

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

КИН ТАТЬЯНА ЮРЬЕВНА

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ
ИЗ СПЛАВА СИСТЕМЫ СО-СР-МО НА ОСНОВЕ РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ
ПРОКАТКИ

Специальность 2.5.7 – «Технологии и машины обработки давлением»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Галкин Сергей Павлович

Москва – 2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Создание отечественной технологии изготовления деформированных полуфабрикатов из сплава системы Co-Cr-Mo для высоконагруженных имплантатов представляет собой актуальную задачу для укрепления технологического суверенитета и реализации импортозамещения. Сплавы системы Co-Cr-Mo наряду с титановыми сплавами и нержавеющей сталью являются весьма востребованным материалом для изготовления медицинских имплантов для тазобедренных суставов, штифтов и др. изделий. При этом промышленная технология получения отечественных деформированных полуфабрикатов из сплава Co-Cr-Mo до настоящего времени отсутствует.

Радиально-сдвиговая прокатка (РСП) является актуальным направлением создания и развития современных высокотехнологичных процессов термомеханической обработки для получения структурированных длинномерных прутков из специальных сплавов на компактном оборудовании с высокой эффективностью даже при малых партиях. Инновационный потенциал процесса и станов РСП весьма перспективен для производства деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Co-Cr-Mo.

Актуальность диссертационной работы подтверждена ее выполнением в рамках реализации гранта №23–19–00477 «Разработка научных основ и экспериментальная отработка термо-деформационной технологии получения полуфабрикатов из сплавов биомедицинского применения системы Co-Cr-Mo с экстремально высокой пластичностью и стабильной прочностью», поддержанного Российским научным фондом, и стипендией Президента РФ для аспирантов и адъюнктов, обучающихся по очной форме обучения в российских организациях, осуществляющих образовательную деятельность, и проводящих исследование в рамках реализации приоритетов НТР Российской Федерации в 2025 году.

Целью диссертационной работы является разработка технологического процесса изготовления деформированных полуфабрикатов в виде прутков круглого сечения из медицинского сплава системы Co-Cr-Mo и исследование структуры и механических свойств продукции на основных этапах изготовления.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи**:

- провести термомеханические испытания сплава на установке физического моделирования Gleeble System 3800 для определения его реологических свойств при горячей деформации;

- разработать методику и выполнить аналитическую оценку угла поворота вектора скорости (поворотной деформации) при радиально-сдвиговой прокатке с учетом цикличности процесса и рациональную калибровку валков для многопроходного режима;

- выполнить компьютерное моделирование процесса деформационной обработки сплава методами изотермическойковки и радиально-сдвиговой прокатки при различных температурно-скоростных и деформационных условиях;

- разработать температурно-скоростные и деформационные режимы для изготовления прутков из сплава системы Co-Cr-Mo различного размерного сортамента;

- определить особенности формирования структуры и механических свойств сплава системы Co-Cr-Mo при термомеханической обработке на основе РСП;

- разработать технологическую схему изготовления прутков различного размерного сортамента, включая выбор основного оборудования.

Научная новизна работы

Получены следующие результаты, имеющие научную новизну:

- Разработан и опробован в опытно-промышленных условиях технологический процесс изготовления деформированных полуфабрикатов из сплава системы Co-Cr-Mo в виде круглого длинномерного проката различного размерного сортамента (диаметром 18 – 40 мм).

- Установлены зависимости реологического поведения сплава Co-28Cr-6Mo в интервале температур 1000 – 1200 °С при скоростях деформации 1, 10 и 50 с⁻¹ с применением комплекса физического моделирования Gleeble 3800.

- Получены аналитические формулы для угла поворота вектора скорости (поворотной деформации) с учётом цикличности процесса радиально-сдвиговой прокатки. Разработана модернизированная калибровка рабочих валков, обеспечивающая снижение цикличности и энергосиловых параметров при многопроходной РСП.

- Выявлены особенности формирования структуры и механических свойств сплава системы Co-Cr-Mo от режимов термо-деформационной и постдеформационной термической обработки.

- Показано благоприятное влияние комбинированной термо-деформационной обработки, сочетающей изотермическую ковку и радиально-сдвиговую прокатку на структуру и механические свойства сплава Co-28Cr-6Mo, в частности, отмечено значительное улучшение прочностных и пластических свойств полученных прутков при радиально-сдвиговой прокатке за счет формирования двухфазного состава и мелкозернистой структуры.

Практическая значимость работы

Исследован и разработан технологический процесс производства деформированных полуфабрикатов из сплава системы Co-Cr-Mo в виде круглого длинномерного проката конечного диаметра 18 – 40 мм. Предложенный технологический процесс на основе комбинированной термо-деформационной обработки с применением предварительной изотермической ковки и последующей многопроходной радиально-сдвиговой прокатки прошел опытно-промышленное опробование в условиях предприятия АО «Спецлит», НПЦ «ОМД» НИТУ МИСИС. Полуфабрикаты, полученные по разработанным технологическим решениям, показали полное соответствие требованиям ГОСТ Р ИСО 5832-12-2009 «Имплантаты для хирургии. Металлические материалы. Часть 12. Сплав кобальт-

хром-молибденовый деформируемый» по химическому составу, микроструктуре и механическим свойствам.

Новизна, изобретательский уровень и промышленная применимость разработанных технических решений подтверждены патентами РФ №2838273, №2854033. Результаты теоретических и экспериментальных исследований используются в учебном процессе при подготовке студентов бакалавриата и магистратуры, обучающихся по направлениям подготовки 22.03.02 и 22.04.02 «Металлургия» на кафедре ОМД НИТУ МИСИС.

Методы и методики исследований

В работе использованы методы физического моделирования процесса одноосного сжатия с применением экспериментального комплекса Gleeble System 3800, компьютерного моделирования процессовковки и радиально-сдвиговой прокатки в программном комплексе QForm с построением 3D моделей в SolidWorks. Проведены аналитические расчёты на основе методики траекторно-скоростного анализа РСП. Экспериментальные исследования термодеформационной обработки выполнены на опытно-промышленном оборудовании, включая станы МИСиС-100Т и «20 – 40». Расчёты фазового состава сплава и превращений реализованы в программном пакете JMatPro. Исследование структуры и фазового состава проведено с использованием методов оптической микроскопии, рентгенофазового анализа и сканирующей электронной микроскопии (EBSD). Уровень механических свойств определен по результатам испытаний на одноосное растяжение.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальные данные о реологическом поведении сплава системы Co-28Cr-6Mo в условиях горячей деформации при различных температурно-скоростных условиях.
2. Методика и результаты аналитической оценки угла поворота вектора скорости (поворотной деформации) при радиально-сдвиговой прокатке с учетом

цикличности процесса и рациональная калибровка валков для многопроходного режима.

3. Результаты анализа напряженно-деформированного состояния сплава системы Co-Cr-Mo при изотермической ковке и температурного поля заготовки при радиально-сдвиговой прокатке с варьированием параметров процесса на основе конечно-элементного моделирования.

4. Результаты экспериментальных исследований режимов гомогенизационного отжига, предварительной деформационной обработки и многопроходной радиально-сдвиговой прокатки, а также постдеформационной термической обработки сплава системы Co-Cr-Mo.

5. Особенности формирования структурно-фазового состояния и механических свойств сплава в процессе предложенной термо-деформационной обработки.

6. Технологическая схема изготовления деформированных полуфабрикатов в виде длинномерных прутков круглого сечения, включая режимы обработки и требуемое технологическое оборудование.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением современных методов компьютерного моделирования, экспериментальными исследованиями на опытно-промышленном оборудовании и проведением комплексных испытаний на аналитическом и испытательном оборудовании. Текст диссертации проверен на отсутствие плагиата с помощью программы «Антиплагиат» (<http://antiplagiat.ru>).

Личный вклад автора заключается в определении цели и задач исследования, разработке и реализации плана исследования, анализе основных научных результатов по моделированию, экспериментальному опробованию предложенных решений, разработке технологической схемы обработки сплава системы Co-Cr-Mo и выборе оборудования, опытно-промышленном освоении технологического процесса изготовления деформированных полуфабрикатов из сплава системы Co-Cr-Mo.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: Международная конференция «Биоматериалы: от исследований к практике», г. Москва, 2025 г.; 31-я Международная промышленная выставка «Металл-Экспо 2025» (золотая медаль), г. Санкт-Петербург; Международная научно-техническая молодежная конференция «Перспективные материалы конструкционного и функционального назначения», г. Томск, 2024 г.; 30-я Международная промышленная выставка «Металл-Экспо 2024», г. Москва; Научно-технический семинар «Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов», г. Москва, 2024 г.; VIII Международная молодежная конференция «Magnitogorsk Rolling Practice 2024», г. Магнитогорск, 2024 г.; Международная научно-техническая молодежная конференция «Перспективные материалы конструкционного и функционального назначения», г. Томск, 2023 г.; 29-я Международная промышленная выставка «Металл-Экспо 2023», г. Москва; XX Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов», г. Москва, 2023 г.; VII Международная молодежная конференция «Magnitogorsk Rolling Practice 2023», г. Магнитогорск, 2023 г.; Научно-технический семинар «Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов», г. Москва, 2022 г.; XLVI Международная научно-практическая конференция «Advances in science and technology» г. Москва, 2022 г.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Диссертация по своей тематике, цели, задачам, научной новизне, теоретической и практической значимости, методологии и методам исследования, положениям, выносимым на защиту, соответствует паспорту специальности 2.5.7 – «Технологии и машины обработки давлением» по п. 1, 3, 4, 6.

Публикации

Основное содержание диссертации опубликовано в 23 печатных работах, из них 11 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных Перечнем ВАК, индексируемых в базах Web of Science и/или Scopus, 10 тезисах докладов в сборниках научных конференций, в 2 патентах.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, выводов и списка использованных источников из 130 наименований отечественных и зарубежных авторов. Работа содержит 142 страницы, включая 17 таблиц, 70 рисунков и 6 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертационной работы, сформулированы и определены цель и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе отражены результаты аналитического обзора литературы по направлению исследования. Проанализированы данные о применении сплава системы Co-Cr-Mo и предъявляемых требованиях к полуфабрикатам, рассмотрены существующие методы обработки сплава и возможный уровень свойств. Рассмотрены особенности способа радиально-сдвиговой прокатки как потенциальной технологии для изготовления деформированных полуфабрикатов из сплава системы Co-Cr-Mo.

Во второй главе представлены результаты анализа деформационного поведения сплава системы Co-Cr-Mo, экспериментального обоснования предварительной обработки заготовки перед РСП, а также результаты расчетно-аналитической оценки угловых параметров траекторий и разработки модернизированной калибровки рабочего инструмента для многопроходной прокатки.

Исследование реологических свойств сплава выполнено с применением физического моделирования процесса на испытательном комплексе Gleeble System 3800 при различных скоростях ($\dot{\epsilon} = 1, 10$ и 50 с^{-1}) и температурах ($T = 1000, 1100$ и $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$) деформации. При температуре $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и скорости деформации 50 с^{-1} сопротивление деформации сплава Co-28Cr-6Mo достигает максимального пикового напряжения, равного 785 МПа (рисунок 1, в, 2, а), в то время как минимальное значение 220 МПа отмечено при параметрах $T = 1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\dot{\epsilon} = 1 \text{ с}^{-1}$ (рисунок 1, а, 2, в). Построенные кривые отражают общую тенденцию к снижению сопротивления деформации сплава с повышением температуры, увеличение скорости деформации приводит к росту напряжения течения. При этом пиковые напряжения резко возрастают с понижением температуры и повышением скорости деформации.

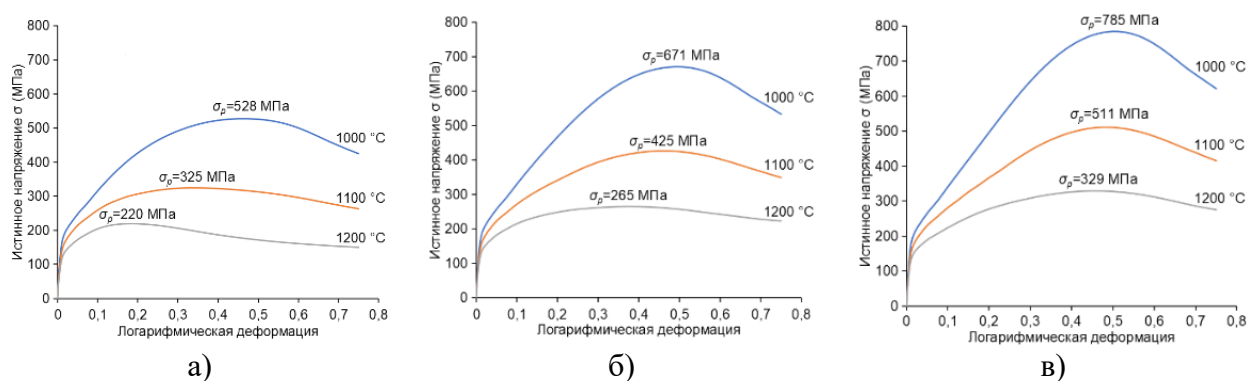


Рисунок 1 – Кривые сопротивления деформации при скорости деформации: а) 1 с^{-1} , б) 10 с^{-1} и в) 50 с^{-1} в интервале температур $1000 - 1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$

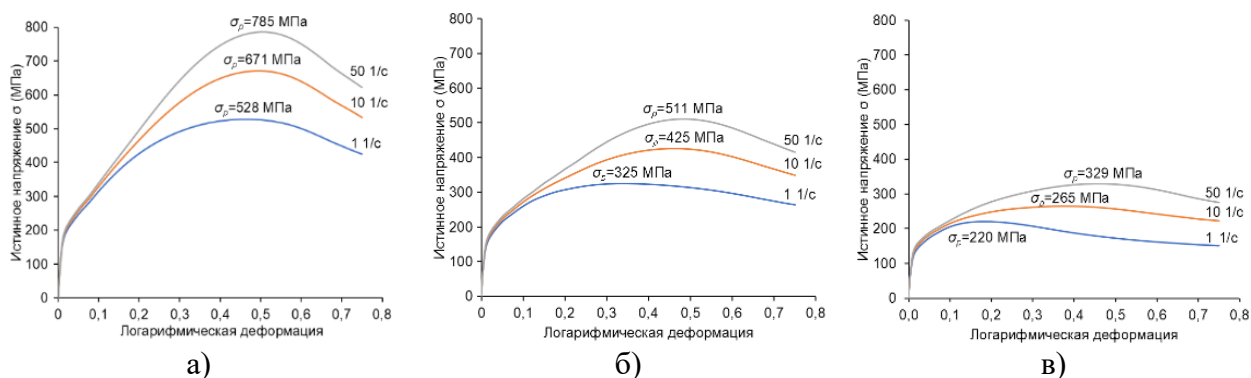


Рисунок 2 – Кривые сопротивления деформации при температурах деформации: а) $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$, б) $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и в) $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в интервале скоростей деформации $1 - 50 \text{ с}^{-1}$

На основе экспериментальных данных о деформационном поведении сплава Co-28Cr-6Mo построены карты пластичности материала по методике Прасада (рисунок 3).

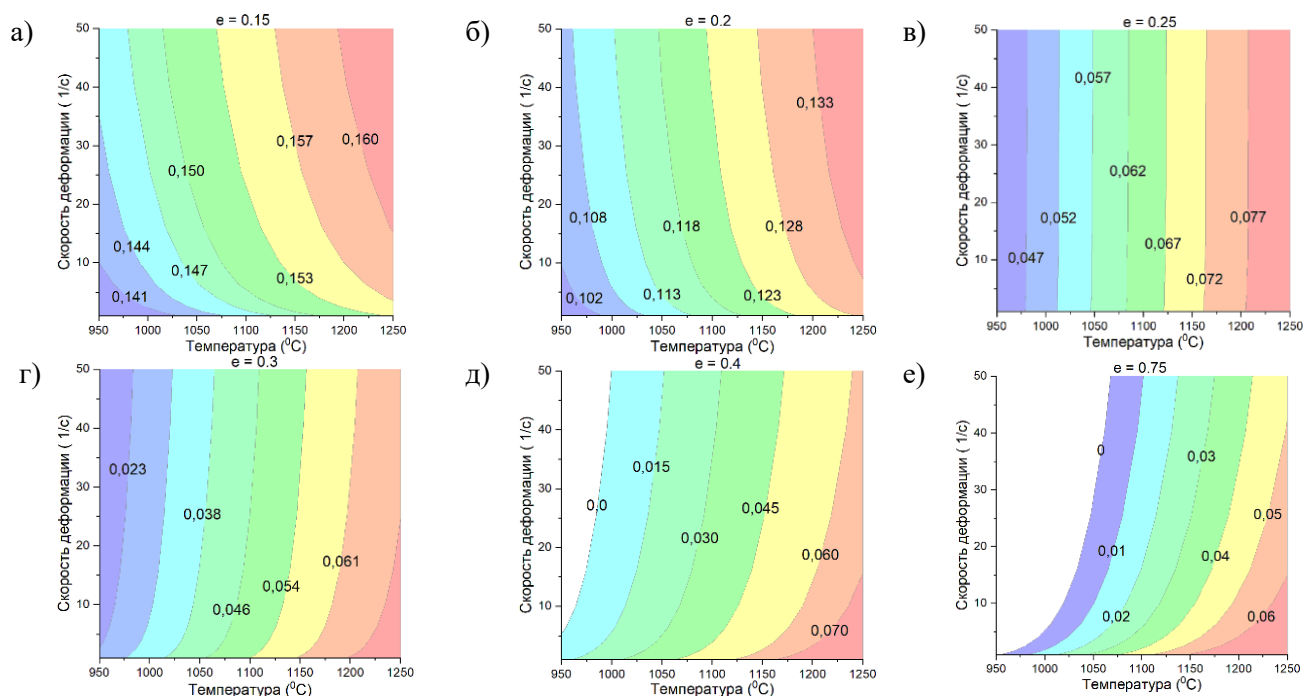


Рисунок 3 – Изменение температурно-скоростной зависимости критерия стабильности пластического течения ζ по мере накопления логарифмической деформации e : а) 0,15; б) 0,20; в) 0,25; г) 0,30; д) 0,40; е) 0,75

Наиболее благоприятными температурно-скоростными условиями горячей деформации сплава согласно данным карт пластичности являются режимы при низких скоростях деформации от 1 до 5 с⁻¹ и температуре деформации в интервале 1150 – 1200 °С в случае высоких обжатий, при малых обжатиях ($e \leq 0,2$) целесообразно выбирать скорости деформации $\dot{\epsilon}$ не менее 20 с⁻¹ и значения температуры более 1150 °С.

Для исследования возможности применения способа РСП с учетом полученных деформационно-скоростных режимов обработки сплава проведена серия экспериментальных прокаток на станах МИСиС-100Т и «20 – 40» за 5 проходов до получения прутка диаметром 32 мм с последующей закалкой в воде с применением исходных заготовок в различных состояниях: слиток после

гомогенизационного отжига (слиток №1); слиток, подвергнутый горячему изостатическому прессованию (ГИП) (слиток №2); предварительно деформированная (кованая) заготовка (из слитка №3) (рисунок 4). Предварительные режимы обработки слитков выбраны на основе литературных данных, приведенных в главе 1, и фазовых диаграмм состояния, построенных в программном пакете JMat Pro.

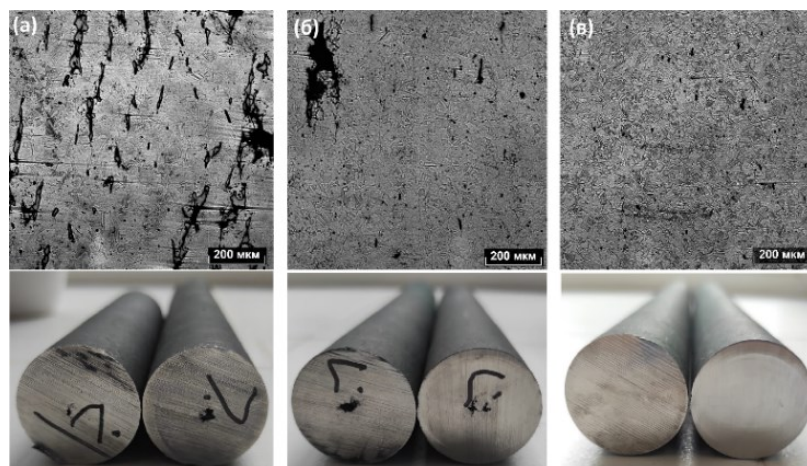


Рисунок 4 – Микроструктура осевой зоны прутков после РСП с использованием исходной заготовки: а) литая после гомогенизации; б) после ГИП; в) гомогенизация + изотермическая ковка

После РСП заготовки, полученные из слитков после гомогенизации и ГИП, имеют выраженные внутренние дефекты, образовавшиеся в местах локализации σ -фазы, что подтверждает необходимость ее устранения перед деформацией. Очевидно, наличие σ -фазы указывает на недостаточное для ее растворения время выдержки при гомогенизации и ГИП. При этом, в прутке, полученном из кованой заготовки, отсутствуют видимые дефекты в виде трещин и пор, а также включения σ -фазы (рисунок 4, в).

Проведенное экспериментальное исследование указывает на целесообразность предварительной деформации перед РСП с целью получения бездефектного полуфабриката в виде длинномерных прутков. Для улучшения деформируемости литых заготовок необходимо проводить гомогенизационный отжиг с подбором рационального режима по температуре и времени выдержки,

однако применение исключительно литой заготовки для РСП повышает вероятность образования дефектов в конечной продукции.

Оценка угла поворота вектора скорости (поворотной деформации) при РСП выполнена с использованием аналитической методики траекторно-скоростного анализа и модернизированной применительно к слоистой модели. Геометрическая схема траекторий течения металла представлена на рисунке 5.

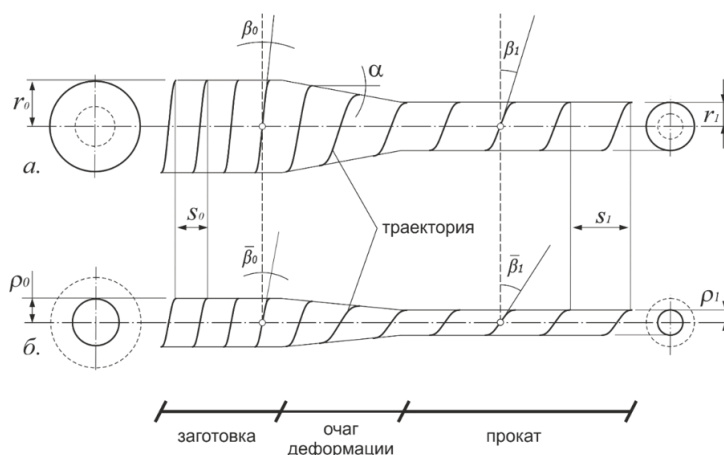


Рисунок 5 – Траектории течения различных радиусов: а) $\bar{r} = \rho/r = 1$; б) $\bar{r} = \rho/r = 0,5$.

В качестве меры поворотной деформации элементарных объёмов металла, совершающих движение по произвольной винтовой траектории, принята разность углов подъёма этой траектории до и после очага деформации, т. е. $\Delta\bar{\beta} = \bar{\beta}_1 - \bar{\beta}_0$. Для расчёта $\Delta\bar{\beta}$ в работе получены равнозначные формулы вида:

$$\Delta\bar{\beta} = \arctg \frac{\bar{r} \cdot \tg \beta_1 \cdot (\zeta - 1)}{\zeta \cdot \bar{r}^2 + \tg^2 \beta_1} \quad \text{и} \quad \Delta\bar{\beta} = \text{arcctg} \left[\bar{r} \cdot \frac{\text{ctg} \beta_1 \cdot (\text{ctg} \beta_1 + N \cdot C_\alpha) + \bar{r}^{-2}}{N \cdot C_\alpha} \right],$$

в которых: $\bar{r} = \rho/r$ – относительный радиус траектории; $\zeta = (r_0/r_1)^3$ коэффициент подъёма траектории, N – число циклов деформации, $C_\alpha = 2\pi \cdot \tg \alpha$ – константа процесса РСП (постоянна при заданной установке валков и их калибровке).

Механизм формирования поворота траектории иллюстрируется графиками на рисунке 6. На выходе из очага деформации распределение углов $\bar{\beta}_1$ по радиусу описывается кривой $N = 0$, а на входе 4 другими кривыми. При заданном N^* угол поворота представляется как разность ординат точек на соответствующей кривой и кривой для $N = 0$.

Угол поворота $\Delta\bar{\beta}$ достигает значительных величин и резко неравномерно распределен по радиусу проката. В около центральных, достаточно тонких слоях при $\bar{r} = 0,10 - 0,30$ отмечается весьма острый максимум с прилегающими зонами крутого градиента, особенно со стороны центра. В отдельных случаях, обычно при деформации литого металла с ослабленной межзеренной связью, данное обстоятельство может способствовать образованию характерных несплошностей и, следовательно, снижению деформируемости заготовок.

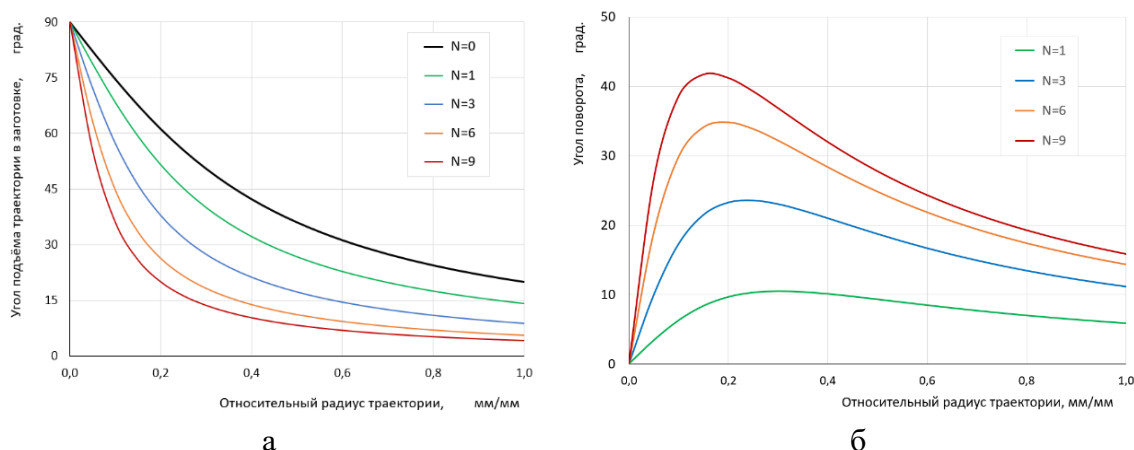


Рисунок 6 – а) Изменение угла подъёма траектории $\bar{\beta}_1$ вдоль относительного радиуса проката (кривая $N = 0$) и угла подъёма $\bar{\beta}_0$ вдоль относительного радиуса заготовки при различном количестве циклов деформации ($N = 1; 3; 6; 9$); б) Влияние числа циклов деформации N и относительного радиуса траектории на угол поворота $\Delta\bar{\beta} = \bar{\beta}_1 - \bar{\beta}_0$

Согласно полученным данным о сопротивлении деформации, сплав Co-28Cr-6Mo может быть отнесен к группе высокопрочных материалов. На основе результатов расчетно-аналитической оценки повышение деформируемости сплава Co-Cr-Mo может быть также реализовано за счет снижения цикличности процесса.

Для многопроходной прокатки сплава системы Co-Cr-Mo на стане РСП «20 – 40» модернизирована калибровка, изготовлены и успешно применены рабочие валки с ограниченной длиной калибрующего участка, который обеспечивает точность проката минимального диаметра только в последних 1 – 2 проходах (Рисунок 7).

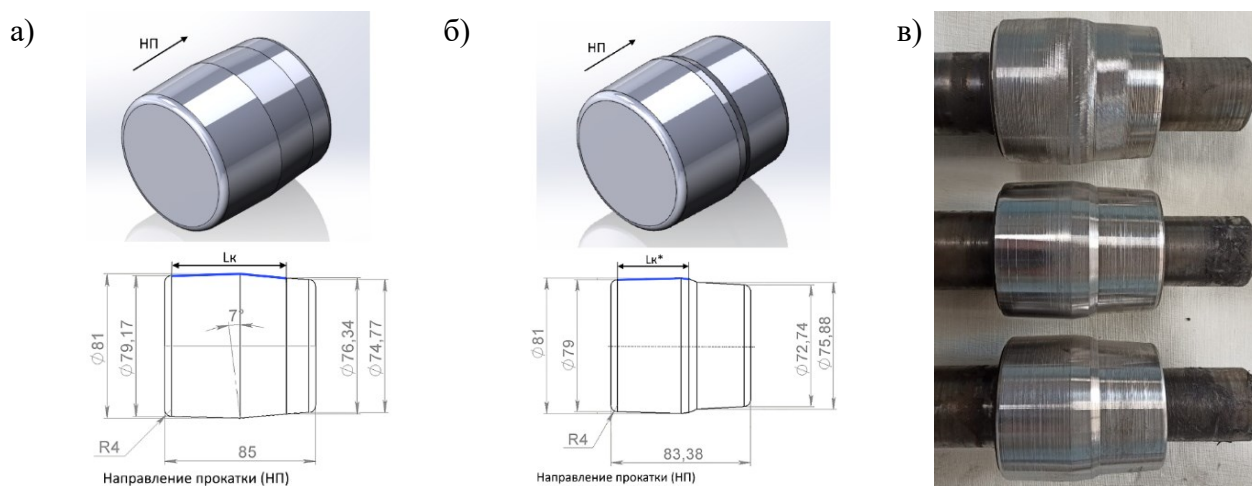


Рисунок 7 – Калибровка рабочего валка стана РСП 20–40: а) традиционная; б) модернизированная; в) изготовленные рабочие валки стана «20 – 40»

Предварительное КЭ-моделирование показало, что предложенная калибровка позволяет сократить длину и площадь контакта металла с валками (рисунок 8), и соответственно, радиальное усилие на валок на 12 – 25 % в сравнении с традиционной конфигурацией валков.

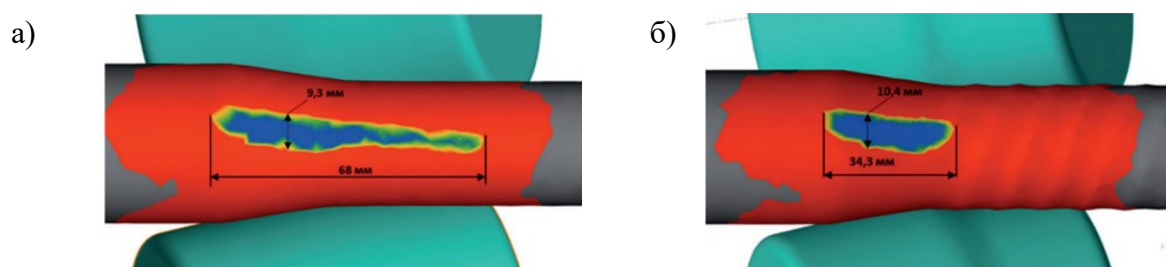


Рисунок 8 – Контактная поверхность металла с валком в промежуточном проходе $\varnothing 40 \rightarrow \varnothing 31,7$ мм: традиционная калибровка (а), модернизированная калибровка (б)

Третья глава посвящена моделированию комбинации процессов мультиосевой изотермическойковки и радиально-сдвиговой прокатки. Анализ

распределения полей температуры, скоростей деформации и параметра stress triaxiality по результатам моделирования показал, что для обеспечения рациональных температурно-деформационных условий процесса требуется проведение дополнительных промежуточных подогревов между основными операциями (рисунок 9). Рассматриваемая схема мультиосевой изотермическойковки может быть применима для предварительного уплотнения литой структуры и повышения деформируемости заготовок при последующей РСП.

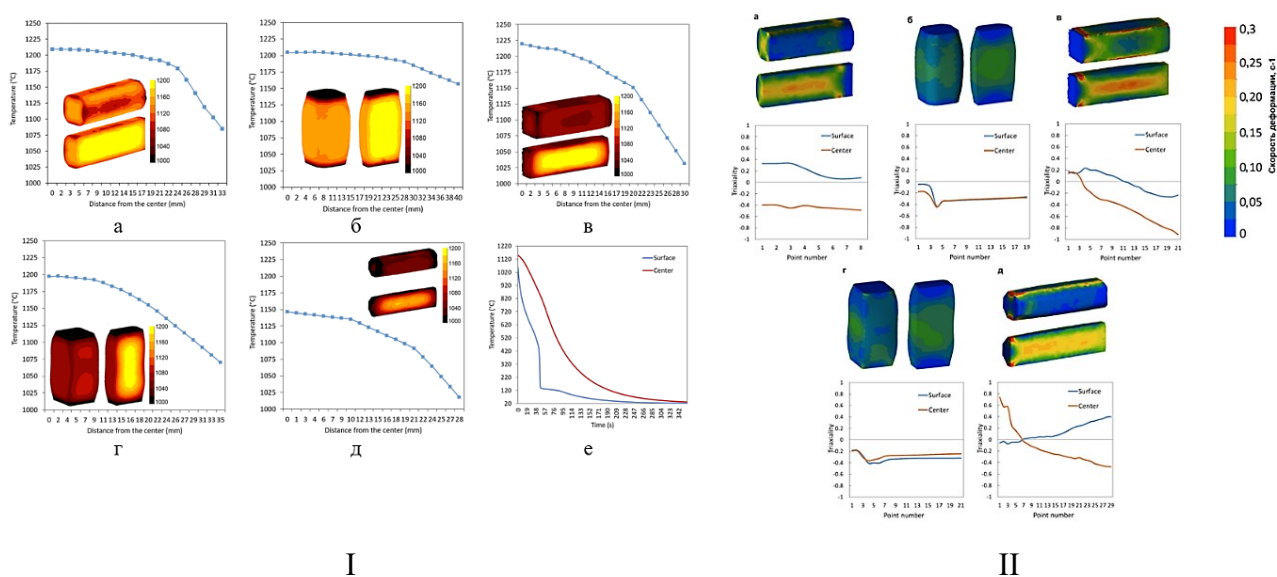


Рисунок 9 – Распределение температуры (I) и полей скоростей деформации и параметра stress triaxiality (II) на основных этапахковки

Для процесса РСП выполнен подробный анализ температурного поля и напряженно-деформированного состояния заготовки при деформации, а также оценка энергосиловых параметров процесса РСП при варьировании параметров: коэффициента вытяжки, частоты вращения и температуры рабочих валков, температуры и диаметра исходной заготовки (рисунок 10, 11).

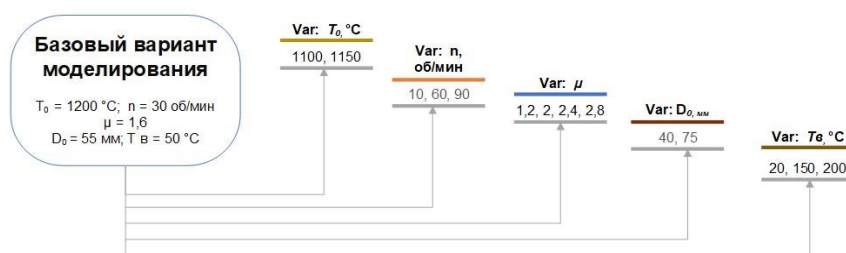


Рисунок 10 – Последовательность выполнения этапов моделирования

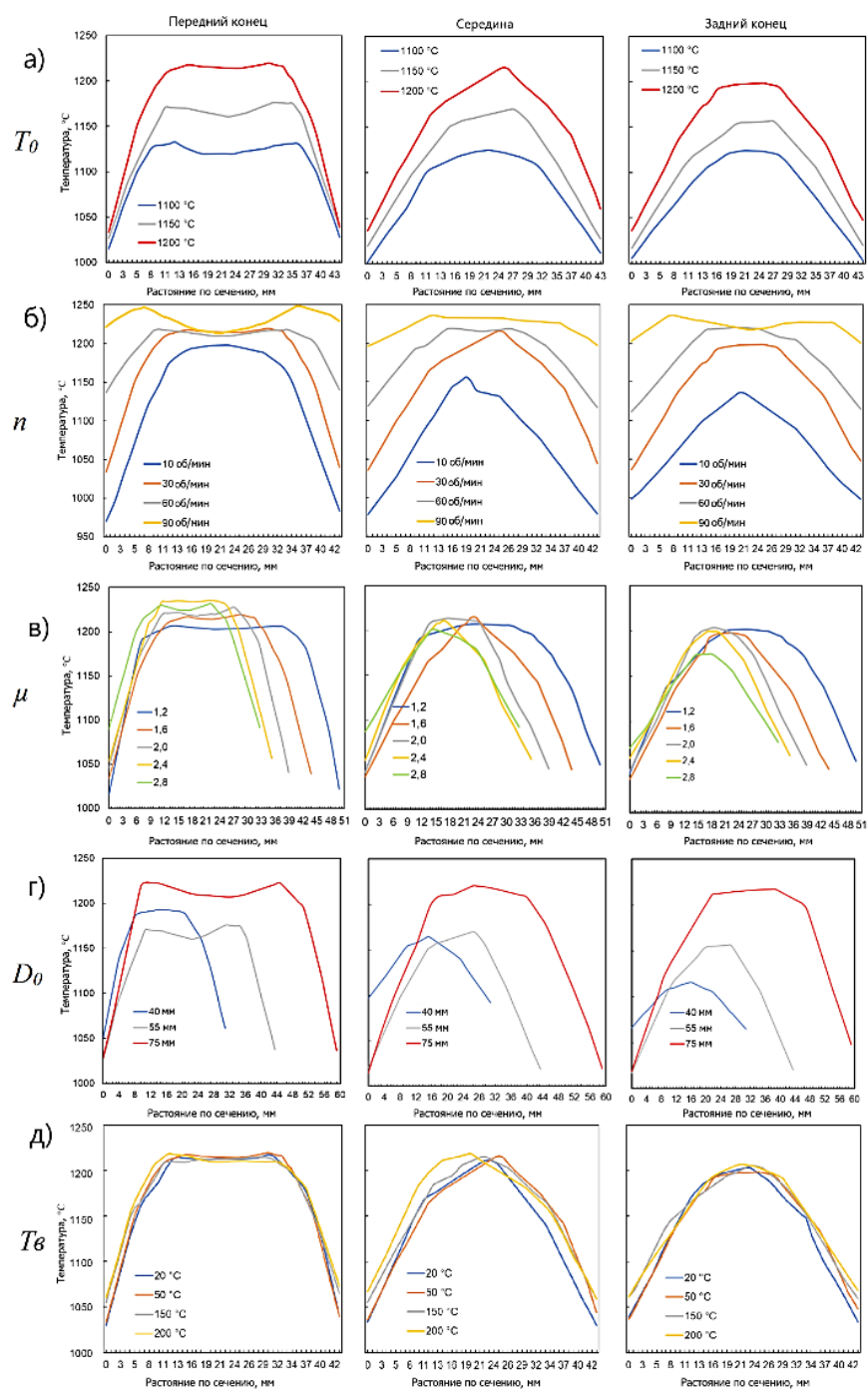


Рисунок 11 – Распределение температуры прутка по поперечному сечению в зависимости от варьируемых параметров: а – температуры заготовки, T_0 ; б – частоты вращения валков, n ; в – коэффициента вытяжки, μ ; г – диаметра заготовки, D_0 ; д – температуры валков, T_b

В процессе РСП возможно осуществлять эффективное управление температурным полем деформируемой заготовки, наиболее значимыми технологическими параметрами, оказывающими влияние на распределение температуры в прутке, являются температура нагрева исходной заготовки и

скорость вращения рабочих валков. Для обеспечения температуры центральной зоны прутка на уровне температуры нагрева заготовки и без существенного снижения температуры поверхности (не менее 1050 °С) предпочтительным может быть диапазон $n = 30 - 60$ об/мин.

Накопленная степень деформации имеет градиентное распределение по сечению заготовки и линейно возрастает с увеличением суммарного коэффициента вытяжки как в центральной, так и приповерхностной областях. Вместе с этим с ростом μ повышается цикличность процесса и происходит увеличение максимального значения радиального усилия на установившейся стадии процесса на 50 кН на каждые 0,4 ед. μ . Показано, что для обеспечения проработки структуры металла, поддержания допустимого уровня ЭСП и ограничения поворотной деформации предпочтительна многопроходная прокатка с коэффициентами вытяжки за проход 1,2 – 2,0 при суммарном коэффициенте вытяжки не менее 3.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных опробований предложенных технологических решений для проведения гомогенизационного отжига слитков, изотермическойковки промежуточной заготовки и радиально-сдвиговой прокатки конечных прутков различного размерного сортамента.

По результатам исследования влияния температуры и времени гомогенизационного отжига выявлено, что полное растворение охрупчивающей σ -фазы происходит уже после 6 ч выдержки при температуре 1200 °С (рисунок 12). При этом в значительной степени режим гомогенизационного отжига определяется исходной структурой слитка и объемной долей σ -фазы, выделившейся при кристаллизации слитка, которые, в свою очередь, зависят от химического состава слитка. Таким образом, наиболее рациональным режимом обработки слитка представляется интервал температур 1220 – 1250 °С при времени выдержки в печи 6 – 9 ч с последующим скоростным охлаждением для предотвращения выделения охрупчивающей σ -фазы.

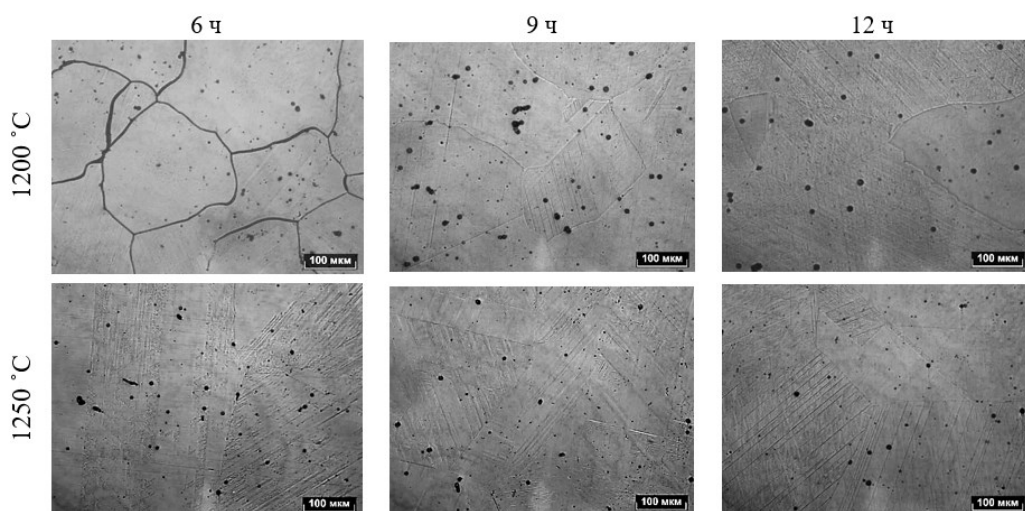


Рисунок 12 – Микроструктура слитка после гомогенизационного отжига при различных температурах и времени выдержки

С учетом результатов моделирования процессаковки проведена отработка режима изотермической мультиосевойковки в производственных условиях. Ковка предварительно гомогенизированного слитка диаметром 95 мм и длиной ~ 400 мм и порезанного пополам проводилась на гидравлическом прессе усилием 16 МН с применением плоских бойков, нагретых до температуры 950 ± 10 °С, при скорости перемещения инструмента 8 мм/с и температуре нагрева заготовки по схеме: ковка по образующей на квадрат 65 мм → подогрев при температуре 1200 ± 10 °С в течение 20 минут → осадка в торец со степенью деформации ~30 % → ковка на квадрат 60 мм → подогрев при температуре 1200 ± 10 °С в течение 20 минут → осадка в торец со степенью деформации ~30 % → ковка на Ø 60 мм. По завершении процессаковки выполнено охлаждение заготовок на воздухе. Размер двух полученных кованых заготовок составил: средний диаметр 60 мм и длина ~ 300 мм. Анализ микроструктуры показал, что в результате мультиосевойковки в заготовке формируется мелкозернистая структура с некоторым градиентным распределением по сечению без видимых включений σ -фазы, также не выявлено внутренней пористости и следов растрескивания (рисунок 13), что подтверждает пригодность выбранной схемы получения деформированных заготовок для последующей РСП.

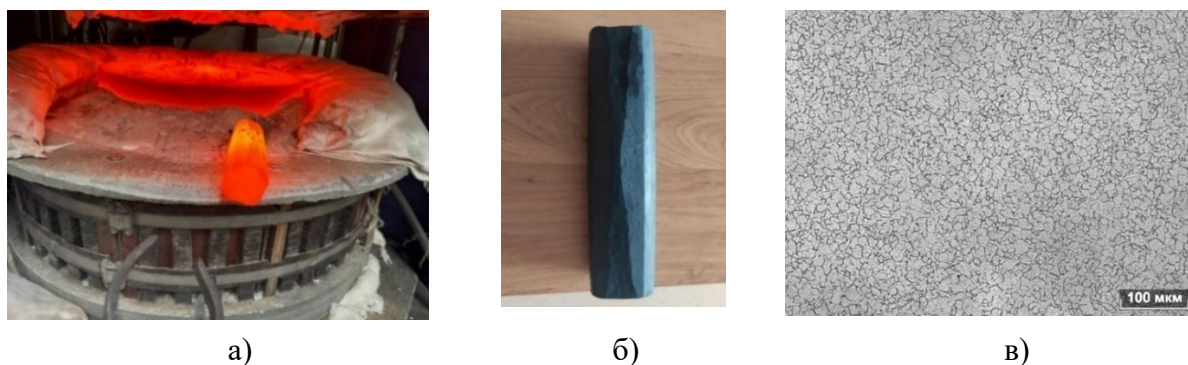


Рисунок 13 – Процессковки слитка из сплава системы Co-Cr-Mo (а), внешний вид ковanej заготовки (б) и ее микроструктура (в)

Для обеспечения технологической пластичности сплава, сдерживания выделения σ -фазы и избежания трещинообразования необходимо строгое соблюдение температурного режима деформации с применением дополнительных коротких подогревов.

Для определения наиболее благоприятных условий деформирования и выбора режимов радиально-сдвиговой прокатки проведен ряд экспериментов на опытно-промышленных станах РСП МИСИС-100Т, «20 – 40» по варьированию параметров процесса (таблица 1), в частности, количества проходов, частоты вращения валков и температуры нагрева перед прокаткой и суммарного коэффициента вытяжки с учетом данных выполненного компьютерного моделирования. Прокатка прутков на стане «20 – 40» выполнена с применением разработанной модернизированной калибровки рабочих валков и предварительно деформированной (кованой) заготовки.

Таблица 1 – Экспериментальные режимы радиально-сдвиговой прокатки

Маркировка	Кол-во проходов	Маршрут	Частота вращения валков, п, об/мин	Суммарный коэффициент, вытяжки, $\mu\Sigma$	Температура нагрева, Т, °C
Прокатка до диаметра 40 мм					
B1 (40)	1	56,5–40	54	2,0	1195
B2 (40)	3	56,5–49–45–40	18		
Прокатка до диаметра 30 мм					
B1 (30)	3	40–38–34–30	27	3,5	1195
B2 (30)	3	40–38–34–30	81		
Прокатка до диаметра 18 мм					
B1 (18)	3	30–27–21,5–17,8	27	9,7	1180
B2 (18)	3	30–27,3–21,7–18	27		1120

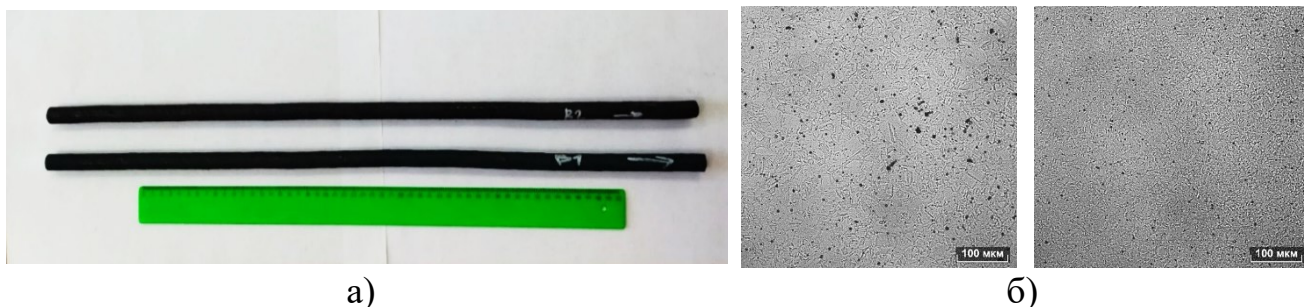


Рисунок 14 – Внешний вид прутков из сплава Co-28Cr-6Mo после прокатки в конечный $\varnothing$ 18 мм (а) и микроструктура центра и поверхности прутка (б)

Установлено, что при РСП сплава Co-28Cr-6Mo предпочтительной является многопроходная прокатка, обеспечивающая большую деформируемость и измельчение зерна, а также снижение нагрузки на оборудование за счет дробления деформации по проходам. Кроме этого, деформация при высокой частоте вращения валков (81 об/мин) приводит к существенному разогреву сплава и росту зерна, а также повышению токовой нагрузки на привод стана в сравнении с более низкими значениями скорости, следовательно, с учетом полученных результатов эксперимента и результатов моделирования, предпочтительным является диапазон варьирования частоты вращения $n = 25 - 60$ об/мин. Показано, что при прокатке прутков малых сечений температура является важнейшим фактором для структурообразования и механических свойств. Для снижения градиентности структуры по сечению следует снижать температуру нагрева под прокатку по мере уменьшения диаметра прутка, в совокупности с энергосиловыми параметрами процесса прокатки рациональным является температурный интервал 1180 – 1150 °С.

В пятой главе подробно исследовано формирование и изменение микроструктуры, фазового состава и механических свойств на основных этапах технологического процесса обработки сплава системы Co-Cr-Mo.

Применение комбинированной деформационной обработки (изотермическая ковка + РСП) позволяет проработать структуру сплава и обеспечить мелкозернистую структуру в прутках диаметрами 40 – 18 мм и длиной до 2,5 метров (рисунок 15, а). В процессе термо-деформационной обработки сплава

прочностные характеристики сплава возрастают на каждом этапе обработки. Однако при РСП отмечено существенное повышение прочности и пластичности одновременно за счет уникального формирования микроструктуры и фазового состава (рисунок 15, б, в).

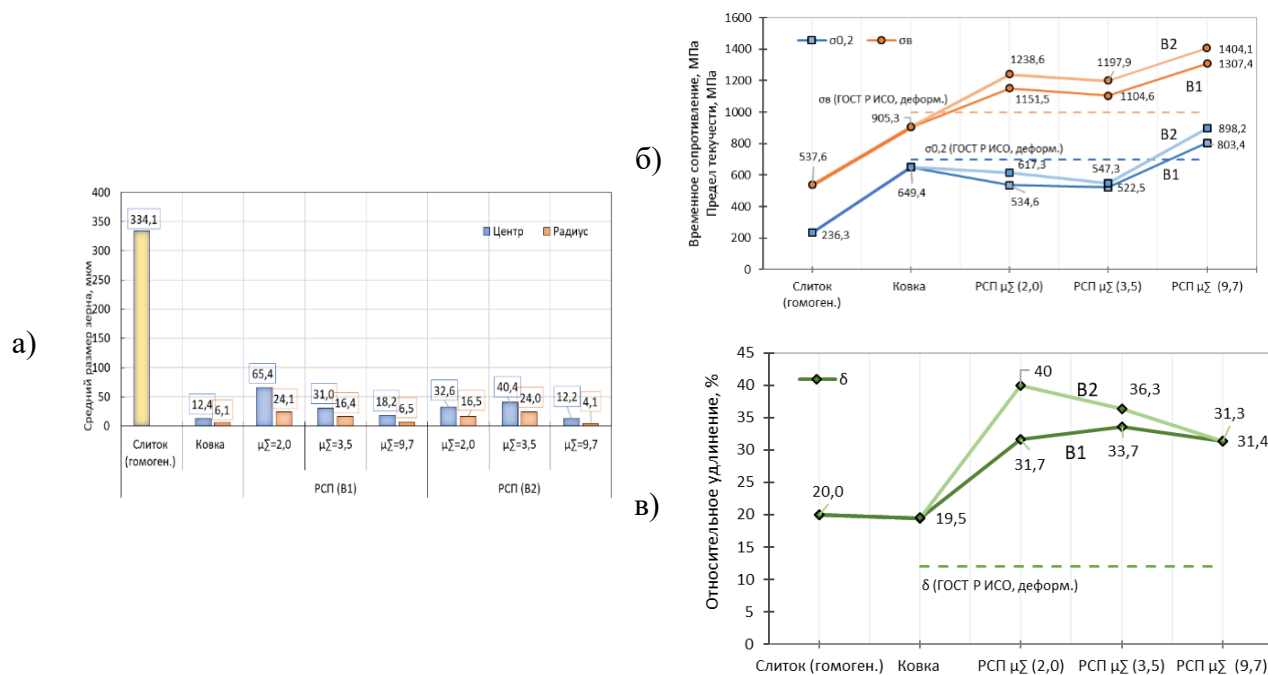


Рисунок 15 – Изменение размера зерна (а) и механических свойств (средние значения областей Ц + Р) (б, в) сплава Co-28Cr-6Mo на основных этапах обработки

Градиент структуры при РСП снижается по мере увеличения суммарного коэффициента вытяжки, что подтверждается значениями среднего размера зерна и уровнем механических свойств как в центре, так и в поверхностной зоне прутков.

С целью верификации данных по механическим свойствам, полученных на плоских образцах малой величины, из прутка В2 Ø 18 мм вырезаны образцы в соответствии с ГОСТ 1497 (тип 3, номер 8), таким образом, что рабочая часть образца располагалась в зоне 0,5 радиуса прутка (схема вырезки, рисунок 16, а). По результатам испытаний получены следующие значения: $\sigma_B = 1322,1$ МПа, $\sigma_{0,2} = 844$ МПа, $\delta = 24,8\%$, что полностью удовлетворяет требованиям ГОСТ Р ИСО 5832-12-2009.

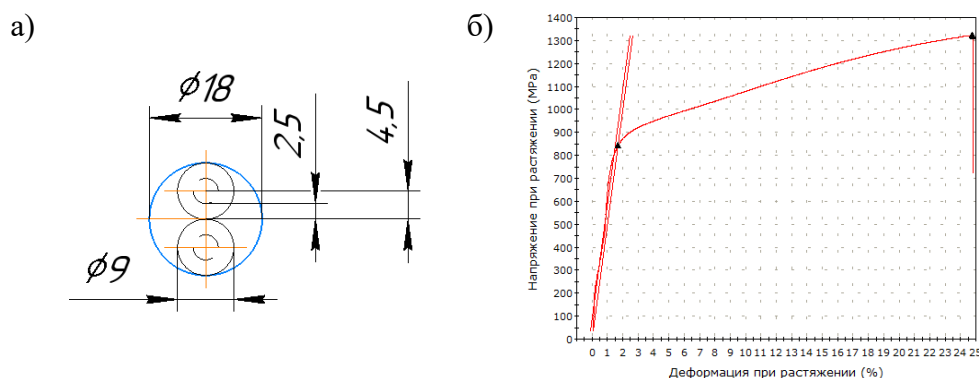


Рисунок 16 – Схема вырезки образцов из прутка диаметром 18 мм (а) и диаграмма растяжения (б)

Согласно картам рекристаллизации (рисунок 17, а), полученным по результатам EBSD анализа прутка В2 диаметром 18 мм ($\mu_{\Sigma} = 9,7$), в процессе РСП в центре прутка формируется преимущественно динамически рекристаллизованная структура с небольшой долей деформированных зерен. По мере продвижения к поверхности прутка доля деформированных мелких зерен возрастает в следствие интенсивной деформационной проработки приповерхностных слоев и снижения температуры поверхности. При анализе типа структуры фазовых составляющих наибольшая доля деформированных зерен принадлежит ГПУ-фазе (рисунок 17, б).

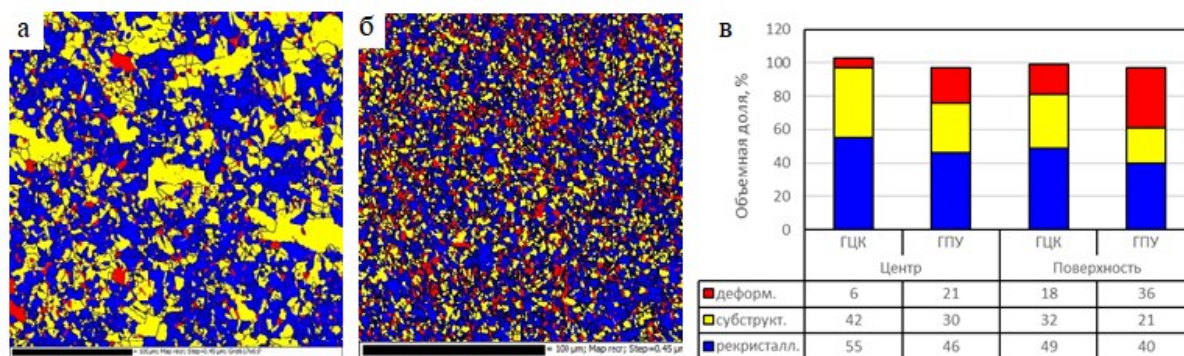
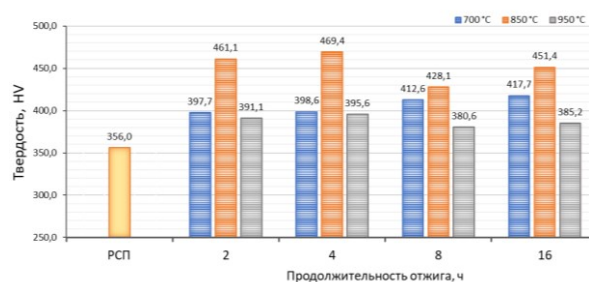
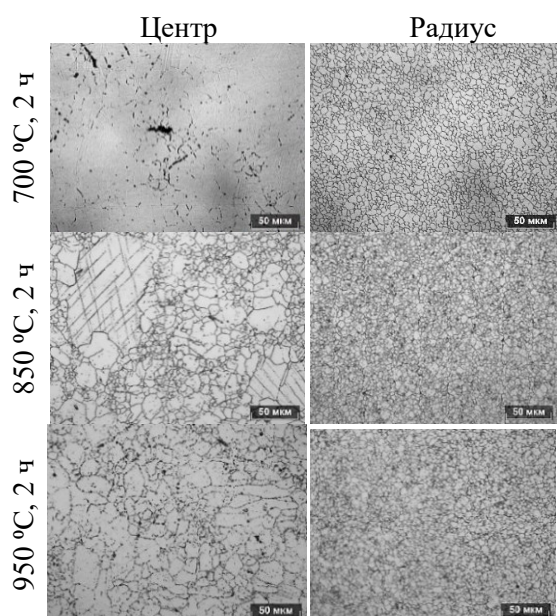


Рисунок 17 – EBSD карты рекристаллизации: а) центральная и б) поверхностная области прутка В2 Ø18 мм ($\mu_{\Sigma} = 9,7$) и в) диаграмма объемной доли структурных составляющих

При исследовании влияния постдеформационной обработки установлено (рисунок 18), что старение при 800 – 850 °С в течение 1 – 2 ч (в зависимости от

исходной структуры) обеспечивает благоприятное соотношение прочности и пластичности сплава Co-28Cr-6Mo и может быть использовано, при необходимости, для достижения требуемого соотношения свойств при различных условиях поставки.



а) б)
Рисунок 18 – Микроструктура и твердость при различных режимах отжига

В шестой главе предложены схема технологического процесса изготовления деформированных полуфабрикатов из сплава Co-Cr-Mo, описаны режимы обработки на основных технологических операциях и выбрано технологическое оборудование.

Разработанная схема процесса (рисунок 19) и рекомендации по выбору оборудования и режимам обработки (рисунок 20) включают опробованные технологические решения и обеспечивают изготовление деформированных полуфабрикатов из сплава Co-28Cr-6Mo в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 5832-12-2009.

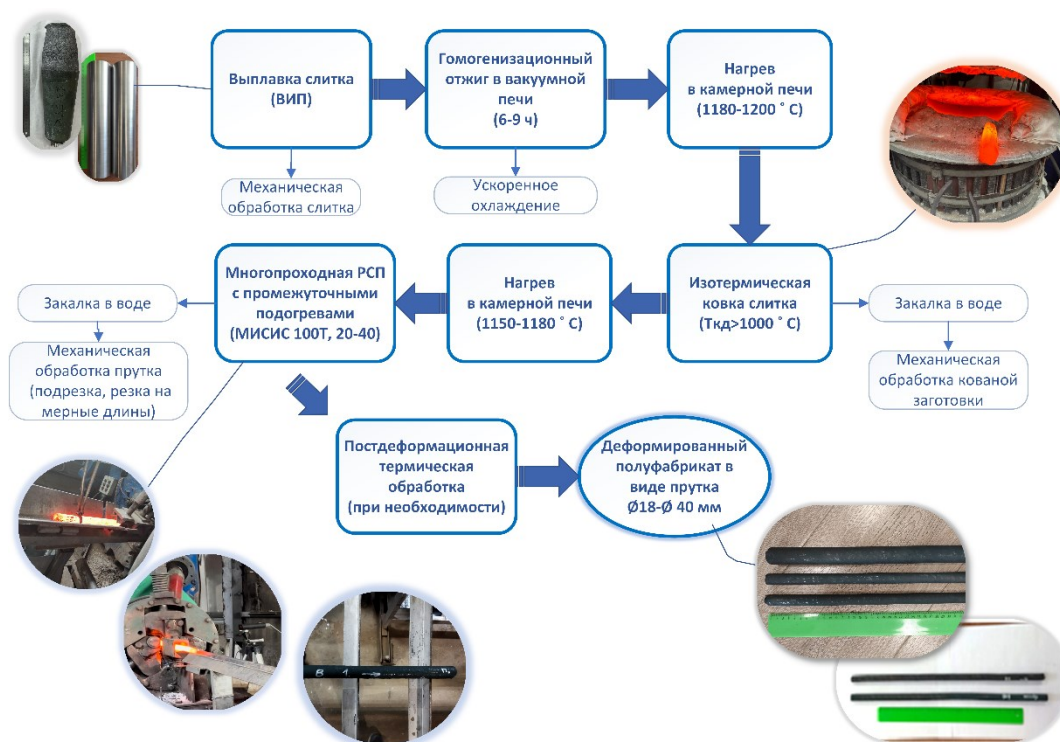


Рисунок 19 – Схема технологического процесса изготовления деформированных полуфабрикатов (прутков) из сплава системы Co-Cr-Mo

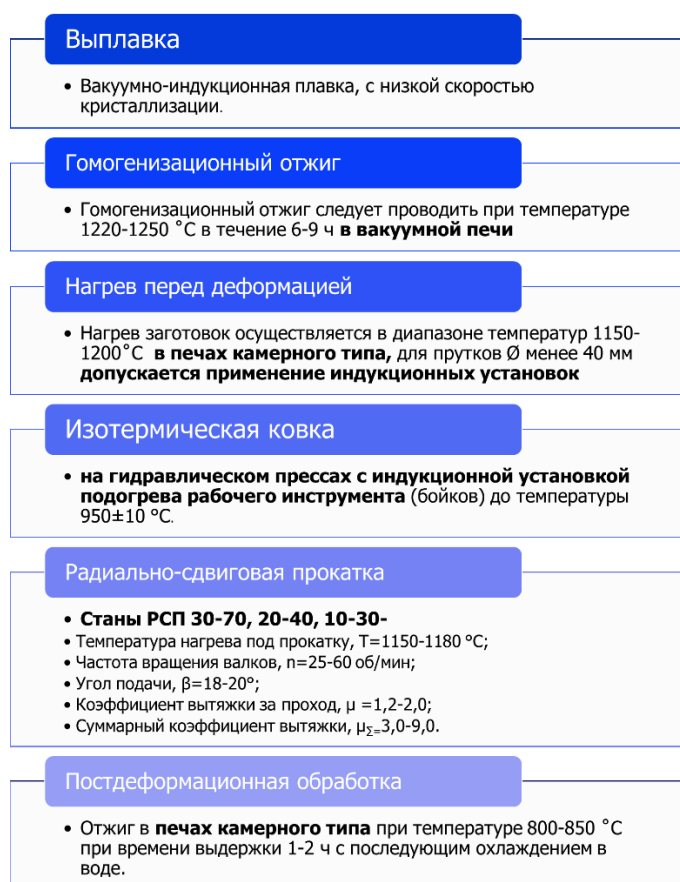


Рисунок 20 – Рекомендации по выбору оборудования и режимам обработки

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан, исследован и опытно опробован технологический процесс изготовления деформированных полуфабрикатов из сплава системы Co-Cr-Mo в виде круглого длинномерного проката различного размерного сортамента (диаметром 18 – 40 мм).

2. С применением комплекса физического моделирования Gleeble 3800 исследовано реологическое поведение сплава системы Co-Cr-Mo и получены экспериментальные данные о сопротивлении деформации и эволюции микроструктуры сплава в интервале температур 1000 – 1200 °C при скоростях деформации 1, 10 и 50 с⁻¹. Установлено, что благоприятными температурно-скоростными условиями горячей деформации сплава являются скорости деформации от 1 до 5 с⁻¹ в температурном интервале 1150 – 1200 °C при высоких обжатиях, с уменьшением величины обжатия ($e \leq 0,2$) целесообразно обеспечить значения скорости деформации не менее 20 с⁻¹ и температуры более 1150 °C.

3. Предложены формулы для аналитического расчёта поворота вектора скорости течения металла с учетом цикличности процесса РСП. Показано, что для повышения деформируемости металла при РСП необходимо ограничение углов поворота вектора скорости течения и снижение их градиента по сечению заготовки, что может быть реализовано за счет увеличения количества проходов при прокатке. Разработана рациональная калибровка рабочих валков с ограниченной длиной калибрующего участка для многопроходных режимов прокатки, обеспечивающая снижение уровня энергосиловых параметров на 12 – 25 % и цикличности процесса не менее, чем 20 %.

4. С применением программного комплекса QForm определены режимы изотермическойковки и многопроходной радиально-сдвиговой прокатки, обеспечивающие благоприятные температурно-скоростные и деформационные параметры обработки. Показано, что при РСП возможно эффективное управление температурным полем деформируемой заготовки, при этом наиболее значимыми

технологическими параметрами, оказывающими влияние на распределение температуры в прутке, являются температура нагрева исходной заготовки и частота вращения рабочих валков.

5. Выполнена полномасштабная экспериментальная отработка режимов горячей пластической деформации и термической обработки в условиях опытно-промышленного производства и разработана схема технологического процесса, показавшая высокую степень технологической готовности разработанных решений. Мультиосевая изотермическая ковка при температуре 1200 °С с применением подогреваемого инструмента (до 950 °С) и промежуточными подогревами пригодна для получения предварительно деформированных заготовок сплава Co-28Cr-6Mo. Последующая многопроходная РСП в интервале температур 1150 – 1180 °С и частоте вращения валков 25 – 60 об/мин обеспечивает получение качественных длинномерных прутков с мелкозернистой структурой.

6. Изучены процессы формирования микроструктуры и свойств сплава Co-28Cr-6Mo на основных этапах обработки. Химический состав, микроструктура и механические свойства конечных прутков из сплава системы Co-Cr-Mo удовлетворяют требованиям ГОСТ Р ИСО 5832-12-2009, что позволяет использовать деформированные полуфабрикаты из биомедицинского сплава системы Co-Cr-Mo для изготовления компонентов высоконагруженных имплантатов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ

1. **Kin T.**, Gamin Y., Galkin S., Mahmoud Alhaj Ali A., Khakimova A., Skugorev A. Evolution of Microstructure, Phase Composition, and Mechanical Properties During Thermomechanical Treatment of Co-Cr-Mo Alloy // J. Manuf. Mater. Process. – 2025. – Vol. 9. – P. 110. DOI: 10.3390/jmmp9040110, (*перечень ВАК, Scopus, WoS*).

2. Gamin Y., **Kin T.**, Mahmoud Alhaj Ali, A. [et al.] Effect of Aging on Microstructure and Mechanical Properties of Biomedical Co-28Cr-6Mo Alloy Processed by Radial Shear Rolling // J. of Materi Eng and Perform. – 2025. DOI: 10.1007/s11665-025-11546-2, (*перечень ВАК, Scopus, WoS*).

3. Скугорев А.В., Карашаев М.М., Галкин С.П., Гамин Ю.В., **Кин Т.Ю.**, Кулешова, Н.А. Особенности изготовления деформированных полуфабрикатов из слитков сплава системы Co-Cr-Mo, полученных с различной скоростью кристаллизации //Металлург. – 2025. – № 4. – С. 72–79. Перевод: Skugorev A.V., Karashaev M.M., Galkin S.P., Gamin Yu.V., **Kin T.Yu.**, Kuleshova N.A. Production of deformed semi-finished products from Co–Cr–Mo alloy ingots obtained with varying crystallization rates // Metallurgist. – 2025. – 69. – pp. 552–562. (*перечень ВАК, Scopus, WoS*).

4. Галкин С.П., Кулешова Н.А., Махмуд А.А.А., **Кин Т.Ю.**, Гамин Ю.В., Гизатулин Д.Ш., Падалко А.Г. Модернизация калибровки валков для многопроходной радиально-сдвиговой прокатки сплава медицинского применения на основе кобальта // Металлург. – 2024. – № 9. – С.83–89. Перевод: Galkin S.P., Kuleshova N.A., Mahmoud A.A.A., **Kin T.Yu.**, Gamin Yu.V., Gizatulin D.S., Padalko A.G. Modernization of roll calibration for the multipass radial shear rolling of cobalt-based alloy for medical applications // Metallurgist. – 2025. – 68. – pp. 1371–1381 (*перечень ВАК, Scopus, WoS*).

5. Gamin Y., **Kin T.**, Galkin S., Skugorev A., Karashaev M., Mahmoud Alhaj Ali A. Formation of Microstructure and Mechanical Properties of Co-Cr-Mo Alloy by Hot

Forging and Subsequent Radial Shear Rolling // Met. Mater. Int. – 2024. DOI: 10.1007/s12540-024-01791-w (*перечень ВАК, Scopus, WoS*).

6. Galkin S., **Kin T.**, Gamin Y., Aleshchenko A., Karpov B. Review of scientific-applied research and industrial application of radial shear rolling technology // CIS Iron and Steel Review. – 2024. – Vol. 27. – P. 35–47. DOI: 10.17580/cisr.2024.01.06 (*перечень ВАК, Scopus, WoS*).

7. Гамин Ю.В., **Кин Т.Ю.**, Галкин С.П., Махмуд Альхадж Али А., Карашаев М.М., Падалко А.Г. Анализ эволюции микроструктуры сплава Co-28Cr-6Mo в процессе горячей деформации // Металлы. – 2023. – №6. – С. 59–64. Перевод: Gamin Y.V., **Kin T.Y.**, Galkin S.P., Mahmoud Alhaj Ali A., Karashaev M.M., Padalko A.G. Analysis of the Microstructural Evolution of a Co–28Cr–6Mo Alloy during Hot Deformation // Russ. Metall. – 2023. – Vol. 2023. – P. 1628–1632. DOI: 10.1134/S003602952311006X (*перечень ВАК, Scopus, WoS*).

8. Gamin Y.V., Skugorev A.V., Karashaev M.M., **Kin T.Y.**, Galkin S.P., Mahmoud Alhaj Ali A., Cheverikin V.V. Analysis of Microstructure Evolution of Co-Cr-Mo Alloy during Isothermal Forging // Metals. – 2023. – Vol. 13, № 9. – P. 1583. DOI: 10.3390/met13091583 (*перечень ВАК, Scopus, WoS*).

9. **Kin T.**, Gamin Y., Galkin S., Skugorev A.V. Numerical simulation of workpiece temperature field during radial shear rolling of biomedical Co-Cr-Mo alloy // Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. – 2023. – Vol. 31. DOI: 10.1088/1361-651X/acdcac (*перечень ВАК, Scopus, WoS*).

10. Галкин С.П., Гамин Ю.В., **Кин Т.Ю.**, Костин С.А. Экспериментальное опробование радиально-сдвиговой прокатки для получения деформированного сплава системы Co - Cr – Mo // Черные металлы. – 2023. – № 9. – С. 47–53. Перевод: Galkin S., Gamin Y., **Kin T.**, Kostin S. Experimental testing of radial-shear rolling to obtain a deformed alloy of the Co-Cr-Mo system // Chernye Metally. – 2023. – P. 47–53. DOI: 10.17580/chm.2023.09.08 (*перечень ВАК, Scopus*).

11. Гамин Ю.В., Коротницкий А.В., Кин Т.Ю., Галкин С.П., Костин С.А., Тихомиров Е.О. Разработка температурно-скоростных режимов горячей

деформации сплава Co - 28Cr - 6Mo на основе карт пластичности // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2022. – Т. 65, № 11. – С. 786-797. Перевод: Gamin Y., Korotitskiy A., **Kin T.**, Galkin S., Kostin S., Tikhomirov E. Development of Temperature-Rate Modes of Hot Deformation of the Co-28Cr-6Mo Alloy Based on Processing Maps // Steel in Translation. – 2023. – Vol. 52. – P. 1027–1036. DOI: 10.3103/S0967091222110079 (*перечень ВАК, Scopus*).

12. Способ получения прутков круглого сечения из сплава Co-Cr-Mo с бимодальной градиентной структурой: пат. 2838273 Рос. Федерация: В21В 1/18 (2024.08); В21В 3/00 (2024.08); С22F 1/10 (2024.08); С22F 1/11 (2024.08) / Галкин С.П., Гамин Ю.В., **Кин Т.Ю.**, Махмуд Алхаж А. А.; – № 2024126589; заявл. 10.09.2024; опубл. 14.04.2025, Бюл. № 11.– 12 с.

13. Способ получения длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов системы кобальт-хром-молибден для изготовления медицинских имплантатов: пат. 2854033 Рос. Федерация: А61L 27/045 (2025.08); С22С 19/07 (2025.08); С22F 1/10 (2025.08); С22F 1/11 (2025.08) / Костин С.А., Костин М.И., Галкин С.П., Гамин Ю.В., **Кин Т.Ю.** – № 2 2024137950; заявл. 17.12.2024; опубл. 29.12.2025, Бюл. № 1.– 11 с.