

На правах рукописи



Боткин Александр Васильевич

**НАУЧНО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ПРОЦЕССОВ УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Москва – 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет».

Научный консультант доктор физико-математических наук, профессор
Валиев Руслан Зуфарович

Официальные
оппоненты Столяров Владимир Владимирович, доктор
технических наук, профессор, Федеральное
государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А. А. Благонравова
Российской академии наук;

Тулупов Олег Николаевич, доктор технических
наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский
государственный технический университет
им. Г. И. Носова», кафедра «Обработка металлов
давлением»;

Шаталов Роман Львович, доктор технических
наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Московский
государственный машиностроительный
университет (МАМИ)» /Университет
машиностроения/, кафедра «Машины и
технологии обработки металлов давлением».

Ведущая организация ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный
университет» (национальный исследовательский
университет).

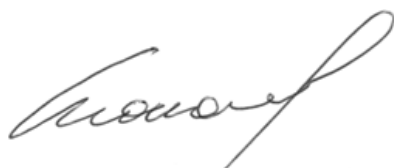
Защита состоится «26» ноября 2014 г. в 14:00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.132.09 при ФГАОУ ВПО НИТУ «МИСиС» по
адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке при ФГАОУ ВПО НИТУ
«МИСиС» и на сайте (<http://www.misis.ru/tabid/176/ArticleID/1904/>).

Справки по телефону: 8-(495)-955-01-27
e-mail: pdss@ misis.ru

Автореферат разослан « » июля 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ионов
Сергей Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Отличие процессов переноса вещества и энергии в ультрамелкозернистых (УМЗ) материалах и их крупнозернистых аналогах обуславливает совершенно необычные, увеличенные (в 1,5–3 раза) прочностные свойства УМЗ материалов. Разработка и использование УМЗ металлических объемных конструкционных материалов, обладающих высоким комплексом физико-механических свойств, имеет большое значение для ускоренного развития металлургической, машиностроительной и других отраслей промышленности.

Решение задачи массового производства таких материалов на высоком и современном техническом уровне является важной отраслевой и государственной проблемой.

Для выпуска массовой продукции из УМЗ материалов наиболее перспективны деформационные технологии, основанные на методах интенсивной пластической деформации (ИПД), в частности, методах углового прессования (УП).

В процессах УП реализуется деформация заготовки близкая к сдвигу, когда она продавливается через область сопряжения каналов с приблизительно равными проходными поперечными сечениями и выполненных в специальном цельном или составном инструменте. Заготовка продавливается через область сопряжения каналов, подвергаясь незначительной распрессовке и последующему прессованию, из-за несколько увеличенного проходного поперечного сечения угловой области канала инструмента. Такой инструмент позволяет многократно деформировать заготовку при температурах ниже температуры рекристаллизации и достигать высоких значений деформации до $\epsilon=4-8$, что является одним из необходимых условий формирования ультра мелкозернистой структуры материала.

Для перехода от разработанных за последние годы лабораторных технологий УП к промышленным технологиям требуется дальнейшее развитие теории и технологии УП, развитие научно-методологического обеспечения проектирования этих технологий.

Современными направлениями развития технологий УП являются: повышение производительности установок непрерывного УП с обеспечением качества длинномерных УМЗ полуфабрикатов; решение задач по расширению сортамента длинномерных УМЗ полуфабрикатов; расширение круга обрабатываемых материалов, включая малопластичные и труднодеформируемые.

Научно-методологическое обеспечение проектирования технологических процессов УП УМЗ заготовок и изделий характеризуется следующими основными недостатками, сдерживающими использование методов УП в практике промышленного пластического структурообразования металлов.

Модели деформационных и силовых параметров процессов УП, представленные в литературе, не позволяют рассчитывать скорость

деформирования по необходимой скорости деформации металла, удельную силу деформирования, момент с учетом упрочнения металла, формы заготовки, сужения выходного канала матрицы, при различных углах пересечения каналов инструмента и неизвестном противодавлении в выходном канале, при различных трибологических условиях во входном и выходном каналах инструмента и скоростях обработки.

Методики исследования пластичности и прогнозирования разрушения металла с высоким уровнем накопленной пластической деформации в термомеханических условиях деформации, реализующихся в процессах УП, методика прогнозирования качества УМЗ продукции, базирующаяся на взаимосвязи механических свойств и накопленной металлом поврежденности в процессах УП, не разработаны.

Многие исследователи отмечают, что с увеличением поперечного сечения обрабатываемой заготовки в процессе УП не удастся получить УМЗ структуру такой же дисперсности, как при относительно малом поперечном сечении заготовки. Обусловлено это, предположительно, неблагоприятными термомеханическими условиями деформации металла, реализующимися в процессе УП заготовок с увеличенным поперечным сечением.

Однако исследования в этом направлении ни для одного способа УП, металла или сплава, подвергаемого УП, на системном уровне не проводились.

Последние 10–12 лет методы УП стали использоваться для получения УМЗ металлов и сплавов. В настоящее время они входят в стадию создания промышленных технологий и промышленного оборудования для массового производства УМЗ материалов, но научно-методологическое обеспечение проектирования технологических процессов УП УМЗ заготовок и изделий, по причине не разработанности указанных выше моделей и методик, является неудовлетворительным.

Поэтому разработка моделей деформационных и силовых параметров, учитывающих упрочнение металла и форму деформирующего канала инструмента, моделей поврежденности металла, методики исследования пластичности металла в условиях деформации, реализующихся в процессах УП, методики учета влияния поперечного размера заготовки на термомеханические условия деформации металла является актуальной научной проблемой, решение которой необходимо для развития научно-методологического обеспечения проектирования процессов УП и перехода от лабораторных технологий к промышленным технологиям УМЗ массовой продукции высокого качества.

Современные направления развития процессов УП и результаты анализа литературных данных предопределили постановку цели и формулировку задач диссертационной работы.

Цель работы – развитие научно-методологического обеспечения проектирования технологий углового прессования для промышленного получения ультра мелкозернистых металлических заготовок.

Для достижения поставленной в работе цели решались следующие **основные задачи:**

1. Разработка и экспериментальная проверка моделей для расчета деформационных, силовых параметров процессов УП (равноканального углового прессования (РКУП), РКУП в параллельных каналах (РКУП-ПК), РКУП по схеме Конформ (РКУП-К), выдавливание, совмещенное с РКУП-ПК) штучных и длинномерных заготовок с учетом необходимой скорости деформации и упрочнения металла, формы канала, сужения выходного канала матрицы, угла пересечения каналов, различных трибологических условий во входном и выходном каналах инструмента, противодавления в выходном канале инструмента.
2. Разработка экспериментально-измерительного комплекса для исследования пластичности металла в термомеханических условиях деформации, реализующихся в процессах УП, путем совместного кручения и сжатия (растяжения), с программным изменением угловой и осевой скоростей деформирования образцов.
3. Разработка методик исследования пластичности и прогнозирования разрушения металла в термомеханических условиях деформации, реализующихся в процессах многопроходного УП, на основе результатов испытаний совместным кручением и сжатием (растяжением), с программным изменением угловой и осевой скоростей деформирования образцов.
4. Теоретическое и экспериментальное исследование, с использованием разработанных моделей, методики и комплекса, влияния поперечных размеров заготовки на деформационные, силовые параметры, термомеханические условия деформации сплава ВТ-6, стали 10 в процессах УП.
5. Разработка алгоритмов научно-обоснованного проектирования процессов УП ультрамелкозернистых металлических заготовок.
6. Использование результатов исследований для разработки опытно-промышленных технологий получения УМЗ металлических изделий с высоким уровнем физико-механических, эксплуатационных свойств, а также в учебном процессе при проведении занятий, выполнении студентами исследовательских курсовых, дипломных проектов.

Научная новизна работы:

- получили развитие основные положения теории и технологии процессов УП, заключающиеся в разработке методологической основы исследования взаимосвязи механических свойств получаемых УП заготовок и накопленной металлом поврежденности;
- математические модели для расчета силовых параметров ряда процессов УП (РКУП; РКУП-ПК; РКУП-К; выдавливание, совмещенное с РКУП-ПК), позволяющие повысить точность расчета параметров за счет учета скорости деформации и упрочнения металла, круглой формы заготовки и канала инструмента, геометрических размеров сужающегося выходного канала матрицы и угла пересечения каналов, различных трибологических условий во входном и выходном каналах инструмента, противодавления в выходном канале инструмента;
- выявлена взаимосвязь напряженного состояния заготовки и предельного значения показателя поврежденности металла в модели Кокрофта-Латама,

которая не учитывалась ранее и позволившая уточнить значения предельного показателя поврежденности металла с учетом показателя σ_1/σ_i напряженного состояния;

– уточненная модель разрушения металла - модифицированная модель Кокрофта-Латама и разработанная на ее основе методика, обеспечивающие повышение точности прогнозирования разрушения металла с высоким уровнем накопленной деформации в процессах многопроходного УП, за счет впервые формализованного учета влияния напряженного состояния заготовки на предельное значение показателя поврежденности металла;

– методика определения пластичности металла, базирующаяся на установленном и впервые количественно описанном влиянии отношения осевой и угловой скоростей деформирования образца при испытании совместным кручением-сжатием (растяжением) на показатели σ/T , σ_1/σ_i его напряженного состояния и позволяющая исследовать пластичность металла в термомеханических условиях деформации, реализующихся в процессах многопроходного УП;

– методика исследования пластичности и прогнозирования разрушения металла на основе результатов испытаний совместным кручением и сжатием (растяжением), с программным изменением угловой и осевой скоростей деформирования образцов, впервые учитывающая изменение структуры металла в термомеханических условиях деформации, реализующихся в процессах УП и обеспечивающая повышение точности прогнозирования разрушения металла;

– алгоритмы проектирования процессов РКУП штучной заготовки и РКУП-К длинномерной заготовки, впервые позволяющие обоснованно осуществлять и определять: выбор оборудования и скорость деформирования; геометрические размеры и параметры каналов инструмента; геометрические размеры инструмента по условиям реализации процесса УП и прочности.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Математические модели для деформационных, силовых параметров ряда процессов УП (РКУП; РКУП-ПК; РКУП-К; выдавливание, совмещенное с РКУП-ПК), позволяющие рассчитывать силу деформирования, крутящий момент, скорость деформирования с учетом необходимой скорости деформации и упрочнения металла, круглой формы заготовки и канала, геометрических размеров сужающегося выходного канала матрицы и угла пересечения каналов, различных трибологических условий во входном и выходном каналах инструмента, наличия (отсутствия) противодействия в выходном канале инструмента;

2. Уточненная модель разрушения металла – модифицированная модель Кокрофта-Латама, на основе которой предложена методика прогнозирования разрушения металла с высоким уровнем накопленной деформации в процессах многопроходного УП, обеспечивающая повышение точности прогнозирования разрушения металла, за счет учета влияния напряженного состояния заготовки на предельное значение показателя поврежденности металла;

3. Методика исследования пластичности металла в термомеханических условиях деформации, реализующихся в процессах многопроходного УП, на основе результатов испытаний кручением совместным со сжатием (растяжением).

Практическая значимость работы. На основе разработанных методик расчета деформационных, силовых параметров процессов УП, прогнозирования разрушения металла; учета поперечных размеров заготовки при определении температурно-скоростного режима РКУП:

- впервые разработан, изготовлен и опробован экспериментально-измерительный комплекс для исследования пластичности металла в термомеханических условиях деформации, реализующихся в процессах УП, путем совместного кручения и сжатия (растяжения), с программным изменением угловой и осевой скоростей деформирования образцов;
- модернизировано и опробовано опытно-экспериментальное оборудование для РКУП-К с горизонтальным расположением исполнительного механизма с меньшей материалоемкостью и с большей относительной энерговооруженностью в сравнении с ранее использованным оборудованием;
- разработаны и опробованы рекомендации по применению моделей для расчета деформационных, силовых параметров ряда процессов УП;
- разработаны и опробованы рекомендации по применению методики прогнозирования разрушения металла для разработки новых и рационализации действующих процессов УП, а также процессов холодной объемной штамповки (ХОШ) крепежа;
- разработаны и опробованы рекомендации по применению методики исследования пластичности металла в термомеханических условиях деформации, реализующихся в процессах многопроходного УП, на основе результатов испытаний совместным кручением и сжатием (растяжением);
- разработаны и опробованы рекомендации по учету влияния поперечного размера исходной заготовки при определении температуры нагрева исходной заготовки, сужения выходного канала инструмента для РКУП УМЗ цилиндрической заготовки;
- сформирована и использована база данных для широко применяемых в производстве крепежа марок сталей, необходимая для прогнозирования разрушения металла при разработке процессов УП и ХОШ крепежа в условиях ОАО «БелЗАН»;
- разработаны и опробованы технологические рекомендации для получения заготовок из УМЗ сплава ВТ-6 и последующей изотермической штамповки УМЗ изделий авиационного назначения, в производственных условиях ОАО «УМПО».

Новизна технологических и конструкторских разработок защищена двумя патентами.

Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе при проведении практических и лабораторных работ студентов разных специальностей для изучения методов деформационного нано-

структурирования на кафедрах ФГБОУ ВПО «УГАТУ», ФГБОУ ВПО «МГТУ» и других вузов.

Обоснованность выносимых на защиту научных положений, выводов и рекомендаций. Расчеты НДС проводились с использованием теории пластичности, механики сплошных сред, методик ОМД, а также современных компьютерных программ численного моделирования процессов пластического формоизменения. Обоснованность расчетов вытекает из их соответствия экспериментальным данным. Достоверность полученных результатов структурных исследований подтверждается использованием современного исследовательского оборудования (JEM2100, JSM6390, ДРОН-3М) и методов исследования, публикацией результатов в реферируемых журналах.

Работа выполнялась в рамках грантов РФФИ (№ 12-08-01104, № 12-08-97024-р-поволжье-а) и проектов МНТЦ (1999–2012г.г.). Автор также выражает благодарность Лаборатории механики перспективных массивных наноматериалов для инновационных инженерных приложений Санкт-Петербургского государственного университета за оказанную поддержку в рамках гранта Правительства РФ; договор 14.B25.31.0017.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах: Международной научно-технической конференции «Современные достижения в теории и технологии обработки металлов» (Санкт-Петербург, 2007); Международном симпозиуме «Объемные наноматериалы» (Уфа, 2007); Международной научно-технической конференции «XIX Уральская школа металловедов-термистов» (Екатеринбург, 2008); Международной конференции по наноматериалам, полученным интенсивной пластической деформацией «NanoSPD4» (Germany, Goslar, 2008); Российской научно-технической конференции «Мавлютовские чтения» (Уфа, 2008); Всероссийской молодежной научной конференции (Уфа, 2009); Международном симпозиуме «Объемные наноматериалы» (Уфа, 2010); Международной научно-технической конференции «Наноматериалы, полученные интенсивной пластической деформацией в условиях высоких давлений» (Украина, Судак, 2010); Пятом международном научно-практическом семинаре «Уральская научно-педагогическая школа по обработке металлов давлением им. А. Ф. Головина. Модернизация и инновации в металлургии и машиностроении» (Екатеринбург, 2011); Международном симпозиуме «Объемные наноматериалы» (Уфа, 2011); Международной научно-технической конференции, XXI Уральская школа металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» (Магнитогорск, 2012).

Личный вклад автора состоит в организации и постановке экспериментальных и теоретических исследований, непосредственном участии в их проведении, в анализе результатов исследований, в обобщении и обосновании всех защищаемых положений, внедрении результатов исследований в производство.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, библиографического списка, включающего 221 наименование, и четырех приложений. Диссертация изложена на 283 страницах машинописного текста, содержит 133 рисунка и 23 таблицы.

Публикации. Основные результаты диссертации отражены в 30 печатных работах, в том числе 24 в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК и 2 патентах на изобретение.

Состояние вопроса. Большой вклад в исследования процессов пластического структурообразования простым сдвигом с использованием схемы РКУП внесла минская научная школа под руководством Сегала В. М.

В начале 90-х годов этот способ был развит Валиевым Р. З. с соавторами и впервые применен как ИПД металлов для получения структур с субмикроструктурными и нанометрическими размерами зерен.

Также в ряде работ Бриджмена П. В., Колмогорова В. Л., Тюрина В. А., Богатова А. А. и др. отмечается положительное воздействие сдвиговой деформации на измельчение структуры и свойства изделий. Влияние больших деформаций на структуру и свойства активно исследуется коллективом под руководством Рыбина В. В., используя, преимущественно, методы термомеханической обработки (ТМО).

Методам подготовки структуры заготовок для сверхпластической деформации посвящен ряд работ Смирнова О. М., Кайбышева О. А., Утяшева Ф. З.

Изучению напряженно-деформированного состояния при РКУП с использованием различных методов исследования посвящены работы В. Л. Бережного, О. А. Ганаго, Г. И. Рааба, Е. Н. Сосенушкина.

В работах А. М. Дмитриева, А. Н. Красновского, Н. М. Русина, Л. А. Рябичевой, Н. А. Шестакова отмечается эффективность использования технологий ИПД, в том числе РКУП, для уплотнения некомпактных структур.

Влияние контактного трения при РКУП рассмотрено в работах А. М. Золотова, Р. А. Паршикова.

В работах Сегала В.М. с соавторами, с присущими методу линий скольжения допущениями, получены модели – формулы для расчета деформации, удельной силы деформирования, длины дуги захвата в процессах РКУП и прессования по схеме Конформ. Применение этих моделей, как показал сравнительный анализ, характеризуется погрешностью расчета силовых параметров указанных процессов относительно экспериментальных данных, для случая круглой заготовки, превышающей 20% и невозможностью расчета некоторых геометрических параметров инструмента для процесса Конформ при неизвестном противодавлении в выходном канале.

Фундаментальные исследования деформируемости металлов при обработке давлением, исследования, направленные на создание моделей поврежденности и разрушения металла при холодной пластической деформации, были выполнены в работах С. И. Губкина, М. А. Зайкова и В. Н. Перетягко, Г. А. Смирнова-Аляева и В. М. Розенберга, В. Л. Колмогорова, А. А. Богатова, С. В. Смирнова, В. А. Огородникова, Г. Д. Деля, Л. Д. Соколова,

В. А. Скуднова, В. М. Грешнова, Г. Л. Колмогорова, В. Н. Трофимова и др. отечественных и зарубежных авторов.

Результаты исследования поврежденности металла с не высоким уровнем накопленной деформации $\varepsilon_i \leq 1$ в процессах УП представлены в немногочисленных работах, в основном зарубежных авторов, и ограничены, как правило, качественным прогнозированием области разрушения металла при обработке за один проход.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации. Определены цели исследований; изложены научная новизна и практическая значимость работы; сформулированы основные положения, выносимые на защиту; приведены сведения об апробации работы и публикациях, структуре и объеме диссертации.

В первой главе подробно представлены разработанные модели деформационных и силовых параметров процессов УП (РКУП, РКУП-К, РКУП-ПК, выдавливание, совмещенное с РКУП-ПК).

Экономическая целесообразность получения УМЗ заготовок в процессе РКУП обуславливает использование матрицы с круглым выходным сужающимся каналом. Изготовление матриц с круглым каналом отличается меньшими производственными затратами и большей технологичностью в сравнении с другими матрицами. При этом поверхности сопряжений по внешнему и внутреннему углам выполняют с радиусами приблизительно равными нулю.

Круглое сечение канала инструмента обуславливает иное напряженно деформированное состояние заготовки и, следовательно, иные деформационные и силовые параметры процесса РКУП при одинаковых размерах поперечных сечений каналов (диаметр круга и сторона квадрата).

В связи с этим использование решений, полученных в работах В. М. Сегала методом линий скольжения и др. авторов для анализа процесса РКУП в матрице с круглым каналом, представляется некорректным.

Моделирование процесса РКУП в программном комплексе DEFORM 3D и применение метода баланса работ позволили разработать схему процесса (рисунок 1) РКУП.

Для получения моделей деформационно-силовых параметров углового прессования использовали энергетический подход и методику Ерманка М.З., сущность которой заключается в следующем.

Скорость деформации металла, необходимая при составлении баланса мощностей, (среднее значение) определяется как отношение полученной металлом деформации ко времени пребывания металла в очаге пластической деформации. Время пребывания металла в очаге пластической деформации определяют отношением объема очага деформации к секундному расходу металла.

При этом формализация объема очага деформации выполняется по результатам экспериментальных исследований или моделирования течения металла в процессе УП.

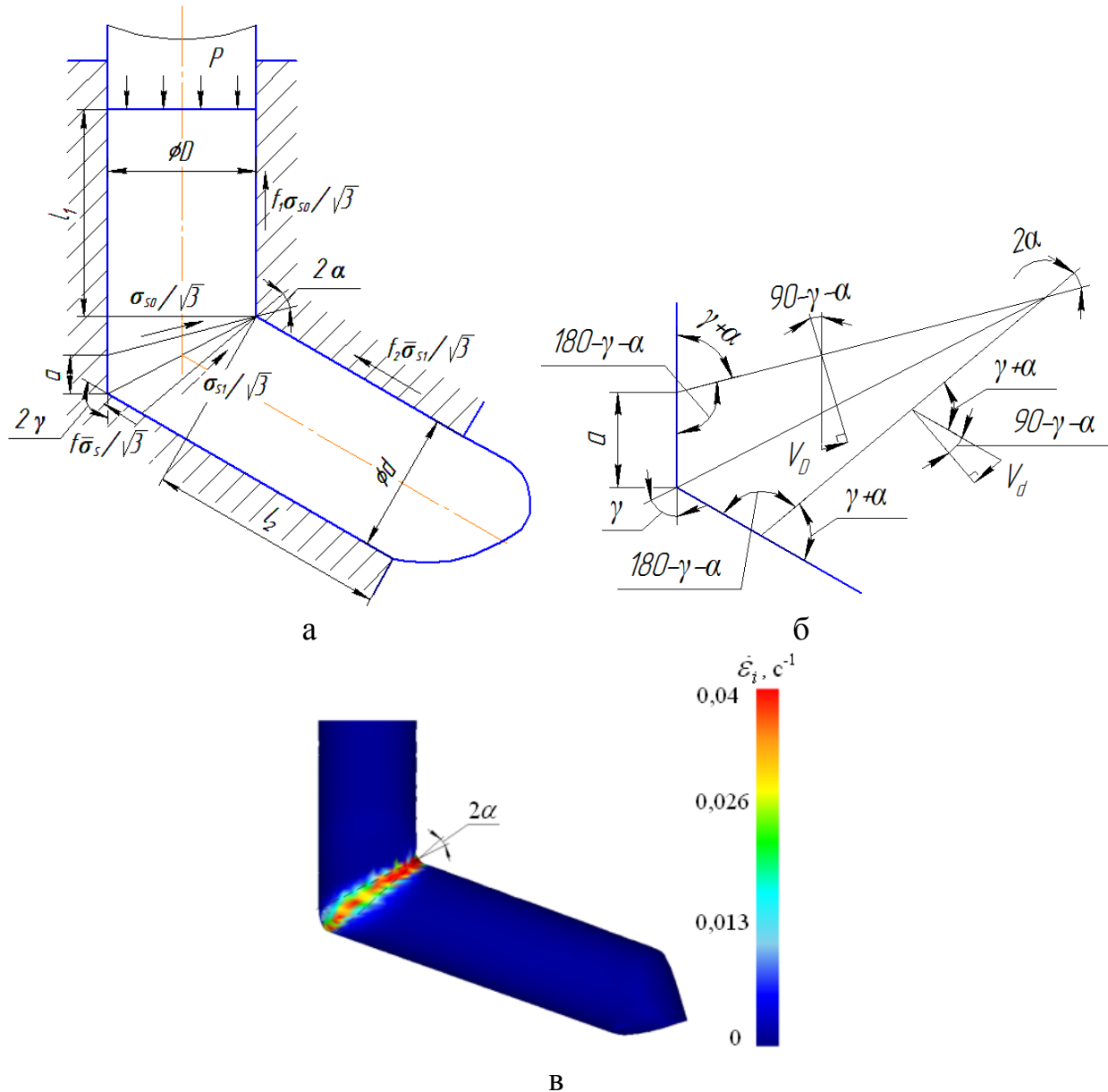


Рисунок 1 – Схема к расчету удельной силы углового прессования цилиндрической заготовки в матрице с сужающимся выходным каналом: а – схема РКУП; б – схема к расчету скоростей сдвига v_D , v_d ; в – очаг пластической деформации, определенный моделированием

В работе были получены модели деформационно-силовых параметров процесса РКУП.

Для средней скорости деформации в области сдвига очага деформации:

$$\dot{\epsilon}_{i,1} = \frac{2 \cos \gamma \sin(\gamma + \alpha) \cdot v}{\sqrt{3} D \sin \alpha}, \quad (1)$$

где v - скорость деформирования.

Для удельной силы углового прессования цилиндрической заготовки в матрице с сужающимся выходным каналом:

$$p = \frac{\bar{\sigma}_s \operatorname{ctg} \gamma}{\sqrt{3}} + \bar{\sigma}_{s1} \ln(D/d) + \frac{4f_1 \sigma_{s0}}{\sqrt{3}} \left(\frac{l_1}{D} + \frac{1}{2} \left(\operatorname{ctg} \gamma - \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma \sin(\gamma + \alpha)} \right) \right) +$$

$$+ \frac{4f \bar{\sigma}_s \sin \alpha}{\sqrt{3} \sin \gamma \sin(\gamma + \alpha)} + \frac{(\sigma_{s0} + \sigma_{s1})}{\sqrt{3}} \operatorname{ctg}(\gamma + \alpha) + \frac{f_2 \bar{\sigma}_{s1} (1 + D^2 / d^2)}{\sqrt{3}} \times$$

$$\times \left((D + d) / D^2 \sqrt{(D - d)^2 / 4 + l_2^2} + \operatorname{ctg} \gamma - \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma \sin(\gamma + \alpha)} \right), \quad (2)$$

где $\bar{\sigma}_s = (\sigma_{s0} + \sigma_{s1}) / 2$, $\bar{\sigma}_{s1} = (\sigma_{s1} + \sigma_{s2}) / 2$, σ_{s0} – начальное напряжение течения металла, σ_{s1} – напряжение течения металла на верхней границе области растяжения очага деформации, σ_{s2} – напряжение течения металла на нижней границе области растяжения очага деформации, f_1 – коэффициент трения входного канала матрицы и заготовки, f – коэффициент трения между металлом, находящимся в области сдвига, и матрицей, f_2 – коэффициент трения между металлом, находящимся в области растяжения, и матрицей.

Расчетная сила деформирования с приемлемой для практического использования точностью согласуется с силой (рисунок 2, таблица 1), измеренной при экспериментальном угловом прессовании цилиндрической заготовки из стали ШХ15 в матрице с сужающимся выходным каналом¹.

Модели (1) и (2), в отличие от ранее полученных в работах В. М. Сегала и др., позволяют рассчитывать удельную силу деформирования РКУП с учетом упрочнения металла, формы заготовки, сужения выходного канала матрицы, при различных углах пересечения каналов инструмента, при различных трибологических условиях и скоростях обработки.

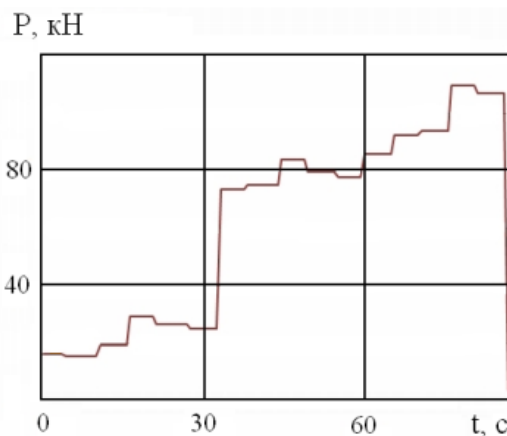


Рисунок 2 – Графическая зависимость силы углового прессования при температуре 500 °С предварительно отожженной заготовки от времени, полученная по результатам экспериментальных измерений

¹ Оснастка разработана и изготовлена в ИФПМ УГАТУ под руководством Рааба Г.И.

Таблица 1 – Параметры для расчета и результаты оценки и измерения силы углового прессования

$\sigma_{s0}, \sigma_{s1}, \sigma_{s2},$ МПа	$\alpha, \gamma,$ градус	$l_1, l_2,$ мм	f, f_1, f_2	$P_p,$ кН	$P_s,$ кН	$\Delta,$ %
420, 560, 580	7,5, 60	15, 40	0,13	110,5	110	0,45
420, 560, 580	7,5, 60	30, 40	0,13	125,3	120	4,4

P_s – максимальное значение силы, полученное опытным измерением, Δ – относительное отклонение расчетного и полученного опытным измерением значений сил.

Метод равноканального углового прессования в параллельных каналах, разработанный в ФГБОУ ВПО «УГАТУ» является перспективным развитием метода традиционного РКУП, ориентированным на повышение КИМ до 0,9, увеличение производительности процесса в 2 раза, и соответственно, на снижение себестоимости выпускаемой продукции из УМЗ материалов.

Матрицу для РКУП-ПК (рисунок 3), как правило, получают без закруглений по внешним углам канала матрицы, что обуславливает увеличение деформации заготовки за один проход до 25 % при одинаковых прочих характерных размерах круглых каналов.

В результате исследований процесса РКУП-ПК были получены модели деформационных и силовых параметров.

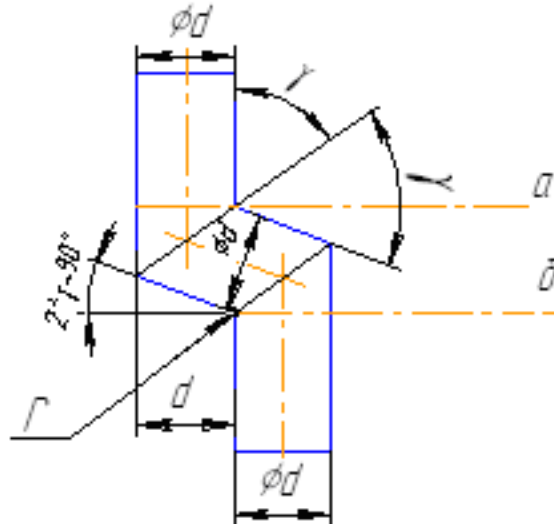


Рисунок 3 – Схема к расчету объема очага пластической деформации в канале матрицы с радиусами сопряжения $R=0$ и $r=0$

Для средней скорости деформации:

$$\bar{\varepsilon}_i = \frac{4vctg\gamma}{\sqrt{3}Bd}, \quad (3)$$

где $B = ctg\gamma + 1 / \cos(2\gamma - 90)$, v - скорость деформирования.

Для удельной силы РКУП-ПК:

$$p = \frac{4}{\sqrt{3}} \left(\bar{\sigma}_s \operatorname{ctg} \gamma + \sigma_{02} f_2 l_2 / d + \bar{\sigma}_s f \left(1 / \cos(2\gamma - 90) + \operatorname{ctg} \gamma \right) + \sigma_s f_1 l_1 / d \right), \quad (4)$$

где $\bar{\sigma}_s$ – среднее значение напряжения течения металла по очагу деформации, f_2 – коэффициент трения на входном участке матрицы, l_2 – длина входного участка матрицы, f – коэффициент трения на участке матрицы, ограничивающем очаг пластической деформации, σ_s – среднее напряжение течения металла перемещающегося в калибрующем участке матрицы, f_1 – коэффициент трения на калибрующем участке матрицы, l_1 – длина калибрующего участка матрицы.

Сила прессования, рассчитанная с учетом коэффициента трения, определенного в процессе прямого выдавливания, с приемлемой для практического использования точностью согласуются с силой, измеренной при деформировании методом РКУП-ПК цилиндрической заготовки сплава 6063 в канале круглого сечения.

В результате опытного измерения силы прессования заготовки при температуре 20 °С получили максимальное значение 187 кН (рисунок 4, б).

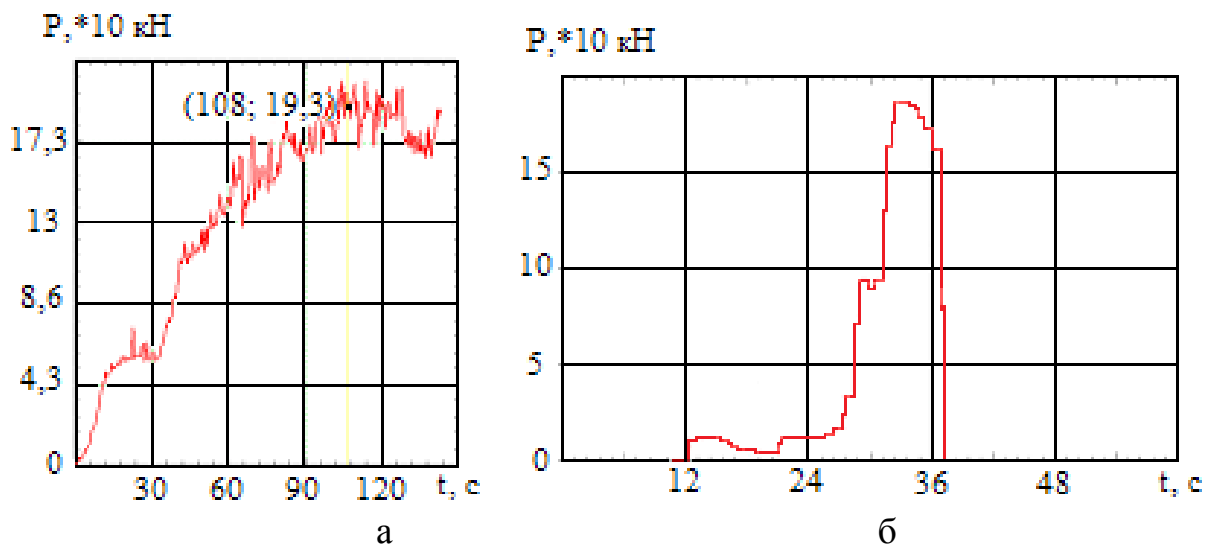


Рисунок 4 – Графические зависимости силы деформирования от времени:

а – по результатам моделирования, при $f_\sigma = \varphi(|\sigma_H|)$, $R = 0$, $r = 0$;

б – по результатам экспериментальных измерений

Сила, полученная в результате опытного измерения, отличается от расчетного значения с применением формулы (4) (рисунок 4, б и таблица 2) на 4,2 %, а от полученного численным моделированием на 7,2 % (рисунок 4, а).

Выдавливание, совмещенное с РКУП-ПК цилиндрической заготовки, является перспективным развитием метода РКУП-ПК и ориентировано, прежде всего, на увеличение производительности процесса УМЗ материалов в три и более раз.

Таблица 2 – Параметры для расчета и результаты оценки, измерения силы РКУП-ПК

$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_s , МПа	$\bar{\sigma}_s$, МПа	l_2 , мм	l_1 , мм	f_1 , f_2 , f_3	p , МПа	P , кН	P_3 , кН	Δ , %
94	293	193,5	35	10	0,21	719,8	179	187	4,2
94	293	193,5	70	10	0,21	809,5	201	193	4,1

Отличительная особенность выдавливания, совмещенного с РКУП-ПК – возможность реализации сдвига последовательно в трех очагах деформации, в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (рисунок 5) – при прямом выдавливании в матрице с не осесимметричным деформирующим участком и РКУП-ПК в двух пересекающихся каналах инструмента.

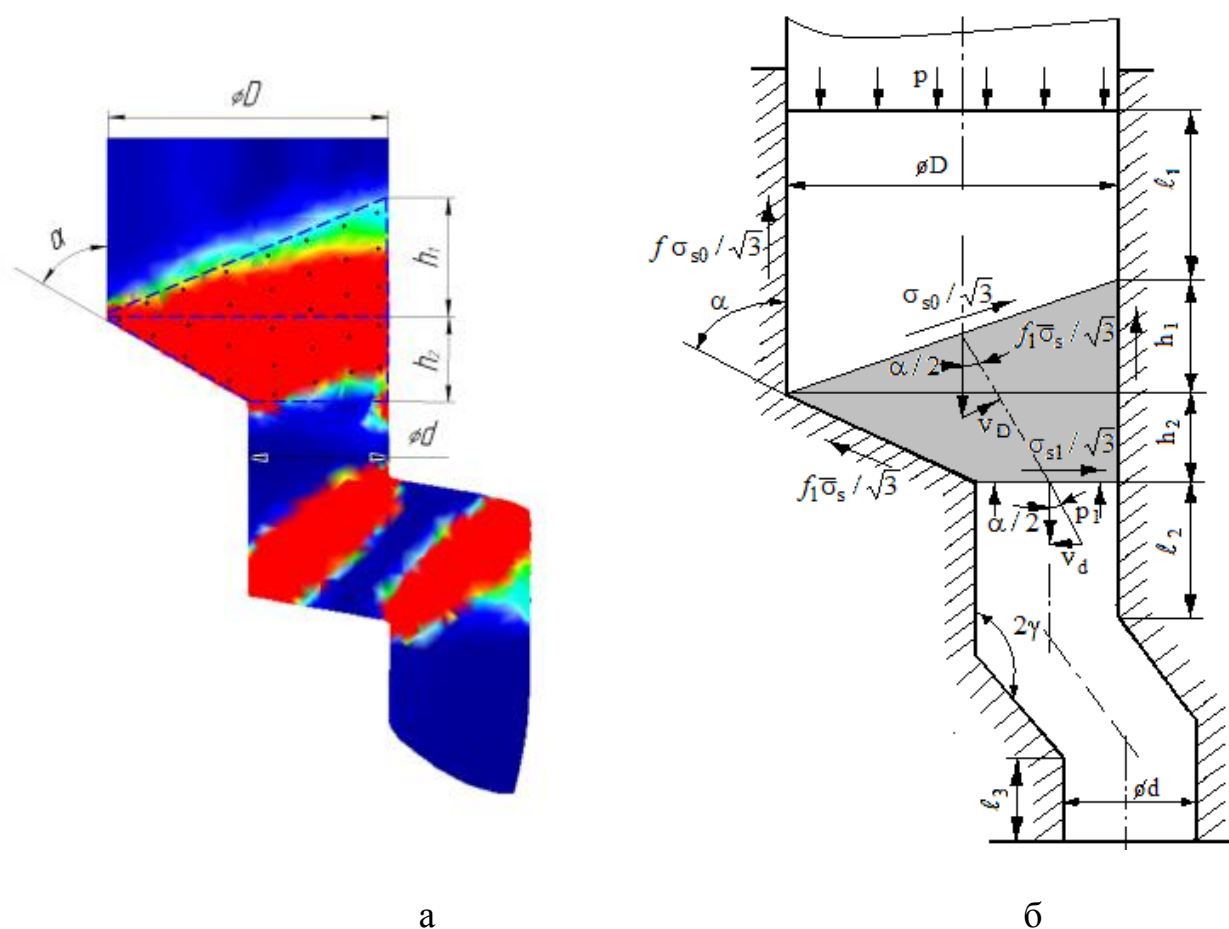


Рисунок 5 – Схема к расчету: а – объема очага пластической деформации; б – удельной силы выдавливания

Приравнивая мощность внешних сил мощности диссипации энергии, получили решения для деформационных и силовых параметров.

Для средней скорости деформации:

$$\bar{\dot{\varepsilon}} = 2 \ln(D/d) v_{\text{уст}} / A, \quad (5)$$

где $A = D^3 / d^2 \left((1 - \cos \alpha) / (2 \sin \alpha) + \operatorname{ctg} \alpha / 3 \right)$, $v_{\text{уст}}$ - скорость прессования.

Для удельной силы:

$$\begin{aligned} p = & 2\bar{\sigma}_s \ln(D/d) + \sigma_{s0} / \sqrt{3} \sin(\alpha/2) / \operatorname{arctg}((1 - \cos \alpha) / \sin \alpha) + \\ & + \sigma_{s1} / \sqrt{3} \operatorname{tg}(\alpha/2) + 4f\sigma_{s0} / \sqrt{3} (l/D + (1 - \cos \alpha) / (2 \sin \alpha)) + \\ & + f_1 \bar{\sigma}_s / \sqrt{3} (1/d^2 + 1/D^2) (D^2 (1 - \cos \alpha) / \sin \alpha + (D^2 - d^2) \operatorname{ctg} \alpha) + p_1 \end{aligned} \quad (6)$$

где f – коэффициент трения на входном (контейнер) участке матрицы, f_1 – коэффициент трения на не осесимметричном деформирующем участке матрицы, p_1 - удельная сила, рассчитываемая по формуле (4).

Расчетная сила с приемлемой для практического использования точностью согласуется с силой, измеренной при экспериментальном выдавливании, совмещенном с РКУП-ПК цилиндрической заготовки сплава 6063 в матрице с не осесимметричным деформирующим участком.

Максимальное значение силы, полученное опытным измерением, равно 421,8 кН и отличается от расчетного, с применением формулы (6) (таблица 3), значения силы на 11%.

Таблица 3 – Параметры для расчета силы выдавливания при температуре 100 °С

$\sigma_{s0}, \sigma_{s1}, \bar{\sigma}_s, \bar{\sigma}_{s3}, \bar{\sigma}_{s2},$ МПа	$\alpha,$ $\gamma,$ град	$l, l_1, l_2,$ мм	f, f_1, f_2, f_3, f_4	$P,$ МПа	$P,$ кН	$P_9,$ кН	$\Delta, \%$
68; 137; 102,5 142; 139,5	60; 50	20; 8; 8	0,12	663	468,5	421,8	11
68; 137; 102,5 142; 139,5	60; 50	40; 8; 8	0,12	676	477,6	432	10,5

P – значение силы, рассчитанное с применением формулы (6), P_9 – максимальное значение силы, полученное опытным измерением, Δ – относительное отклонение значений сил.

Метод равноканального углового прессования по схеме Конформ, реализованный в ФГБОУ ВПО «УГАТУ», в лабораторных и опытно-промышленных условиях, на основе недавно изготовленных установок является перспективным развитием метода традиционного РКУП, ориентированным на снижение сил прессования, увеличение

производительности, снижение энергозатрат процесса деформирования, и соответственно, на снижение себестоимости выпускаемой продукции из УМЗ материалов.

Метод РКУП-К, реализует принцип воздействия активных сил трения на боковую поверхность заготовки.

Определение необходимого крутящего момента на валке 1 (рисунок 6), деформационных параметров процесса, нагрузок на инструмент является важным этапом расчета технологии обработки металлов давлением.

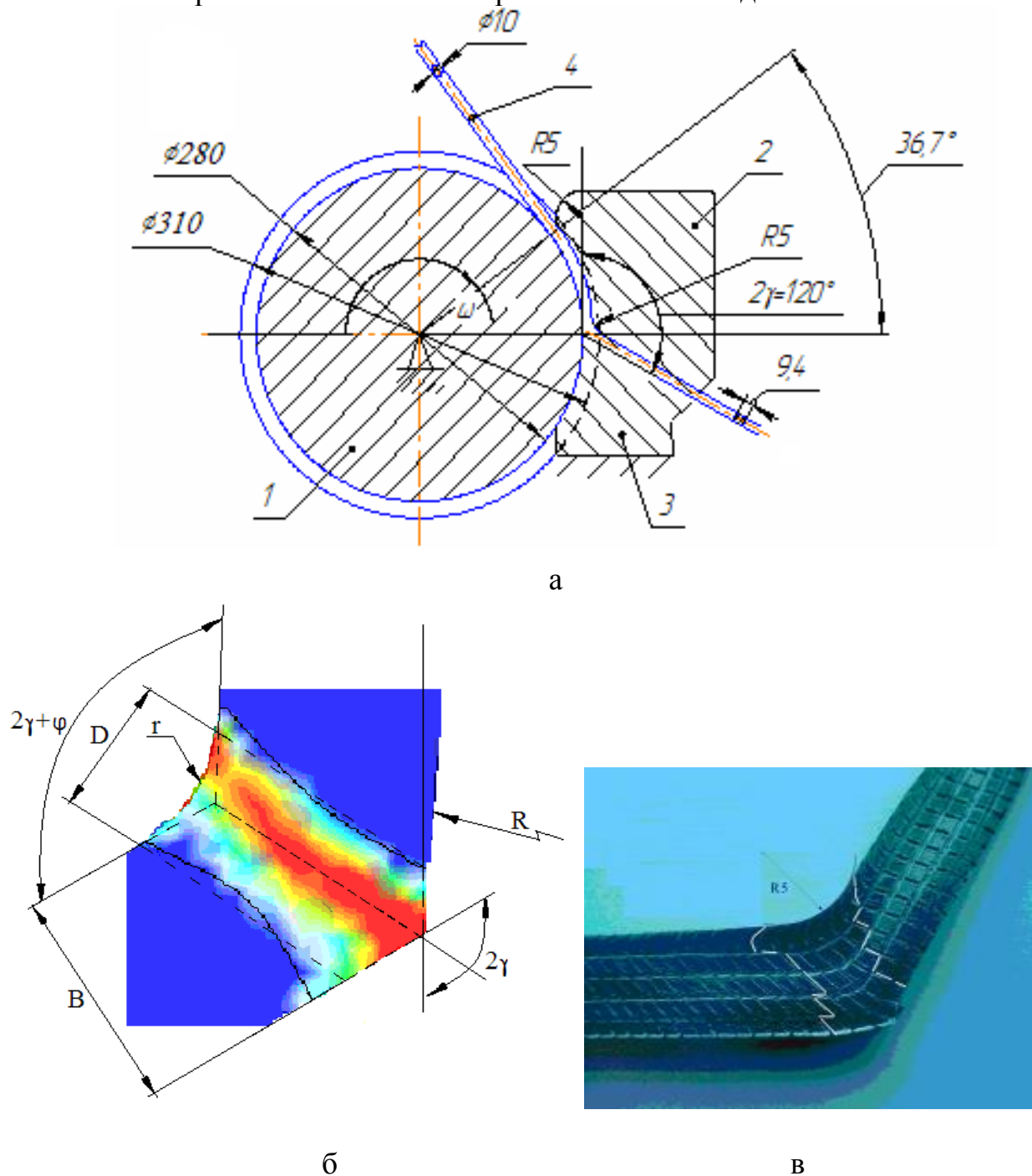


Рисунок 6 – Схема инструмента установки для равноканального углового прессования по схеме Конформ (а), схема к расчету объема очага деформации (б), искажение сетки, полученное экспериментальным деформированием составного образца (в)

По результатам исследования процесса РКУП-К были получены решения, которые позволяют, в отличие от ранее полученных в работах В. М. Сегала и др., рассчитывать потребный момент, угол захвата (длину дуги захвата), нагрузки на инструмент с учетом упрочнения металла, при различных углах пересечения каналов инструмента, при наличии и без противодействия на входе в выходной канал инструмента, при различных трибологических условиях и скоростях обработки.

Для средней скорости деформации и момента:

$$\bar{\varepsilon}_i = \frac{\cos \gamma (R + 0,5B) \omega}{\sqrt{3} r \cos(\gamma + 0,5 \arcsin(B / (R + B)))}, \quad (7)$$

$$M = 2\bar{\sigma}_s \operatorname{ctg} \gamma (R + 0,5B) B^2 / \sqrt{3} + f_1 \sigma_{so} / \sqrt{3} B \alpha (R + B)^2 + \\ + f_2 \bar{\sigma}_{sk} / \sqrt{3} B i L (R + 0,5B) + p_0 B^2 (R + 0,5B), \quad (8)$$

где σ_{so} – начальное напряжение течения металла, f_1 – коэффициент трения на поверхности контакта П-образного калибра валка с заготовкой, α – угол захвата заготовки, ω – угловая скорость вращения валка, R – радиус цилиндрической поверхности калибра валка, p_0 – осевое давление на заготовку, на выходе из рабочего канала, f_2 – коэффициент трения на поверхности контакта выходного канала с заготовкой, $\bar{\sigma}_{sk}$ – напряжение течения металла, соответствующее среднему по периметру поперечного сечения заготовки значению накопленной деформации, $\bar{\sigma}_s$ – напряжение течения металла, соответствует средней по объему очага деформации накопленной деформации $\bar{\varepsilon}_i$, i – количество вертикальных и горизонтальных контактных поверхностей выходного канала с заготовкой, L – длина выходного канала, B – длина стороны квадратного поперечного сечения заготовки.

Необходимый угол захвата заготовки:

$$\alpha \geq \frac{(R + 0,5B) (p_0 B + (f_2 \bar{\sigma}_{sk} i L + 2\bar{\sigma}_s B \operatorname{ctg} \gamma) / \sqrt{3})}{f_1 \sigma_{so} / \sqrt{3} (2R^2 - 0,5B^2)}. \quad (9)$$

Для силы реакции упора:

$$N_y = \sqrt{\left[\frac{M}{(R + B / 2) \cdot \cos(2\gamma - 90)} \right]^2 + (BL f_2 \bar{\sigma}_{sk} / \sqrt{3})^2}. \quad (10)$$

Для силы реакции прижима:

$$N_{\Pi} = \sqrt{\left(k \frac{(R + B) \alpha M}{(R + B / 2) B} \right)^2 + ((R + B) \alpha B f_1 \sigma_{so} / \sqrt{3} \cos \beta)^2}, \quad (11)$$

где $k = 0,25$, $\beta = 180 - \alpha / 2 - 2\gamma - \varphi$, $\varphi = \arcsin(B / (R + B))$.

Сила реакции вала:

$$N_{\varepsilon} = k \frac{(R + B) \cdot \alpha M}{(R + B / 2) B}. \quad (12)$$

Крутящий момент, рассчитанный с учетом коэффициента трения, определенного в процессе прямого выдавливания, с приемлемой для практического использования точностью согласуется с моментами, экспериментально измеренными и полученными моделированием углового прессования квадратной стальной заготовки по схеме Конформ.

Сопоставление расчетного значения момента прессования при температуре 200 °С закаленной заготовки из стали 10 с квадратным сечением (9,4×9,4), по формуле (8), с результатом опытного измерения момента показало согласование значений моментов. В результате опытного измерения момента получили значение 7200 Нм (таблица 4), которое меньше значения момента рассчитанного по формуле (8) на 14,5 %.

Таблица 4 – Параметры для расчета и результаты оценки и измерения момента при РКУП-К

σ_{s0} , МПа	$\bar{\sigma}_{sk}$, МПа	$\bar{\sigma}_s$, МПа	L , мм	R , мм	f_1 , f_2	M , Н*м	M_3 , Н*м	Δ , %
354	562,5	458,2	5	139,7	0,11	8244	7200	14,5
354	562,5	458,2	10	139,7	0,11	8972	8066	11,2

Решения, полученные по результатам исследования процесса РКУП, были использованы при проектировании режима деформирования заготовок с увеличенными размерами. Решения относительно деформационных и силовых параметров, нагрузок на инструмент в процессе РКУП-К, были применены при проектировании усовершенствованной установки РКУП-К с горизонтальным расположением исполнительного механизма. Изготовленная установка успешно используется в опытно-промышленных технологиях РКУП.

Вторая глава посвящена разработке методик исследования пластичности и прогнозирования разрушения металла в термомеханических условиях деформации, реализующихся в процессах УП.

В практике расчетов в нашей стране наибольшее распространение получили методики оценки поврежденности металла – В. Л. Колмогорова, А. А. Богатова, за рубежом – Кокрофта-Латама, которая установлена в программном комплексе DEFORM 3D по умолчанию, как основная методика прогнозирования разрушения металла при пластической деформации.

Модель является энергетической. Работа элементарной положительной силы, действующей на материальную точку тела в процессе деформации, характеризует поврежденность металла. Согласно модели Кокрофта-Латама разрушение металла происходит при достижении работой критического значения показателя Кокрофта-Латама. Исследования показали, что критическое значение показателя Кокрофта-Латама зависит от схемы напряженного состояния материальной точки тела.

Принимая некоторые допущения (приращение пластического разрыхления (уменьшение плотности металла) материальной точки ΔE пропорционально приращению показателя Кокрофта-Латама Δc ; приращение поврежденности $\Delta \psi$ материальной точки на этапе деформирования не зависит от истории изменения напряженного и деформированного состояния точки на предшествующих этапах деформирования – гипотеза линейного суммирования приращений поврежденности) получили модель Кокрофта-Латама в форме, позволяющей учитывать изменение критического значения показателя Кокрофта-Латама в зависимости от значения показателя напряженного состояния σ_1 / σ_i материальной точки деформируемого тела.

Для приращения поврежденности металла на k -ом этапе деформирования материальной точки заготовки:

$$\Delta \psi = \int_{\varepsilon_{i,k}}^{\varepsilon_{i,k+1}} \frac{\sigma_1}{\sigma_i} d\varepsilon_i / \left[\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_i} \right)_{cp} \varepsilon_{i,p} \right]_k, \quad (13)$$

где σ_1 – главное нормальное положительное напряжение, σ_i – интенсивность напряжений, $\varepsilon_{i,k}$, $\varepsilon_{i,k+1}$ – интенсивность деформации соответственно к началу и окончанию k -ого этапа деформирования материальной точки заготовки, $(\sigma_1 / \sigma_i)_{cp}$ – среднее значение показателя напряженного состояния на k -ом этапе, $\varepsilon_{i,p}$ – интенсивность деформации, накопленной материальной точкой к моменту разрушения при постоянном отношении σ_1 / σ_i , равном среднему значению отношения $(\sigma_1 / \sigma_i)_{cp}$ на k -ом этапе деформирования.

Для поврежденности материальной точки:

$$\psi = \sum_{k=1}^n \left[\int_{\varepsilon_{i,k}}^{\varepsilon_{i,k+1}} \frac{\sigma_1}{\sigma_i} d\varepsilon_i / \left[\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_i} \right)_{cp} \varepsilon_{i,p} \right]_k \right], \quad (14)$$

где n – количество этапов деформирования.

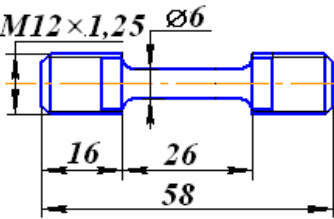
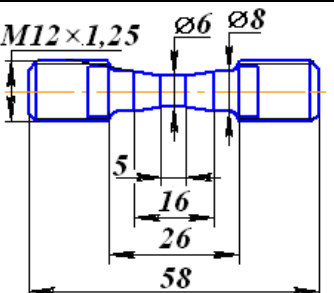
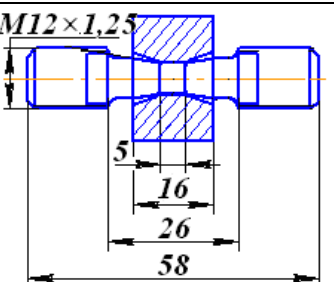
Условие не разрушения металла:

$$\sum_{k=1}^n \left[\int_{\varepsilon_{i,k}}^{\varepsilon_{i,k+1}} \frac{\sigma_1}{\sigma_i} d\varepsilon_i / \left[\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_i} \right)_{cp} \varepsilon_{i,p} \right]_k \right] < 1. \quad (15)$$

Для успешного применения модели (15) необходима зависимость пластичности $\varepsilon_{i,p}(\sigma_1 / \sigma_i)$ металла от показателя напряженного состояния σ_1 / σ_i .

Потребность зависимости $\varepsilon_{i,p}(\sigma_1 / \sigma_i)$ инициировала поиск схем деформирования образцов, обеспечивающих несущественное изменение показателя σ_1 / σ_i при испытании образца вплоть до разрушения. Исследования показали, что требованию несущественного (не более 10%) изменения показателя σ_1 / σ_i удовлетворяют схемы деформирования образцов совместным кручением - сжатием (растяжением) (таблица 5).

Таблица 5 – Механические режимы деформирования образцов

№	Форма и размеры образца	Вид испытания образца	ν_d / ω_d , $\frac{\text{мм} \cdot \text{мин}^{-1}}{\text{об} \cdot \text{мин}^{-1}}$	$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_i} \right)_{cp}$	$\left(\frac{\sqrt{3} \cdot \sigma_0}{\sigma_i} \right)_{cp}$	ε_i
1		Кручение совместное с растяжением	0,5/1,5	0,59	0,05	3,83
			2/1,5	0,63	0,29	3,38
			10/1,5	0,82	0,32	3,13
			20/1,5	0,93	0,49	2,65
2		Кручение совместное со сжатием	-2/0,15	0,13	-0,46	1,88
			-20/1,5	0,14	-0,46	1,81
			-7/1,5	0,38	-0,21	2,41
3		Кручение совместное со сжатием в оправке	-0,5/1,5	0,41	-0,24	2,93
			-2/1,5	0,06	-0,83	3,34

Расчету средних значений показателей напряженного состояния (таблица 5) образца (точек поверхности рабочей части образца) за время деформирования предшествовала настройка конечно-элементной модели пластического деформирования образца.

Для настройки сравнивали графические зависимости силовых параметров (силы от времени и момента от времени) деформирования образца, полученные при моделировании и в эксперименте.

Отличие указанных графических зависимостей не превышало 10% при плотности сетки конечных элементов не менее 32 мм^{-3} .

Исследования схем показали, что на показатель напряженного состояния определяющее влияние оказывает отношение осевой ν_d и угловой ω_d скоростей деформирования (таблица 5).

С уменьшением отношения скоростей показатель σ_1 / σ_i уменьшается.

Испытания образцов (рисунок 7) по указанным схемам позволили получать зависимости $\varepsilon_{i,p}(\sigma_1 / \sigma_i)$, и критические значения показателя Кокрофта-Латама, соответствующие различным показателям σ_1 / σ_i .

Адекватность разработанной модели поврежденности металла проверяли при решении тестовых задач.

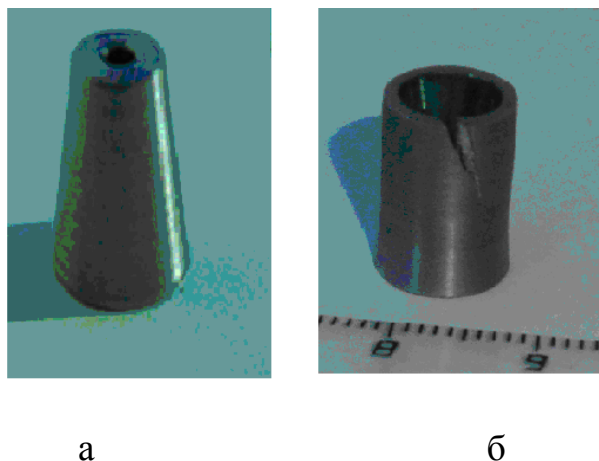
В работе показано, что расчетная, по полученной формуле (14), поврежденность с приемлемой для практического использования точностью позволяет прогнозировать разрушение металла при холодной пластической деформации и изменяющемся напряженном состоянии материальной точки.



Рисунок 7 – Образцы, деформированные до разрушения: а – сжатием с кручением трубчатого образца; б – сжатием с кручением трубчатого образца в оправке

Трубчатую заготовку в форме усеченного конуса (рисунок 8), высотой равной 15 мм, с диаметрами оснований равными 10 мм и 6 мм и с диаметром сквозного отверстия 2 мм, из Ст5 подвергали раздаче-осадке при комнатной температуре до разрушения.

Эксперимент показал, что первоначальная трещина длиной равной 1,5–2 мм, ориентированная под углом 40–45 град. к продольной оси заготовки, появляется при осадке-раздаче заготовки в месте соединения ее торцевой свободной и конической контактной поверхностей, при высоте заготовки равной 13,1 мм.



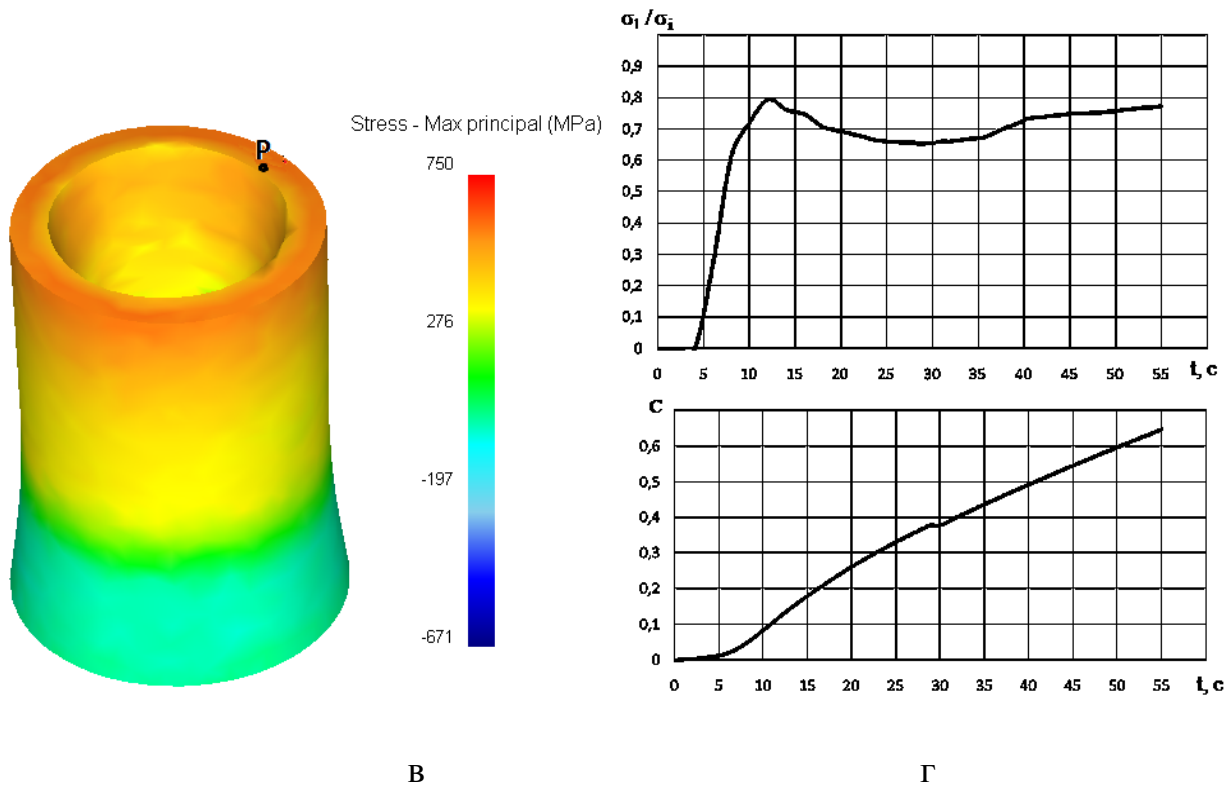


Рисунок 8 – Заготовка после натурального эксперимента и моделирования: а – исходная трубчатая в форме усеченного конуса; б – деформированная до разрушения; в – распределение максимального, главного нормального напряжения σ_1 и положение материальной точки P , взятой для расчета поврежденности; г – графические зависимости отношения σ_1 / σ_i и показателя Кокрофта-Латама c в материальной точке P от времени

Это место заготовки – точка P (рисунок 8, б и рисунок 8, в) отличается максимальными значениями растягивающих напряжений в конечный момент осадки-раздачи.

Расчетное значение поврежденности для точки P заготовки, по формуле (14), удовлетворяло неравенству $0,97 \leq \psi \leq 1$, если при расчетах выполнялось

условие: $0,99 \leq \sum_{k=1}^n \left[\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_i} \right)_{cp} t_s \right]_k / S \leq 1$, где S – площадь плоской фигуры,

ограниченной графиком $\sigma_1 / \sigma_i(t)$ (рисунок 8, г), осями абсцисс, ординат и линией параллельной оси ординат, проходящей через точку $(t_d; 0)$, $n = t_d / t_s$ – количество принятых в расчете этапов n деформирования материальной точки, t_d – время деформирования материальной точки, t_s – длительность одного этапа деформирования, принятая в расчете исследователем. Расчетное значение поврежденности для точки P при высоте заготовки 13,1 мм меньше единицы на 3%.

Следующая тестовая задача – определение количества проходов РКУП цилиндрической заготовки (сталь 15) до разрушения при комнатной

температуре. При РКУП область заготовки с наибольшим показателем поврежденности примыкает к внутреннему углу пересечения каналов (рисунок 9).

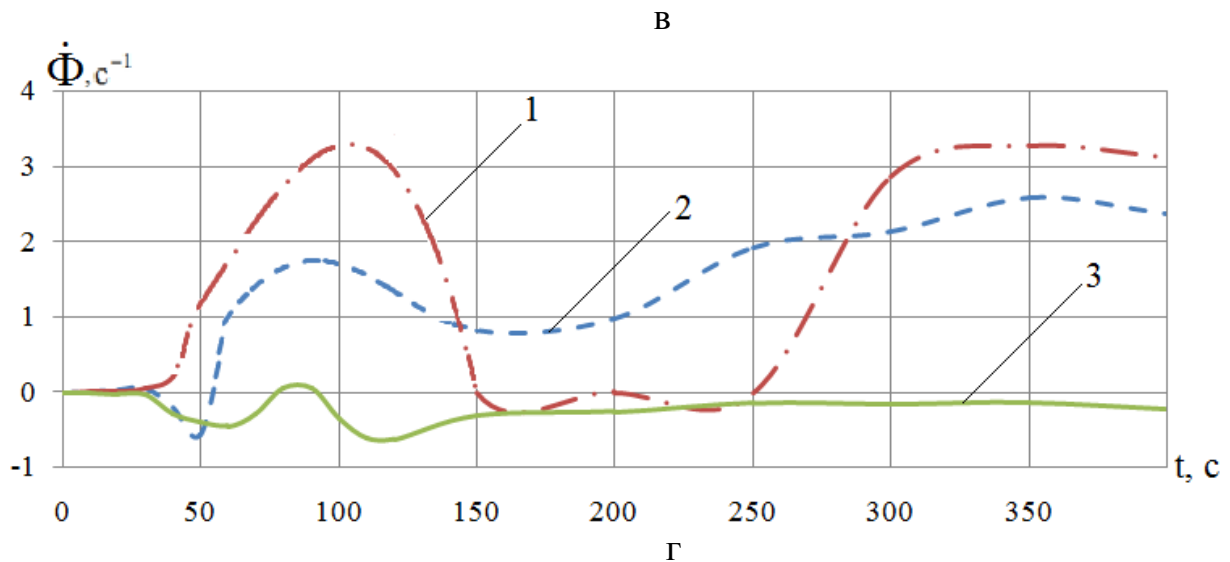
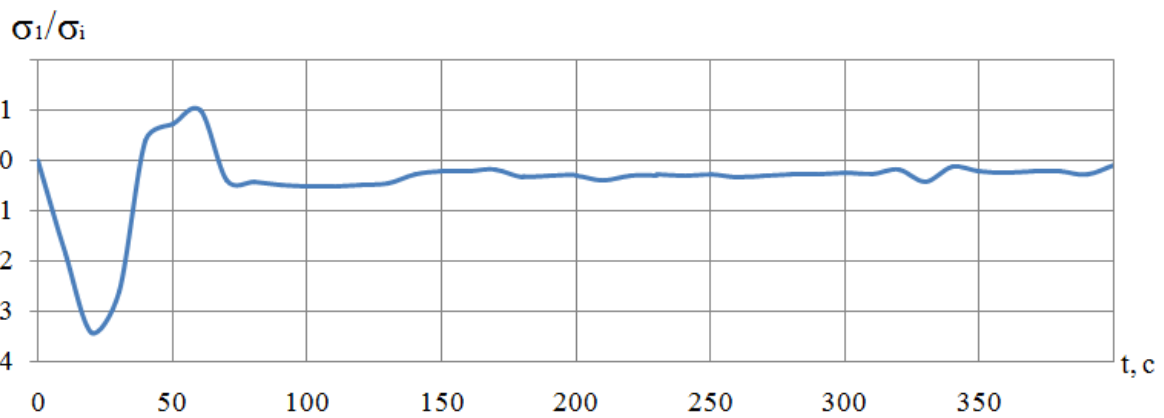
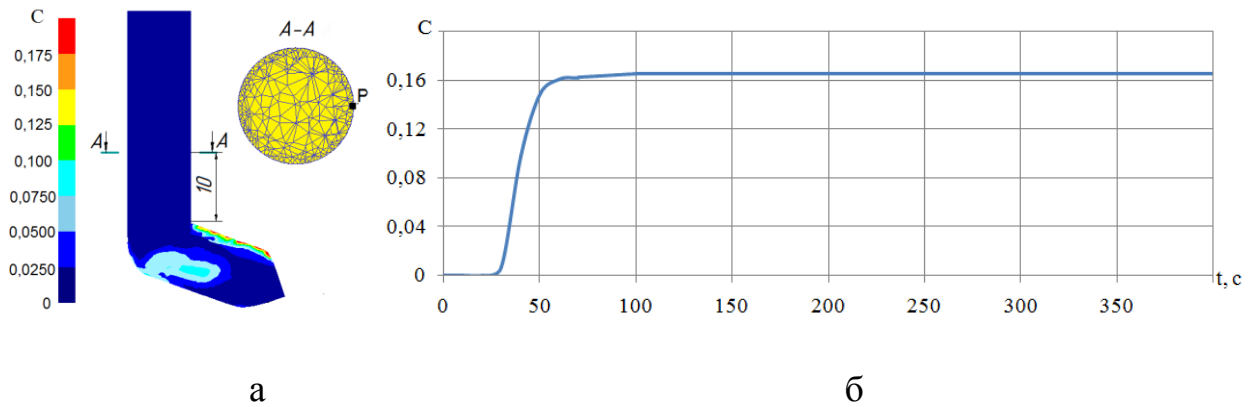


Рисунок 9 – Схема положения и графические зависимости показателей поврежденности и напряженного, деформированного состояний материальной точки заготовки от времени: а – схема; б – показатель Кокрофта-Латама; в – относительное максимальное главное нормальное напряжение; г – компоненты тензора скорости вращения: 1 – $\dot{\Phi}_2$; 2 – $\dot{\Phi}_3$; 3 – $\dot{\Phi}_1$

Поэтому анализировали историю деформирования и рассчитывали поврежденность для точки, взятой из этой области заготовки.

Для сравнения результатов расчета поврежденность оценивали по методике проф. Богатова А. А., при этом диаграмму пластичности брали из известной работы².

Физический эксперимент показал, что заготовка разрушалась в третьем проходе.

Оценки поврежденности металла при РКУП цилиндрической заготовки, полученные с использованием методики А. А. Богатова и усовершенствованной модели Кокрофта-Латама, хорошо согласуются (таблица 6) и одинаково приемлемы для удовлетворительного прогнозирования разрушения металла – расчетные значения поврежденности меньше 1 не более чем на 5%.

Таблица 6 – Результаты расчета поврежденности металла

Количество проходов РКУП	Поврежденность с использованием		
	разработанной модели	модели А. А. Богатова	модели Кокрофта-Латама
1	0,205	0,223	0,601
2	0,519	0,512	0,98
3	0,969	0,958	1,59
4	1,149	1,058	1,86

С увеличением количества проходов, с усложнением истории деформирования возможно существенное различие между результатами прогноза разрушения металла и экспериментальными данными.

И это обусловлено на наш взгляд тем, что ни одна из использованных методик не учитывает структурные изменения металла. Пластичность в методике проф. Богатова А.А., критические значения показателя Кокрофта-Латама определяются на образцах с исходной, не деформированной структурой. Тогда как структура в окрестности точки, для которой рассчитывается поврежденность металла, непрерывно изменяется при переменном напряженном состоянии. Изменения структуры становятся все более значимыми при накоплении большой деформации (при увеличении количества проходов РКУП). Для учета изменений структуры в рамках рассмотренных методик необходимо предварительно провести большое количество экспериментов. При этом образцы должны соответствовать «текущей» структуре металла.

²Биба Н.В., Стебунов С.А., Смирнов С.В., Вичужанин Д.И. Прогнозирование разрушения металла при холодной объемной штамповке с помощью адаптивной модели разрушения//КШП. ОМД. 2003. № 3. С.39–14.

Предлагаемый альтернативный подход учета структурных изменений при прогнозировании разрушения металла в процессах РКУП заключается в следующем.

Испытание образца совместным кручением-сжатием (растяжением) необходимо проводить с изменяющимися по определенным «законам» скоростями деформирования. Угловая ω и осевая v скорости (рисунок 10) определяются совместным решением системы полученных и известного уравнений (16) и (18) или (17) и (18) с использованием графиков $\frac{\sigma_1}{\sigma_i}(t)$ и $\dot{\varepsilon}_i(t)$,

характеризующих историю деформирования точки заготовки и предварительно полученных моделированием процесса РКУП.

Если при физическом моделировании образец разрушился, то и точка заготовки, в которой термомеханические условия деформации изменяются аналогично, также склонна к разрушению.

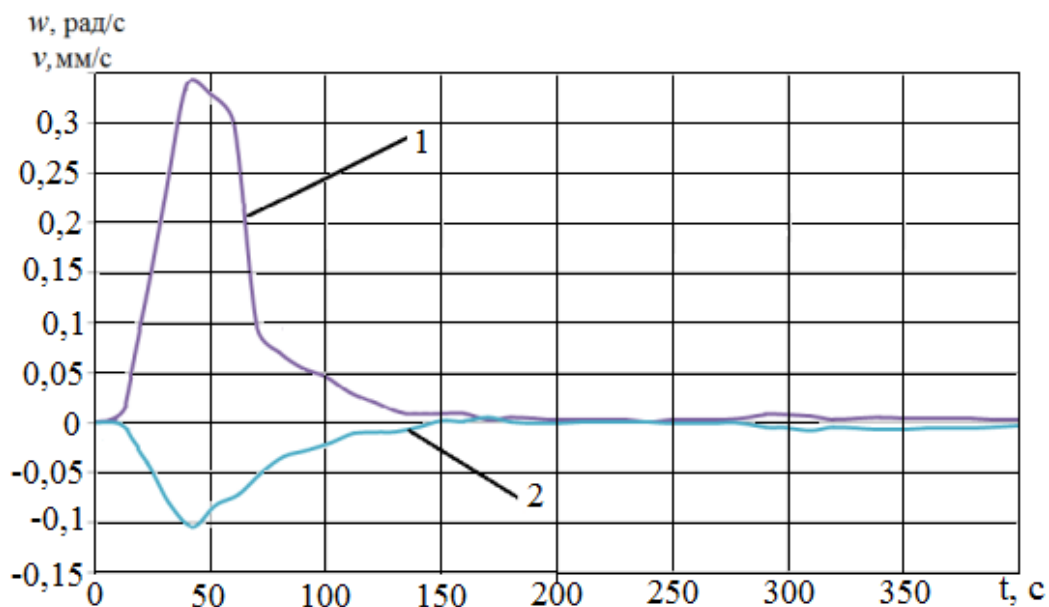


Рисунок 10 – Графические зависимости угловой (1) и осевой (2) скоростей движения подвижного захвата от времени при физическом моделировании, совместным кручением-сжатием образца, механических условий деформации материальной точки заготовки при РКУП

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_i} = -0,2184 \left(\frac{v}{\omega} \right)^2 + 0,4086 \left(\frac{v}{\omega} \right) + 0,5671. \quad (16)$$

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_i} = 4,208 \left(\frac{v}{\omega} \right)^2 + 13,66 \left(\frac{v}{\omega} \right)^4 + 16,13 \left(\frac{v}{\omega} \right)^3 + 9,099 \left(\frac{v}{\omega} \right)^2 + 3,327 \left(\frac{v}{\omega} \right) + 0,409. \quad (17)$$

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{1}{l} \sqrt{v^2 + \frac{r^2 \omega^2}{3}}. \quad (18)$$

Для опробования методики в ИФПМ при НИЧ УГАТУ был разработан и изготовлен экспериментально-измерительный комплекс, позволяющий осуществлять программное кручение-сжатие (растяжение) (рисунок 11).



Рисунок 11 – Экспериментально-измерительный комплекс для исследования пластичности металла путем совместного кручения и сжатия (растяжения) образцов

Третья глава посвящена исследованию влияния поперечного размера заготовки на термомеханические условия деформации металла при РКУП.

Влияние поперечного размера заготовки, как указано в работах Утяшева Ф. З., обусловлено ролью поверхности заготовки при ее интенсивной пластической деформации, механизмами деформации, значительным градиентом скорости деформации по очагу деформации, деформационным разогревом металла и неравномерным распределением температуры в объеме заготовки.

Прекращение измельчения фрагментов при достижении деформацией значений $\varepsilon = 3-4$ возможно при реализации благоприятных термических и механических условий деформации металла. Неблагоприятные термомеханические условия деформации металла в значительной мере могут быть спровоцированными деформационным разогревом, высокой скоростью деформации металла, низким уровнем квазигидростатического давления.

Анализ полученных графических зависимостей (рисунок 12), показал, что с увеличением размера поперечного сечения и скорости деформирования, температура разогрева заготовки в процессе прессования увеличивается (рисунок 12, б). Кратковременное повышение температуры в очаге деформации может быть существенным для миграции границ фрагментов, увеличения размеров зерен.

Исследования показали, что коэффициент жесткости, и относительное главное нормальное напряжение слабо зависят от начальной температуры нагрева заготовки и скорости деформирования, с увеличением диаметра заготовки наблюдается увеличение коэффициентов от 0,5 до 0,92.

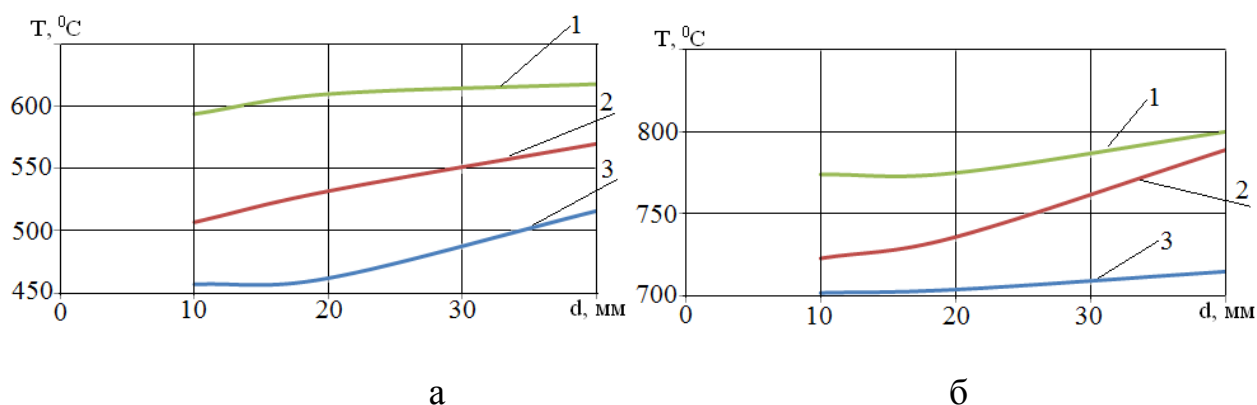


Рисунок 12– Графические зависимости максимальной температуры сплава ВТ-6 в очаге деформации от диаметра заготовки при начальной температуре 450 °С (а), 700 °С (б) и скорости деформирования: 1 – 10 мм/с; 2 – 1 мм/с; 3 – 0,1 мм/с

Увеличение коэффициента жесткости, и относительного главного нормального напряжения, обусловленное увеличением диаметра заготовки, способствует уменьшению деформационной способности заготовки при РКУП. Данный факт необходимо учитывать при прогнозировании разрушения металла.

Результаты исследования влияния диаметра заготовки на разогрев металла в очаге деформации были аппроксимированы зависимостями вида (19) для различных скоростей деформирования.

$$\Delta T = -0,0283 \cdot d^2 + 2,575 \cdot d + 73,333, \quad (19)$$

где ΔT - увеличение температуры заготовки при скорости деформирования 10 мм/с. Зависимости вида (19) позволяют с учетом диаметра исходной заготовки, необходимой скорости деформирования рассчитывать деформационный разогрев и при известной температуре деформации сплава ВТ-6 рассчитывать температуру нагрева исходной заготовки, как разность температуры деформации и деформационного разогрева.

В четвертой главе представлены алгоритмы разработки технологических процессов РКУП штучной заготовки и РКУП-К длинномерной заготовки.

Приведены методические указания и рекомендации по использованию при разработке процессов УП полученных в предыдущих главах моделей.

На примере разработки технологии РКУП заготовки диаметром 38 мм и длиной 210 мм из стали ШХ15 показано, что для реализации УП заготовки при температуре 400 °С: требуется гидропресс с номинальной силой не менее 1573 кН и развивающий, при необходимом давлении масла в рабочем цилиндре, скорость деформирования не более 1 мм/с; при угле пересечения каналов 120 град, сужении 5% обеспечивается накопление заготовкой требуемой деформации без разрушения за четыре прохода; требуется матрица из стали ДИ 22, наружный радиус которой по условию прочности должен быть не менее 290 мм.

На примере проектирования технологии РКУП-К длинномерной заготовки со стороной квадратного сечения 24 мм из сплава системы Ti-6Al-4V

показано, что для реализации УП заготовки при температуре 600 °С: требуется установка РКУП-К с номинальным моментом не менее 119462 Нм и мощностью на рабочем колесе не менее 486 Вт; при угле пересечения каналов 114 град обеспечивается накопление заготовкой требуемой деформации без разрушения за четыре прохода; необходим угол захвата заготовки не менее 22 град, при радиусе рабочего колеса 388 мм.

Пятая глава посвящена разработке технологических процессов получения изделий из УМЗ сплавов. В основе этих работ лежат приведенные выше результаты теоретических и экспериментальных исследований. Представленные ниже технологии УП обеспечивают увеличенный уровень свойств изделий и высокую производительность.

Большие перспективы для широкого промышленного использования имеет технология получения высокопрочных длинномерных прутков и проволоки из УМЗ технического титана для медицинского применения (совместно с зарубежными партнерами и предприятием ООО «НаноМет», г. Уфа). Мировая потребность в данной продукции составляет несколько сотен тонн. Разработанный процесс состоит из следующих основных операций: РКУП-К при температуре 400 °С на специализированном оборудовании; последующее волочение и финишная абразивная обработка. Линия по изготовлению длинномерных прутков позволяет получать прутки диаметром 5-20 мм и длиной до трех метров из технического УМЗ титана (рисунок 13).

Точность геометрии получаемых прутков соответствует качеству h9, отклонение от прямолинейности не превышает 2 мм на метр длины. Временное сопротивление разрушению УМЗ прутков составляет 1250-1300 МПа ($\delta > 11\%$), что значительно превосходит исходные значения 450-750 МПа.



Рисунок 13 – Высокопрочные прутки из титана марки Grade 4 диаметром 7 мм, с качеством точности h9 и длиной 2 м, полученные комбинированной технологией и подвергнутые финишной абразивной обработке

Структурные исследования показали, что РКУП-К технология формирует структуру с размером зерен 80–130 нм. Разработка находится на стадии опытно-промышленного производства. Годовой экономический эффект при выпуске продукции в объеме трех тонн в год составляет 2 млн. руб. Полученный комплекс свойств УМЗ технического титана позволил стоматологическим компаниям создать новые конструкции имплантатов, более эффективных для хирургии и послеоперационного восстановления. Например, разработанные и производимые из УМЗ титана имплантаты чешской фирмой «Тимплант» имеют конструкцию с меньшим поперечным сечением, что

значительно упрощает медицинскую операцию и сокращает срок вживляемости, по сравнению с обычным техническим титаном, что подтверждено целым рядом совместных исследований и клинических наблюдений.

Другим примером успешного инновационного применения является разработанная РКУП-К технология получения прутков из УМЗ сплава ВТ-6 для последующего производства из них изделий авиационного назначения (совместно с ОАО «УМПО», г. Уфа) (рисунок 14).

Разработанная технологическая схема включает операцию РКУП-К при температуре 500 °С, для получения за четыре прохода УМЗ состояния в сплаве ВТ-6, для формирования в сплаве структуры со средним размером зерен 400 нм и повышения временного сопротивления разрушению при комнатной температуре с 1000 МПа до 1200 МПа. Последующее теплое прямое выдавливание позволило получить требуемый диаметр заготовки (рисунок 14, б), дополнительно измельчить структуру и увеличить временное сопротивление разрушению до значений 1350 МПа при $\delta = 9\%$.



Рисунок 14 – Использование РКУП-К технологии для сплава ВТ-6:
а – длинномерные заготовки после РКУП-К; б – заготовка после прямого выдавливания; в – заготовка детали ГТД, отштампованная из УМЗ полуфабриката

Далее цилиндрические полуфабрикаты подвергались изотермической штамповке для получения заготовок лопаток газотурбинного двигателя (ГТД) (рисунок 14, в).

Применение УМЗ заготовок при штамповке изделия позволило реализовать изотермическую штамповку в условиях низкотемпературной свехпластичности, при температуре $T=600\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$, что на $200\text{--}250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже традиционной.

Пластическое формоизменение изделий при более низких температурах способствует сохранению УМЗ структуры в заготовке и обеспечивает более высокие механические свойства изделий, их надежность и долговечность.

Рабочее давление, рассчитанное по известной формуле с применением полученной формулы (20) и выставленное в гидропрессе при изотермической штамповке УМЗ лопатки, обеспечило режим штамповки, удовлетворяющий

термомеханическим условиям низкотемпературной сверхпластической деформации УМЗ сплава ВТ-6, т.е. $\dot{\varepsilon}_i \leq 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$, при $T = 650^\circ\text{C}$.

$$F_D = \frac{2}{\sqrt{3}}(b_1 l_1 \sigma_{s1} + b_2 l_2 \sigma_{s2} + b l \sigma_{s3}) + 0,25 \tau_{s1} b_1^2 \left(1 - \frac{h}{h_1}\right) + 0,25 \tau_{s2} b_2^2 \times \\ \times \left(1 - \frac{h}{h_1}\right) + \frac{\mu}{4\sqrt{3}} \left[2\sigma_{s3} \frac{l \cdot b^2}{h} + \sigma_{s1} \frac{b_1^2}{h_1} (2l_1 + 2h_1 - h) + \sigma_{s2} \frac{b_2^2}{h_2} (2l_2 + 2h_2 - h) \right], \quad (20)$$

где F_D - сила деформирования, $\tau_{s,1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sigma_{s1} + \sigma_{s3}}{2}$, $\tau_{s,2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sigma_{s2} + \sigma_{s3}}{2}$, σ_{s1} ,

σ_{s2} , σ_{s3} – среднее значение напряжения течения металла, соответственно в консолях и пере лопатки, b , b_1 , b_2 , l , l_1 , l_2 , h , h_1 , h_2 – геометрические размеры схематично представленных элементов лопатки, μ – коэффициент трения.

Проведенные сравнительные исследования показали, что изготовленные из отштампованных УМЗ заготовок лопаток детали ГТД обладают увеличенной на 15-20% усталостной прочностью. Сплав ВТ-6 в УМЗ состоянии обеспечил изотермическую штамповку заготовок лопаток при уменьшенных (на 100–200 °С) температурах, что позволило изготовить штамп из теплостойкой штамповой стали, которая в 5-7 раз дешевле традиционно применяемого материала в серийном технологическом процессе. Отмеченные выше технико-экономические преимущества технологий УП обеспечили повышение эксплуатационных характеристик изделий из УМЗ сплава ВТ-6 и привели к снижению технологических затрат на их производство.

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В диссертации, на основании выполненных автором исследований, изложены теоретические положения, заключающиеся в разработке методологической основы исследования взаимосвязи механических свойств заготовок, получаемых УП, и накопленной металлом поврежденности, в разработке моделей деформационных и силовых параметров процессов УП, которые в совокупности являются новым достижением в развитии научного направления и вкладом в развитие научно-методологического обеспечения проектирования процессов УП, способствующим переходу в отраслях металлообработки и машиностроения от лабораторных технологий к промышленным технологиям УП УМЗ продукции высокого качества, что показано на примере медицинских имплантатов и лопаток ГТД.

1. Модели для расчета деформационных, силовых параметров ряда процессов УП (РКУП; РКУП-ПК; РКУП-К; выдавливание, совмещенное с РКУП-ПК) позволяют рассчитывать параметры с приемлемой для практического использования точностью и учитывать при расчете необходимую скорость деформации и упрочнение металла, круглую форму заготовки, наличие

сужающегося выходного канала матрицы, угол пересечения каналов, различные трибологические условия во входном и выходном каналах инструмента, наличие (отсутствие) противодавления в выходном канале инструмента. Относительная разность расчетных и измеренных значений силовых параметров процессов УП не превышает 14,5%.

2. Модели для расчета геометрических размеров инструмента для РКУП-К – для угла α захвата заготовки и радиуса R цилиндрической поверхности калибра валка, позволяют рассчитывать размеры инструмента с учетом угла пересечения рабочего и выходного каналов, длины выходного канала и трибологических условий на поверхности каналов. Эксплуатация изготовленного инструмента, спроектированного с использованием полученных зависимостей для расчета его геометрических размеров, показала их практическую пригодность для методического обеспечения проектирования инструмента для процесса РКУП-К.

3. Уточненная модель разрушения металла – модифицированная модель Кокрофта-Латама и разработанная на ее основе методика прогнозирования разрушения металла в процессах многопроходного УП, позволяют учитывать влияние напряженного состояния материальной точки заготовки на предельное значение показателя поврежденности металла. Показано, что расчетная поврежденность с приемлемой для практического использования точностью позволяет прогнозировать разрушение металла при холодной пластической деформации и изменяющемся напряженном состоянии материальной точки. При этом траекторию материальной точки, в которой рассчитывается поврежденность, представляют n этапами деформирования с длительностью t_s , каждого этапа деформирования таким образом, чтобы удовлетворялось

$$\text{условие: } 0,99 \leq \sum_{k=1}^n \left[\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_i} \right)_{cp} t_s \right]_k / s \leq 1 .$$

Экспериментальная проверка методики прогнозирования разрушения металла проводилась на примере расчета:

поврежденности металла при осадке-раздаче трубчатой заготовки из стали 5 в форме усеченного конуса, высотой равной 15 мм, с диаметрами оснований равными 10 мм и 6 мм и с диаметром сквозного отверстия 2 мм, заготовка разрушалась в эксперименте и при моделировании при высоте 13,1 мм и уровне накопленной деформации $\varepsilon \leq 1$;

поврежденности металла при высоком уровне накопленной деформации $\varepsilon \approx 3$ в процессе четырехпроходного РКУП цилиндрической заготовки из стали 15 диаметром 10 мм и длиной 70 мм, заготовка разрушалась в эксперименте и при моделировании в третьем проходе РКУП.

4. Установлено влияние отношения осевой и угловой скоростей деформирования образца при испытании совместным кручением-сжатием (растяжением) на показатели σ/T , σ_1/σ_i его напряженного состояния – уменьшение отношения осевой и угловой скоростей деформирования образца приводит к уменьшению показателей σ/T и σ_1/σ_i напряженного состояния

образца. На основе полученного количественного описания влияния отношения осевой и угловой скоростей деформирования образца при испытании совместным кручением-сжатием (растяжением) на показатель напряженного состояния σ_1 / σ_i разработана методика определения пластичности металла в зависимости от показателя напряженного состояния, базирующаяся на результатах испытаний образцов кручением совместным с растяжением (сжатием) образцов.

5. Разработанный и изготовленный экспериментально-измерительный комплекс позволяет исследовать пластичность металла в термомеханических условиях деформации, реализующихся в процессах УП, путем совместного кручения и сжатия (растяжения), с программным изменением угловой и осевой скоростей деформирования образцов. Полученные результаты исследования пластичности сталей и сплавов использованы при проектировании технологий УП УМЗ изделий.

6. Методика испытаний образцов комбинированным кручением, при малых скоростях деформирования и с заданными программами изменения скорости деформации и показателя напряженного состояния, позволяет исследовать пластичность металла с учетом различных историй деформирования материальных точек, изменения структуры заготовки подверженной РКУП.

7. Полученные количественные зависимости температуры разогрева и показателей напряженного состояния заготовки из малолегированных титановых сплавов и малоуглеродистых сталей от поперечного размера заготовки позволяют определять температурно-скоростной режим РКУП, РКУП-К обеспечивающий благоприятные для формирования УМЗ структуры материала термомеханические условия деформации заготовки.

8. Разработаны рекомендации по использованию при разработке процессов углового прессования полученных моделей для расчета деформационных, силовых параметров ряда процессов УП, методики прогнозирования разрушения металла в процессах многопроходного УП, методики исследования пластичности металла в термомеханических условиях деформации, реализующихся в процессах УП, путем совместного кручения и сжатия (растяжения) образцов, количественного описания влияния поперечного размера исходной заготовки, сужения выходного канала инструмента на температуру деформационного разогрева и показатели напряженного состояния заготовок из малолегированных титановых сплавов и малоуглеродистых сталей.

9. Разработаны и усовершенствованы технологические процессы УП изделий медицинского назначения, изотермической штамповки УМЗ изделий (патент №23882686 на изобретение) авиационного назначения. Рабочее давление, рассчитанное с использованием полученной формулы (20) и выставленное в гидропрессе при изотермической штамповке УМЗ лопатки, обеспечило режим штамповки, удовлетворяющий термомеханическим условиям низкотемпературной сверхпластической деформации наноструктурного сплава ВТ-6, т. е. $\dot{\varepsilon}_i \leq 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ при $T=650 \text{ }^\circ\text{C}$.

10. Полученные результаты и рекомендации приняты к использованию в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению 150700 «Машиностроение» по профилю подготовки «Машины и технология обработки металлов давлением»

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

В российских изданиях, рекомендованных ВАК

1. Равноканальное угловое прессование цилиндрических стальных заготовок при повышенной температуре / **А.В. Боткин**, Р.З. Валиев [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2011. № 3. С. 22–28.

2. Деформационные и силовые параметры углового прессования цилиндрической металлической заготовки / **А.В. Боткин**, Р.З. Валиев [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2011. № 8. С. 3–8.

3. Интенсивная пластическая деформация цилиндрической заготовки из сплава 6061 равноканальным угловым прессованием в параллельных каналах / **А.В. Боткин**, М.Ю. Мурашкин [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2009. № 4. С. 33–38.

4. Деформационные и силовые параметры процесса равноканального углового прессования в параллельных каналах / **А.В. Боткин**, Г.И. Рааб [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2009. № 6. С. 3–7.

5. **Боткин А.В.**, Бикбулатова В.З., Степин П.С. Изучение влияния вида испытания на характер кривой упрочнения металла при больших степенях деформации // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2008. № 11. С. 24–27.

6. Деформационные и силовые параметры процесса равноканального углового прессования длинномерной заготовки по схеме «Conform» / **А.В. Боткин**, Р.З. Валиев [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2009. № 11. С. 8–14.

7. Экспериментально-аналитический метод определения напряжений трения в процессах обработки металлов давлением волочения сталей / В.М. Грешнов, **А.В. Боткин** [и др.] // Известия ВУЗОВ. Черная металлургия. 2002. № 1. С. 26–29.

8. Интенсивная пластическая деформация выдавливанием, совмещенным с равноканальным угловым прессованием в параллельных каналах / **А.В. Боткин**, Р.З. Валиев [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2010. № 10. С. 36–42.

9. Грешнов В.М., **Боткин А.В.**, Напалков А.В. Напряженно-деформированное состояние заготовки при прямом осесимметричном выдавливании // Известия ВУЗОВ. Черная металлургия. 2001. № 5. С. 27–30.

10. Деформационные и силовые параметры процесса выдавливания, совмещенного с равноканальным угловым прессованием в параллельных каналах / **А.В. Боткин**, Р.З. Валиев [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2010. № 11. С. 35–40.

11. Прогнозирование разрушения металлов в процессах холодной пластической деформации. Сообщение 2. Учёт анизотропного упрочнения и экспериментальная проверка модели пластической деформации и разрушения / В.М. Грешнов, **А.В. Боткин** [и др.] // Проблемы прочности. 1999. № 2. С. 74–84.

12. Математическое моделирование многопереходных процессов холодной объемной штамповки на основе единой физико-математической теории пластического формообразования металлов. Часть 1. Расчет напряженно-деформированного состояния / В.М. Грешнов, **А.В. Боткин** [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2001. № 8. С. 33–37.

13. Математическое моделирование многопереходных процессов холодной объемной штамповки на основе единой физико-математической теории пластического формообразования металлов. Часть 2. Расчет деформационной поврежденности и прогнозирование макроразрушения / В.М. Грешнов, **А.В. Боткин** [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2001. № 10. С. 34–39.

14. Прогнозирование разрушения металла в процессе интенсивной пластической деформации длинномерной заготовки равноканальным угловым прессованием конформ / **Боткин А.В.**, Валиев Р.З. [и др.] // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16. № 8 (53). С. 98–103.

15. Грешнов В.М., **Боткин А.В.**, Напалков А.В. Применение теории пластичности изотропного материала с анизотропным упрочнением при математическом моделировании операций формообразования // Известия ВУЗОВ. Черная металлургия. 2000. № 1. С. 27–30.

16. Оценка поврежденности металла при холодной пластической деформации с использованием модели разрушения Кокрофта-Латама / **А.В. Боткин**, Р.З. Валиев [и др.] // Деформация и разрушение материалов. 2011. № 7. С. 17–22.

17. Прогнозирование разрушения металла в процессе интенсивной пластической деформации цилиндрической заготовки равноканальным угловым прессованием / **А.В. Боткин**, Р.З. Валиев [и др.] // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2011. № 4. С. 38–42.

18. Моделирование и аналитическая оценка силовых параметров изотермической штамповки лопатки из наноструктурного сплава ВТ-6 / **А.В. Боткин**, А.Ф. Шаяхметов [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2008. № 11. С. 43–48.

19. **Боткин А.В.** Расчет ширины мостика расширяющейся облойной канавки открытого штампа для штамповки осесимметричных поковок // Известия ВУЗОВ. Черная металлургия. 1996. № 1. С. 37–39.

20. **Боткин А.В.**, Вареник Е.В., Кельнер М.С. Моделирование пластического кручения длинномерной цилиндрической заготовки // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. № 3. С. 64–67.

21. **Боткин А.В.**, Вареник Е.В., Кельнер М.С. Моделирование пластического кручения-сжатия длинномерной профилированной заготовки // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. № 5. С. 73–77.

22. Получение ультрамелкозернистых металлов и сплавов методами интенсивной пластической деформации: новые подходы в разработке технологий // Р.З. Валиев, **А.В. Боткин** [и др.] // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2012. № 8. С. 44–47.

23. Расчет поврежденности металла при угловом прессовании по схеме «Конформ» // **А.В. Боткин**, Р.З. Валиев [и др.] // Наноинженерия. 2013. № 3. С. 36–41.

24. Исследование пластичности металла при сдвиге на основе результатов испытаний образцов кручением, совместным с растяжением (сжатием) // **А.В. Боткин**, Р.З. Валиев [и др.] // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2013. № 6. С. 60–65.

Патенты

25. Способ прессования металлов и устройство для его осуществления: пат. Рос. Федерация. № 2379148 / А.Ф. Шаяхметов, **А.В. Боткин** [и др.], № 2008113671/02; заявл. 07.04.2008; опубл. 20.01.2010. Бюл. № 2. 8 с.

26. Способ штамповки заготовок из наноструктурных титановых сплавов: пат. Рос. Федерация. № 2382686 / А.Ф. Шаяхметов, **А.В. Боткин** [и др.], № 2008105266; заявл. 12.02.2008; опубл. 27.02.2010. 3 с.

Другие журналы и издания

27. Анализ и экспериментальное исследование НДС процесса РКУП в условиях высоких давлений // Г.И. Рааб, **А.В. Боткин** [и др.] // Физика и техника высоких давлений. 2002. Т. 12. № 4. С. 47–52.

28. Моделирование процесса изотермической штамповки лопатки ГТД из наноструктурного сплава ВТ-6 // **А.В. Боткин**, А.Ф. Шаяхметов [и др.] // Докл. Междунар. конф. «Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов». СПб, 2007. С. 48.

29. New schemes of ECAP processes for producing nanostructured bulk metallic materials // Raab G.I., **Botkin A.V.** [et al] // AIP Conference Proceedings 10th esaform conference on material forming. Zaragoza, 2007. P. 641–646.

30. **Боткин А.В.** Прогнозирование разрушения металла в процессах равноканального углового прессования на основе результатов испытаний образцов совместным кручением-сжатием (растяжением) // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: Материалы Международной конференции «XXI Уральская школа металловедов-термистов». 6–10 февраля 2012 г. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2012. С. 117.

Подписано в печать 17/06/14. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать ризографическая. Тираж 130 экз. Заказ 997.
Гарнитура «TimesNewRoman». Отпечатано в типографии
«ПЕЧАТНЫЙ ДОМ» ИП ВЕРКО.
Объем 2 п.л. Уфа, Карла Маркса 12 корп. 4.
т/ф: 8(347) 27-27-600, 27-19-123