice 2018. – С27–29.