

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

ПРОКОФЬЕВА ОКСАНА ВИКТОРОВНА

УДК 621.77.043

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЁТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ПРОЦЕССА ВИНТОВОЙ ЭКСТРУЗИИ**

Специальность 05.03.05 «Процессы и машины обработки давлением»

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание научной степени
кандидата технических наук**

Донецк – 2008

Диссертацией является рукопись
Работа выполнена в Донецком физико-техническом институте
им. А.А. Галкина Национальной академии наук Украины

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
БЕЙГЕЛЬЗИМЕР Яков Ефимович,
Государственное высшее учебное заведение
«Донецкий национальный технический университет»,
(г. Донецк), профессор кафедры
«Обработка металлов давлением».

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
РЯБИЧЕВА Людмила Александровна,
Востоchnоукраинский национальный
университет им. В. Даля, (г. Луганск), заведующая
кафедрой «Прикладное материаловедение»;

кандидат технических наук,
САВЧЕНКО Олег Константинович,
Донбасская государственная машиностроительная
академия, (г. Краматорск), старший преподаватель
кафедры «Обработка металлов давлением».

Защита состоится 19 июня 2008 г. в 12 часов на заседании специализированного ученого совета Д 11.052.01 Государственного высшего учебного заведения «Донецкий национальный технический университет» по адресу: 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, I уч. корпус, малый актовй зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного высшего учебного заведения «Донецкий национальный технический университет» по адресу: 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, II уч. корпус.

Автореферат разослан «_____» мая 2008 г.

Ученый секретарь
специализированного ученого совета
Д 11.052.01, д.т.н., проф.



А.В. Яковченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последние десятилетия интенсивно развиваются процессы обработки давлением, в которых достигаются большие деформации при том, что форма и размеры заготовок после обработки практически совпадают с исходными. Задача указанных процессов, получивших название интенсивной пластической деформации (ИПД), состоит в преобразовании структуры и свойств металлов путём измельчения зёрен до субмикронных размеров. Сильнодеформированные металлы при этом приобретают повышенные, а зачастую качественно новые функциональные свойства, представляющие практический интерес, например, сочетание высокой прочности с высокой пластичностью. Это открывает широкие возможности, как для совершенствования имеющихся конструкций, так и для изготовления принципиально новых устройств.

В настоящее время, во всём мире, процессы ИПД пока находятся на стадии лабораторного исследования и опытных разработок. Это, во-первых, связано с тем, что субмикрокристаллические (СМК) металлы пока еще не завоевали своего рынка, а во-вторых — с несовершенством самих процессов ИПД.

Винтовая экструзия (ВЭ) относится к процессам ИПД. Она обладает целым рядом особенностей, как по напряженно-деформированному состоянию (НДС) заготовки, так и в технологической реализации. Это делает процесс привлекательным как для исследований в области материаловедения и физики металлов, так и для практики. Однако возможности ВЭ реализованы далеко не в полной мере из-за недостаточно развитых методов расчёта и проектирования этого процесса. Последнее обусловлено тем, что пока еще слабо изучена механика процесса, нет обоснованных моделей для прогноза структуры и свойств металлов на стадии проектирования, нет соотношений для расчёта основных геометрических параметров деформирующего инструмента. Методы проектирования ВЭ не эффективны и опираются, в основном, на данные, полученные эмпирическим путём. В связи с этим, актуальна научно-техническая задача совершенствования методов расчёта и проектирования процесса винтовой экструзии на основе исследования напряженно-деформированного состояния заготовки и развития модели процессов формирования структуры и свойств металлов при данной обработке.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа непосредственно связана с госбюджетными научно-исследовательскими темами Донецкого физико-технического института НАН Украины: «Фізика нерівноважних станів наноструктурних матеріалів, отриманих при високих тисках» (номер государственной регистрации 0103U005973); «Фізика нових станів конденсованих систем, сформованих в умовах високих тисків» (номер государственной регистрации 0102U003201); «Розробка методів інтенсивної пластичної деформації та створення об'ємних зразків наноматеріалів з високими властивостями» (номер государственной регистрации 0106U000899); «Фізика формування об'ємних наноматеріалів шляхом структурної перебудови твердих тіл» (номер государственной регистрации 0106U006931); «Мультимасштабні ефекти тиску в формуванні наноструктурного стану і фізичних та механічних властивостей твердих тіл» (номер государственной

регистрации 0107U002078); «Фізичні основи технологій створення об'ємних наноструктурних виробів шляхом комплексної обробки із застосуванням високих тисків» (номер государственной регистрации 0107U006334). Во всех перечисленных работах соискатель принимал непосредственное участие в качестве исполнителя.

Цель и задачи исследования. Целью работы является совершенствование методов расчёта и проектирования винтовой экструзии для повышения эффективности процесса и улучшения механических свойств обрабатываемых заготовок на основе исследования напряженно-деформированного состояния материала и развития модели процессов формирования структуры и свойств металлов при винтовой экструзии.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

- оценить влияние формы поперечного сечения канала винтовой матрицы на распределение потоков материала в процессе ВЭ, а также уровень контактных нагрузок на поверхность канала. Определить наиболее эффективную геометрию матрицы в соответствии с целью обработки;
- оценить необходимую высоту винтового участка матрицы, которая обеспечивает качественное деформирование заготовок;
- усовершенствовать экспериментально-расчетный метод определения НДС заготовки при ВЭ с целью использования на этапе проектирования технологии;
- исследовать эволюцию параметров структуры и, как следствие, механических свойств материала при ВЭ на основе континуальной модели процессов фрагментации и разрушения материалов при ИПД. Основываясь на полученных прогнозах провести анализ различных режимов деформирования ВЭ;
- усовершенствовать методы проектирования процесса ВЭ, обобщив полученные в работе результаты.

Объект исследования. Процесс интенсивной пластической деформации – винтовая экструзия.

Предмет исследования. Методы расчёта и проектирования процесса винтовой экструзии.

Методы исследования. Исследование деформированного и напряженного состояния материала при ВЭ выполнено на основе соотношений теории пластического течения с применением усовершенствованного автором экспериментально-расчётного метода. Исследование эволюции характеристик структуры при ВЭ выполнено на основе усовершенствованной автором математической модели процессов фрагментации и разрушения металлов. При определении изменения структурных параметров использованы данные по НДС вдоль линий тока, полученные экспериментально-расчётным методом. Механические свойства определяли методом измерения твердости и испытаниями на растяжение. Для анализа структур использовали оптическую микроскопию. Математическое и компьютерное моделирование проводили в пакете MatLab.

Научная новизна полученных результатов

1. Получили дальнейшее развитие представления о структуре очага деформации при винтовой экструзии: выявлены активные участки поверхности контакта заготовки с матрицей, которые характеризуются наиболее высоким контактным дав-

лением и создают вращающий момент, деформирующий заготовку. Показано, что относительная площадь и распределение активных участков по периметру канала матрицы оказывают существенное влияние на течение металла при винтовой экструзии. В частности, более равномерное их распределение приводит к снижению контактных давлений и интенсификации сдвигов в начале и конце геометрического очага деформации, а неравномерное – повышает контактное давление и интенсифицирует перетекание металла в пределах этого очага.

2. Впервые показано, что обнаруженное ранее экспериментально перетекание металла в пределах поперечного сечения заготовки при винтовой экструзии, с достаточно высокой степенью точности описывается преобразованием простого сдвига, совмещенного с одновременным поворотом, пропорциональным углу сдвига. Выявленная закономерность позволила усовершенствовать экспериментально-расчётный метод исследования течения металла при винтовой экструзии, в результате чего он стал применимым при проектировании этого процесса.

3. Получила дальнейшее развитие математическая модель процессов фрагментации и разрушения металлов при интенсивной пластической деформации путём учета того факта, что напряженно-деформированное состояние материальных частиц изменяется при их движении вдоль линий тока. Модель позволила установить зависимость структурных и механических характеристик металла от параметров процесса. Показано качественное и количественное соответствие результатов прогноза по модели экспериментальным данным, в частности, погрешность в определении напряжения течения для меди, не превышает 14%. На основе разработанной модели выявлены основные, рекомендованные для практики, маршруты винтовой экструзии, отличающиеся воздействием на структуру и свойства металлов.

Практическое значение полученных результатов. Практическое значение имеет усовершенствованный метод проектирования ВЭ, путем применения к нему объектно-ориентированного подхода, и разработанные проектные операции. Он позволяет в короткие сроки определять параметры и режимы деформирования, обеспечивающие получение заготовок с необходимыми структурой и свойствами.

Метод оперативного анализа течения материала при ВЭ позволяет на этапе проектирования технологии определять деформированное и напряженное состояние заготовки.

Математические модели, методы расчёта и принципы проектирования процесса ВЭ используются в учебном процессе кафедры «Обработка металлов давлением» ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»; совместной кафедры ДонФТИ им. А.А. Галкина и Донецкого национального университета; кафедры «Материаловедение, технология и термообработка металлов» Донбасской государственной машиностроительной академии; кафедры «Прикладное материаловедение» Восточноукраинского национального университета им. В. Даля.

Разработанные методы расчета и проектирования процесса ВЭ используются в отделе №16 «Физика высоких давлений и перспективных технологий» ДонФТИ им. А.А. Галкина НАН Украины (ДонФТИ НАНУ).

Экспериментальные данные по линиям тока материала при ВЭ, полученные с применением усовершенствованного экспериментально-расчётного метода, исполь-

зованы в Институте физики твёрдого тела, материаловедения и технологий Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт» для оптимизации конечно-элементных расчётов ВЭ с использованием программного комплекса LS-DYNA.

Заготовки из титанового сплава ВТ1-0, обработанные ВЭ с учётом усовершенствованных методов расчёта и проектирования процесса, используются в Институте проблем материаловедения им. И.М. Францевича НАН Украины в качестве материала для исследований. Титановые заготовки (сплав ВТ1-0), обработанные ВЭ с применением развитых методов расчёта, и последующей гидроэкструзией, переданы в Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН для изготовления титановой проволоки.

Рекомендации по проектированию и программные средства для расчёта высоты винтовых матриц, содержащиеся в работе, переданы на ДП «Техноскрап» ООО «Скрап». Эти разработки позволят проектировать матрицы с низкой материалоемкостью и повышенной стойкостью. Ожидаемый годовой экономический эффект составляет 39 833 грн/год.

Личный вклад соискателя Основная часть исследований, вошедших в диссертационную работу, выполнена совместно с сотрудниками отдела №16 «Физика высоких давлений и перспективных технологий» ДонФТИ НАНУ. При этом автору принадлежит: анализ современного положения процессов ИПД в мире, задач и особенностей их проектирования; проведение теоретических исследований и компьютерного моделирования; изучение деформированного и напряженного состояния заготовки в процессе ВЭ; разработка новых и совершенствование существующих методов расчёта и обработки данных; анализ экспериментальных данных, полученных как самостоятельно, так и выполненных в лаборатории другими исследователями или опубликованных в литературе; применение к процессу ВЭ объектно-ориентированного подхода проектирования. Результаты исследований, выполненных совместно с работниками ДонФТИ НАНУ, опубликованы с соавторами. Конкретный личный вклад соискателя в этих работах дан в виде кратких аннотаций после указания их номеров в списке опубликованных работ по теме диссертации.

Апробация результатов диссертации. Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждены на: V Уральской школе-семинаре металлургов-молодых учёных, 17-22.11.2003, г. Екатеринбург, Россия; международной научно-технической конференции «Процессы и машины обработки давлением» в 2004-2007 г., г. Краматорск; международной конференции «Высокие давления», 2004, 2006 г., г. Донецк; NATO ARW “Nanostructured Materials by High-Pressure Severe Plastic Deformation”, 22-26.09.2004, Donetsk; Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур ПРОСТ» в 2004, 2006 г., г. Москва, Россия; Уральской школе металлургов-термистов «Актуальные проблемы физического материаловедения сталей и сплавов», 2004 г. Киров, 2006 г. Тольятти, Россия; международном семинаре «Нанотехнология и физика функциональных нанокристаллических материалов», 18-22.04.2005, г. Екатеринбург, Россия; международной конференции «Актуальные проблемы прочности», 3-7.10.2005, г. Вологда, Россия; международной научно-технической конференции «Неразрушающий контроль

и диагностика», 5-11.09.2005, г. Екатеринбург, Россия; «Физика прочности и пластичности материалов», 26-29.06.2006, г. Самара, Россия; международной конференции «Наноразмерные системы НАНСИС-2007», 21-23.11.2007, г. Киев, Украина; семинаре кафедры «Обработка металлов давлением» в ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», 2008 г.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 10 научных работах, в том числе: 8 статей в научных журналах, 2 статьи в сборниках научных трудов. Все 10 статей опубликованы в специализированных изданиях ВАК Украины.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка использованных источников (168 наименований) и 3 приложений. Полный объем диссертации – 196 страниц, общий объем – 138. В разделах диссертации 37 рисунков (в том числе 9 на отдельных страницах) и 16 таблиц (в том числе 4 на отдельных страницах).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первый раздел «Процессы интенсивной пластической деформации. Особенности их расчета и проектирования». Представлен анализ современного состояния исследований и разработок в области ИПД, выявлены особенности расчета и проектирования этих процессов. Значительный вклад в развитие процессов ИПД внесли: В.М. Сегал, Р.З. Валиев, Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, В.З. Спусканюк, В.В. Столяров, В.П. Копылов, Ю.Р. Колобов, Г.А. Салищев, Ю.Н. Подрезов, С.А. Фирстов, В.В. Рыбин, С.В. Добаткин, О.А. Розенберг, Т. Langdon, Y. Zhu, T. Lowe, Z. Horita, M. Zehetbauer, N. Kim и др.

Показано, что процессы ИПД, нацеленные на формирование в материале СМК структур, в настоящее время находятся на стадии лабораторного исследования и опытных разработок. Тем не менее, потенциальные рынки СМК материалов существуют фактически в каждой отрасли промышленности.

Показано, что ВЭ является одним из основных процессов ИПД, имеет ряд отличительных особенностей и располагает возможностями, которые принципиально нереализуемы другими известными процессами ИПД. В настоящее время потенциал ВЭ раскрыт не полностью. Проектирование процесса, к моменту начала данного исследования, основывалось на эмпирических данных. Анализ опыта применения МКЭ для моделирования процессов ИПД показал, что для получения корректных результатов необходима его настройка на экспериментальных данных. Существующий экспериментально-расчётный метод анализа течения при ВЭ не применим для задач проектирования ввиду сложности и длительности его реализации. Не разработаны соотношения, которые позволяли бы прогнозировать параметры структуры и механические свойства деформируемого материала на стадии проектирования. Все это обосновывает необходимость в развитии соответствующих методов расчёта и проектирования процесса ВЭ.

Второй раздел «Выбор методов исследования и материалов». В качестве материалов для проведения экспериментальных исследований были выбраны медь

марки М1, вторичный алюминиевый сплав АК9 и технически чистый титан марки ВТ1-0. Выбор титана обусловлен перспективностью практического применения данного материала, когда в нём сформирован комплекс повышенных механических свойств. Медь является классическим модельным материалом, а сплав АК9 выбран в связи с актуальной на сегодняшний день задачей повышения пластичности вторичных алюминиевых сплавов.

НДС заготовки при ВЭ находили экспериментально-расчетным методом, так как численные методы базируются на определяющих соотношениях металла, которые пока недостаточно изучены в условиях ИПД. Использованный в работе экспериментально-расчетный метод опирается на определение, так называемой, функции перетекания $P(z)$, обеспечивающей наилучшее приближение экспериментальных линий тока теоретическими. В предшествующих работах функция $P(z)$ содержала большое число параметров, для нахождения которых необходимо было иметь информацию о координатах линий тока более, чем в 30 сечениях заготовки. Выполненный детальный анализ экспериментов позволил установить, что с достаточно высокой степенью точности функция перетекания имеет вид $P(z) = k \cdot \beta(z)$, где $\beta(z)$ описывает изменение угла ската канала матрицы, включая его заходную и калибрующую части, k - параметр. В разделе 3 диссертации показано, что резкое сокращение числа параметров функции $P(z)$ объясняется выявленной закономерностью перетекания металла в пределах поперечного сечения заготовки при ВЭ.

В качестве базовой модели теоретического прогноза структурных параметров и механических свойств металлов принята модель процессов фрагментации и разрушения материалов при ИПД. Для неё определены значения параметров и указано на необходимость конкретизации для процесса ВЭ путём учёта изменения НДС материала вдоль линий тока.

Для проектирования процесса ВЭ принят объектно-ориентированный подход, как наиболее приемлемый в случае мелкосерийного производства. Каждому параметру процесса (объекту) ставится в соответствие своя проектная операция, которая определяет значения его составляющих. Это может осуществляться одним из следующих методов: выбор из набора рекомендаций на основе данных, имеющихся к моменту обращения к соответствующей операции; получение информации из баз данных (задание констант); получение новых данных на основе уже имеющихся путём расчетов по методикам, заложенным в данной проектной операции. Для проектных операций определена структура, представленная в таблице 1.

Таблица 1

Структура проектной операции

| |
|--------------------------------------|
| НАИМЕНОВАНИЕ ПРОЕКТНОЙ ОПЕРАЦИИ |
| Проектируемый объект |
| Объекты, значения которых необходимы |
| Методы определения значения объекта |

На основе поставленных в работе задач, для ВЭ введены следующие проектные операции: определение формы профиля матрицы, определение высоты винтового канала, определение НДС заготовки, определение режима деформирования. Информационное взаимодействие между ними осуществляется по принципу «классной доски», на которой параллельно выполняемые процессы находят необходимую информацию, и на которую поступают данные их работы, используемые в дальнейшем другими процессами. Проектирование представляет собой следующую процедуру: поступление запроса на определение какого-либо объекта; обращение к соответствующей ему проектной операции; поиск на «классной доске» этого объекта или его составляющих; если объект не найден, то поиск на «классной доске» объектов, значения которых необходимы для определения искомого; запуск методов определения, зашитых в проектной операции, на основе имеющейся информации.

Третий раздел «Влияние параметров деформирующего инструмента на характеристики пластического течения при винтовой экструзии». В этом разделе получили дальнейшее развитие представления о структуре очага деформации при ВЭ: выявлены активные участки поверхности контакта заготовки с матрицей, которые характеризуются наиболее высоким контактным давлением и создают вращающий момент, деформирующий заготовку. Их более равномерное распределение приводит к снижению контактных давлений и интенсификации сдвигов в начале и конце геометрического очага деформации, а неравномерное – повышает контактное давление и интенсифицирует перетекание металла в пределах этого очага.

Для количественного сопоставления двух произвольных профилей сечения винтовых матриц введен параметр Φ_{12} , представляющий собой отношение среднего контактного давления на активных участках матрицы 1 к соответствующей величине для матрицы 2

$$\Phi_{12} = \frac{\int_0^h \int_0^{2\pi} \frac{\frac{\operatorname{tg}\beta_2}{R_2} \frac{\partial f_2}{\partial \psi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\operatorname{tg}\beta_2}{R_2} \frac{\partial f_2}{\partial \psi_2}\right)^2 + \left(\frac{1}{f_2(\psi_2)} \frac{\partial f_2}{\partial \psi_2}\right)^2}} dS_2}{\int_0^h \int_0^{2\pi} \frac{\frac{\operatorname{tg}\beta_1}{R_1} \frac{\partial f_1}{\partial \psi_1}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\operatorname{tg}\beta_1}{R_1} \frac{\partial f_1}{\partial \psi_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{f_1(\psi_1)} \frac{\partial f_1}{\partial \psi_1}\right)^2}} dS_1}, \quad (1)$$

где $\psi = \varphi - \frac{z}{R} \operatorname{tg}\beta$, (z, r, φ) - цилиндрические координаты, $r = f(\varphi)$ - уравнение контура сечения матрицы, R - максимальное значение r на контуре (радиус описанной окружности), β - угол ската винтовой линии при $r = R$, dS - элемент винтовой поверхности; индексы 1 и 2 означают первую и вторую матрицы, соответственно.

Если $\Phi_{12} > 1$, то профиль 2 создает более равномерное распределение контактного давления, имеет меньшее его значение и вызывает меньшее перетекание металла в пределах поперечного сечения заготовки, нежели профиль 1.

Введенный параметр позволил разработать проектную операцию **CS** «Определение формы профиля винтового канала» для назначения формы сечения канала винтовой матрицы в зависимости от задачи обработки.

Получено уравнение, решением которого является необходимая высота винтового участка канала матрицы. Оно базируется на допущении, что всё сечение заготовки переходит в пластическое состояние, когда вращающий момент, создаваемый активными участками матрицы, достигает своего критического значения. Матрицы с недостаточно высоким винтовым участком приводят к слабой проработке структуры, а матрицы с чрезмерно большим винтовым участком – к завышенным значениям давления экструзии за счёт увеличенной поверхности трения, что понижает стойкость инструмента. Указанное уравнение имеет вид

$$6\sqrt{3} \int_0^h \int_0^{2\pi} \frac{\frac{\partial f}{\partial \psi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\operatorname{tg} \beta}{R} \frac{\partial f}{\partial \psi}\right)^2 + \left(\frac{1}{f(\psi)} \frac{\partial f}{\partial \psi}\right)^2}} dS = \int_0^{2\pi} f^3(\varphi) d\varphi, \quad (2)$$

где h - искомая высота винтового участка канала матрицы, а интегрирование ведётся только по активным участкам поверхности винтовой матрицы.

На этой основе разработана проектная операция **DN** «Определение высоты винтового канала». Объекты, значения которых необходимы для реализации данной операции – геометрические параметры винтового канала и форма его профиля. Методы определения значения объекта состоят в численном решении соответствующего уравнения.

Анализ полученных экспериментально-расчетным методом результатов позволил показать, что перетекание металла в пределах поперечного сечения заготовки при ВЭ, с достаточно высокой степенью точности описывается преобразованием простого сдвига, совмещенного с одновременным поворотом, пропорциональным углу сдвига. В работе данная закономерность трактуется как дополнительный сдвиг, плоскость которого параллельна оси экструзии. На рис.1 представлена схема сдвигов, которые имеют место при ВЭ.

Выявленная закономерность позволила усовершенствовать экспериментально-расчётный метод исследования течения металла при ВЭ и на его основе предложить метод оперативного анализа, применимый для проектирования процесса ВЭ. Принципиальное отличие нового метода в обработке экспериментальных данных состоит в возможности описания всего течения материала при ВЭ с использованием лишь одного подгоночного параметра k , значение которого определяется из условия наилучшего приближения экспериментальных данных.

В плане технической реализации анализ данным методом опирается лишь на две картины меток – исходную (до деформирования) и после деформирования ВЭ.

Это исключает сложный процесс нарезки образца с фиксированным малым шагом и дальнейшую обработку серии последовательных сечений, за счёт чего значительно сокращается объём экспериментальных данных и время, необходимое для их обработки.

Предлагаемый метод оперативного анализа был протестирован путём обработки результатов одного и того же эксперимента по выявлению линий тока при ВЭ. Расхождение результатов, полученных двумя методами, по величине скорости деформации, не превысило 5%. Рис.2 иллюстрирует распределение накопленной эквивалентной деформации по сечению заготовки, полученное с применением метода оперативного анализа.

Экспериментальные данные по линиям тока, полученные оперативным методом, были применены для «настройки» МКЭ-расчетов процесса ВЭ. При этом было получено более корректное описание деформированного состояния при ВЭ.

Четвёртый раздел «Формирование структуры и свойств металлов при винтовой экструзии». Для применения модели процессов фрагментации и разрушения материалов при ИПД к расчету процесса ВЭ, было учтено изменение НДС материальных точек заготовки при их движении вдоль линий тока. Характер этого

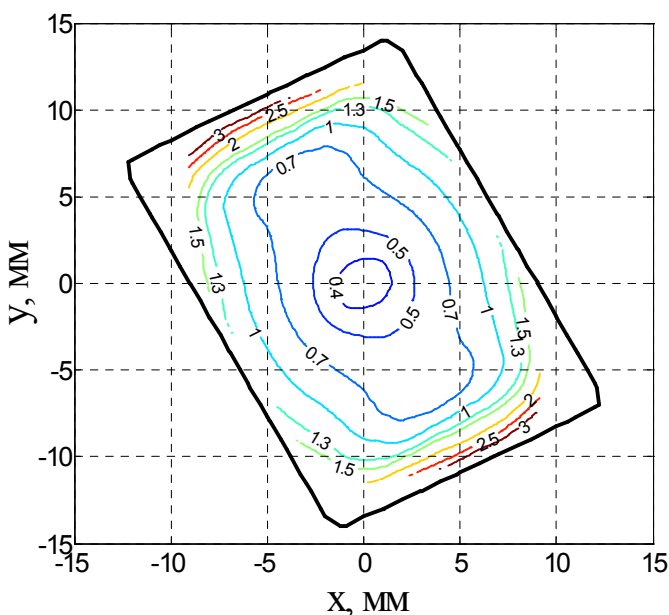


Рис. 2. Распределение изолиний эквивалентной деформации по сечению заготовки, обработанной ВЭ

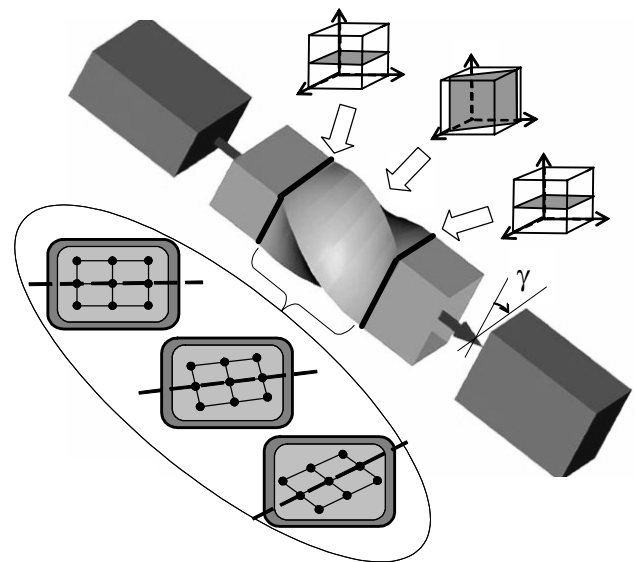


Рис.1. Схема сдвигов, происходящих при ВЭ, с указанием соответствующих им плоскостей

изменения определялся методом оперативного анализа.

Напряженное состояние металла при ВЭ определялось на основе найденного поля скоростей деформаций подобно тому, как это делается в методе визиопластичности. Пример распределения гидростатического давления по сечению заготовки на выходе из винтового канала, приведен на рис. 3.

Показано, что по мере продвижения деформируемого материала по винтовому каналу, давление от активных участков и периферии постепенно проникает в центральную область заготовки и распределяется по сечению более равномерно, однако положение максимумов сохраняется.

Разработанные методики определения напряженного и деформированного состояния при ВЭ позволили сформировать соответствующую проектную операцию 3S «Определение НДС заготовки». Объекты, значения которых необходимы для данной операции – геометрические параметры винтовой матрицы, включая форму профиля и высоту винтового участка, угол ската винтовой линии вдоль всего канала матрицы, а также предел текучести материала и величина противодавления. Методом определения является оперативный анализ и входящие в него расчётные соотношения.

Полная система конечно-разностных уравнений, которая позволяет определять характеристики структуры материала (средний размер зерна $d \approx 1/S$ и относительную пористость θ) в процессе ВЭ при заданных функциях деформаций $\Lambda(z) = \sqrt{3}e_i(z)$ и гидростатического давления, имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{N}_{i+1} = \bar{N}_i + \left[(C_1 + C_2 C_5 \bar{N}_{b,i}) F(\bar{S}_i) - (C_3 + C_4) \bar{N}_i \right] \frac{d\Lambda(z_i)}{dz} \Delta z; \\ \bar{N}_{b,i+1} = \bar{N}_{b,i} + \left[C_4 \bar{N}_i - C_5 \bar{N}_{b,i} \right] \frac{d\Lambda(z_i)}{dz} \Delta z; \\ \bar{S}_{i+1} = \bar{S}_i + \frac{C_5 \bar{N}_{b,i}}{\bar{S}_i + \bar{S}_0} \cdot \frac{d\Lambda(z_i)}{dz} \Delta z; \\ \Theta_{i+1} = \Theta_i + \left[C_3 \bar{N}_i^2 d_c^{-3} v - C_6 \Theta_i \right] \frac{d\Lambda(z_i)}{dz} \Delta z, \end{array} \right. \quad (3)$$

где N , N_b - вспомогательные величины; $C_1 - C_6$ - параметры модели, значения которых определены в работе (в частности, гидростатическое давление входит в выражение для C_6); $F(S)$ - множитель, учитывающий долю фрагментов, не подверженных делению, то есть размер которых достиг d_c ; S_0 - суммарная площадь границ зёрен до деформирования; v - объем одной микропоры. Черта над переменными означает, что величины представлены в безразмерном виде.

На основе разработанной модели показано, что при ВЭ имеются различные маршруты деформирования, приводящие к разным структурам и свойствам мате-

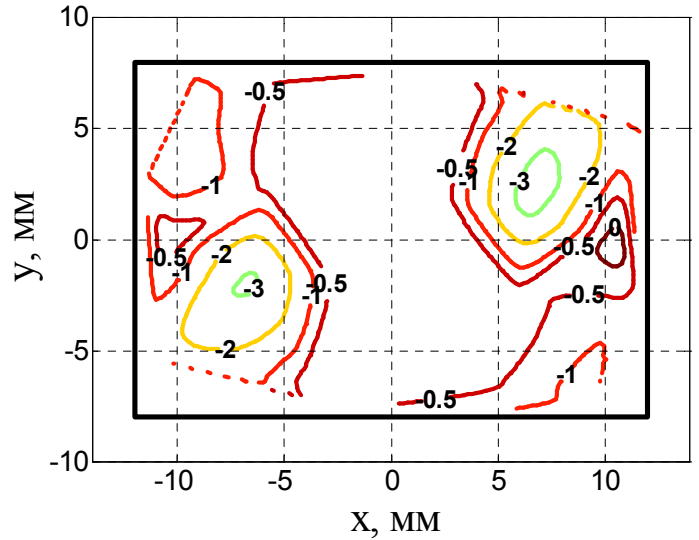


Рис. 3. Распределение изолиний гидростатического давления (нормированного на σ_T материала) по сечению заготовки вблизи сечения выхода из винтового канала (без противодавления)

риалов. Установлено следующее: применение чередующихся винтовых матриц разноимённой ориентации $\{(L\uparrow), (P\uparrow), (L\uparrow), (P\uparrow), \dots\}$ оказывает положительное влияние на прочностные свойства материала, но негативно сказывается на пластичности. При использовании винтовых матриц одноимённой ориентации, рекомендуется периодическая смена направления подачи заготовки в канал матрицы для выравнивания структуры и свойств по сечению заготовки $\{(L\uparrow), (L\downarrow), (L\uparrow), (L\downarrow), \dots\}$. Анализ влияния противодействия показал, что его повышение позволяет улучшить прочностные характеристики материала, восстановить пластические свойства, а также сократить число проходов ВЭ, требуемых для достижения заданной прочности. Однако увеличение противодействия сопровождается повышением силовой нагрузки на инструмент, поэтому его конкретная величина определяется на основе многокритериальной оптимизации в диалоговом режиме проектирования.

Проведенный с применением модели анализ позволил сформировать проектную операцию **DR** «Определение режима деформирования», которая опирается на данные, полученные в результате работы всех предыдущих операций. Методом определения данного объекта является расчёт в диалоговом режиме с помощью математической модели формирования структуры и свойств металлов при ВЭ. При этом задаётся режим деформирования и проверяется, удовлетворяет ли полученный прогноз требованиям технического задания по характеристикам структуры и механическим свойствам. Если нет, то согласно рекомендациям, необходимо изменить параметры режима деформирования и повторить расчёт до тех пор, пока требования не будут максимально приближены.

Показано качественное и количественное соответствие прогноза по модели эксперименту, в частности, погрешность в определении напряжения течения для меди, не превышает 14%. Нашли своё экспериментальное подтверждение и другие теоретические представления и гипотезы. В частности, после двух проходов ВЭ наблюдается заметное увеличение прочностных свойств материала в двух углах сечения заготовки, которые соответствуют активным участкам поверхности матрицы. Справедливость спрогнозированного повышения пластических свойств материала в результате его деформационной обработки методом ВЭ, подтверждается результатами испытаний по показателю относительного сужения в шейке при разрыве, полученными на серии образцов из титана ВТ1-0 (рис.4).

В разработанной модели введен параметр α^* аккомодации структурных элементов при пластической деформации, который характеризует интенсивность возникновения повреждений структуры деформируемого материала и, следовательно, изменение его пластических свойств. Для случая ВЭ изменение параметра α^* , полученное путём расчетов по модельным соотношениям, приведено на рис. 5. При этом степень деформации сдвига, при которой наблюдается возрастание экспериментальной кривой на рис. 4, соответствует теоретическому прогнозу рис. 5.

Пятый раздел «Объектно-ориентированное проектирование процесса винтовой экструзии». С использованием разработанных в диссертации методов расчёта и проектирования был проведен анализ геометрии винтовых матриц для пяти различных профилей сечения, и на его основе сформированы рекомендации. Установлено, что для формирования в материале СМК структур наиболее предпочти-

тельными характеристиками обладает профиль сечения в виде прямоугольника со скруглёнными углами. Показано, что рациональное соотношение между большей и меньшей сторонами профиля составляет 1.5 – 1.6.

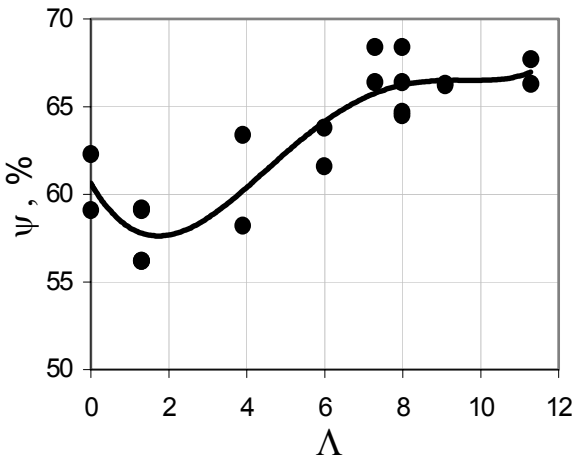


Рис. 4. Изменение относительного сужения в шейке при разрыве (ψ) образцов титана ВТ1-0, обработанных методом ВЭ (эксперимент)

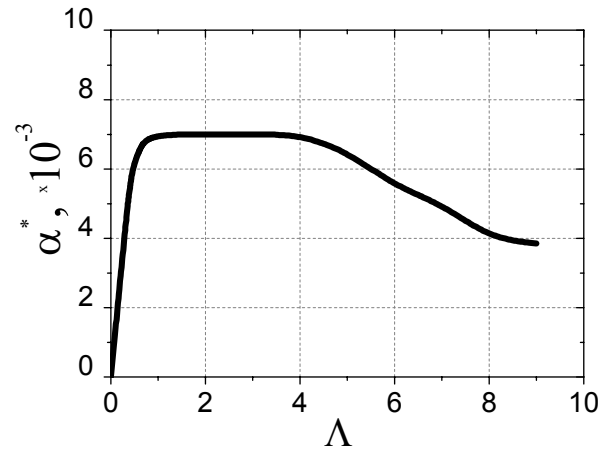


Рис. 5. Изменение параметра аккумуляции α^* в процессе ВЭ, полученное для титана ВТ1-0 (расчёт)

На основе расчётов в рамках разработанной модели процессов формирования структуры и свойств при ВЭ, обоснована целесообразность введения данного процесса в технологическую цепочку обработки титана ВТ1-0 для подготовки СМК структуры, которая будет наследоваться при последующих технологических операциях, в частности гидроэкструзии (ГЭ) (рис. 6). Это позволит исключить или свести к минимуму количество промежуточных пластифицирующих отжигов в процессе получения из таких заготовок титановой проволоки.

Разработанная проектная операция **ДН** применена для оценки необходимой высоты матриц указанных размеров. Согласно выполненному расчёту, для качественной проработки структуры вторичного алюминия АК9 с использованием матриц профиля 50x80мм и углом $\beta = 60^\circ$, необходимая высота винтового канала составляет 31мм. Отсюда следует, что длина существующих матриц может быть уменьшена на 22.5% при сохранении качества продукции. Таким образом могут быть снижены затраты дорогостоящей инструментальной стали, используемой для производства винтовых матриц, и повышена их стойкость. Данные рекомендации по проектированию и программные средства для расчёта высоты винтовых матриц переданы на ДП «Техноскрап» ООО «Скрап». Эти разработки позволят проектировать матрицы с низкой материалоемкостью и повышенной стойкостью. Ожидаемый годовой экономический эффект составляет 39 833 грн/год.

Сформулированные в предыдущих главах рекомендации и разработанные методы расчёта позволили определить для процесса ВЭ минимальный набор из четырёх проектных операций. На их основе разработана проектная цепочка, представ-

ленная в виде блок-схемы, позволяющей усовершенствовать технологию обработки металлов и сплавов данным методом.

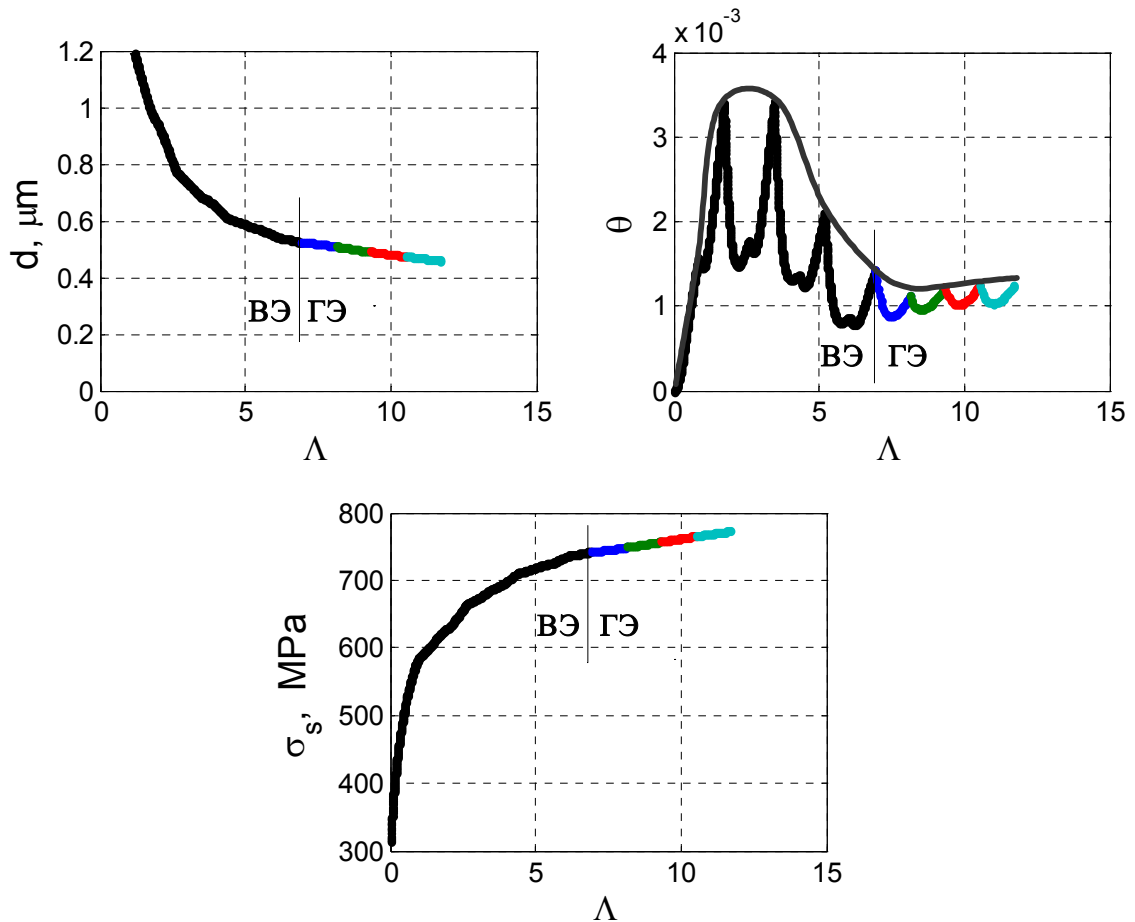


Рис. 6. Изменение среднего размера зерна d , деформационной пористости θ и напряжения течения σ_s в зависимости от деформации сдвига Λ при комбинированной обработке ВЭ и последующей ГЭ титана ВТ1-0

ВЫВОДЫ

В диссертации решена актуальная научно-техническая задача **совершенствования методов расчёта и проектирования процесса винтовой экструзии на основе исследования напряженно-деформированного состояния заготовки и развития модели процессов формирования структуры и свойств металлов при данной обработке.**

Основные научные положения и практические результаты работы заключаются в следующем.

1. Выполнен анализ современного этапа развития процессов ИПД. Установлено, что в настоящее время во всём мире данные процессы находятся на этапе лабораторных исследований и опытных разработок, что сдерживает промышленное внедрение получаемых СМК материалов, несмотря на многообразие их потенциальных рынков. ВЭ занимает прочные позиции среди основных методов ИПД. Для её разви-

тия необходимо совершенствование методов расчёта и проектирования процесса. Актуальными являются задачи оперативного анализа деформированного и напряженного состояния заготовки; исследование влияния геометрических параметров инструмента на распределение потоков деформируемого материала; прогнозирование характеристик структуры материала и его механических свойств; совершенствование методов проектирования процесса ВЭ.

2. Получили дальнейшее развитие представления о структуре очага деформации при ВЭ: выявлены активные участки поверхности контакта заготовки с матрицей, которые характеризуются наиболее высоким контактным давлением и создают вращающий момент, деформирующий заготовку. Относительная площадь и распределение активных участков по периметру канала матрицы оказывают существенное влияние на течение металла при ВЭ. В частности, их более равномерное распределение приводит к снижению контактных давлений и интенсификации сдвигов в начале и конце геометрического очага деформации, а неравномерное – повышает контактное давление и интенсифицирует перетекание металла в пределах очага. На этой основе разработана проектная операция **СS** «Определение формы профиля винтового канала матрицы».

3. Получено уравнение, решением которого является необходимая высота винтового участка канала матрицы. Оно базируется на допущении, что всё сечение заготовки переходит в пластическое состояние, когда вращающий момент достигает своего критического значения. Матрицы с недостаточно высоким винтовым участком приводят к слабой проработке структуры, а матрицы с чрезмерно большим винтовым участком – к завышенным значениям давления экструзии за счёт увеличенной поверхности трения, что понижает стойкость инструмента. Этот результат был положен в основу проектной операции **ДН** «Определение высоты винтового канала». Расчёт показал, что высота винтового участка, которую до настоящего момента имели матрицы, является завышенной на 23,5% и может быть уменьшена.

4. Впервые показано, что обнаруженное ранее экспериментально перетекание металла в пределах поперечного сечения заготовки при ВЭ, с достаточно высокой степенью точности описывается преобразованием простого сдвига, совмещенного с одновременным поворотом, пропорциональным углу сдвига. Выявленная закономерность позволила усовершенствовать экспериментально-расчётный метод исследования течения металла при ВЭ, в результате чего он стал применимым при проектировании этого процесса. Предлагаемый метод оперативного анализа был протестирован путём обработки результатов одного и того же эксперимента по выявлению линий тока при ВЭ. Расхождение результатов, полученных двумя методами, по величине скорости деформации, не превысило 5%.

5. Исследования по влиянию профиля сечения винтовой матрицы на пластическое течение металла, выполненные с помощью метода оперативного анализа, подтвердили спрогнозированное теоретически предположение о повышенном перетекании материала в случае профиля, используемого в настоящее время, по сравнению с прямоугольным профилем сечения. Анализ кривых изменения эквивалентной деформации вдоль линии тока выявил отличительный характер накопления деформации для разных областей сечения. Экспериментальные и расчётные данные по

линиям тока, полученные оперативным методом, применены для «настройки» конечно-элементных расчетов ВЭ с использованием программного комплекса LS-DYNA. Применение уточнённого МКЭ-пакета позволяет получать более корректное описание ВЭ, по сравнению со стандартными пакетами.

6. Разработана и применена методика расчёта напряженного состояния материала при ВЭ по деформированному состоянию, определенному с помощью метода оперативного анализа. Показано, что наиболее высокое гидростатическое давление наблюдается вблизи активных участков матрицы. По мере продвижения заготовки вглубь канала, давление распределяется по сечению более равномерно, однако положение максимумов сохраняется. Разработанные методики определения напряженного и деформированного состояния при ВЭ позволили сформировать соответствующую проектную операцию **3S** «Определение НДС заготовки».

7. Получила дальнейшее развитие математическая модель процессов фрагментации и разрушения металлов при ИПД путём учета того факта, что НДС материальных частиц изменяется при их движении вдоль линий тока. Модель позволила установить зависимость структурных и механических характеристик металла от параметров ВЭ. Показано качественное и количественное соответствие прогноза по модели данным эксперимента, в частности, погрешность в определении напряжения течения для меди М1 не превышает 14%. Прогнозируемое повышение пластических характеристик титана, начиная со второго прохода ВЭ, согласуется с экспериментальными результатами по показателю ψ (относительное сужение в шейке при разрыве). Разработанные модельные представления позволили сформировать проектную операцию **DR** «Определение режима деформирования», которая опирается на данные, полученные в результате работы всех предыдущих проектных операций.

8. Результаты моделирования показали, что при ВЭ могут быть реализованы различные маршруты, отличающиеся воздействием на структуру и свойства металлов. Теоретически показано, что применение чередующихся винтовых матриц разноимённой ориентации снижает размер фрагментов и повышает прочностные характеристики металлов по сравнению с маршрутом ВЭ через матрицы одноименной ориентации, при одном и том же суммарном числе проходов. В рамках модели это объясняется увеличением амплитуды простого сдвига в поперечной плоскости при ВЭ. Данный вывод подтвержден в эксперименте, в частности, применение маршрута с чередующимися разноименными матрицами, при общем числе проходов ВЭ равном 6, позволяет снизить средний размер фрагментов сплава Al-3Mg-0.3Sc-0.10Zn с 0,46мкм до 0,33мкм и повысить его предел текучести с 308МПа до 324МПа. Для сплава VT1-0 предел текучести увеличивается с 600 МПа до 680 МПа. При использовании винтовых матриц одноимённой ориентации, рекомендуется периодическая смена направления подачи заготовки в канал матрицы для выравнивания структуры и свойств заготовки по сечению.

9. Проведение ВЭ с противодавлением позволяет повысить прочностные характеристики материала и восстановить его пластические свойства (например, согласно расчётам, для меди М1 повышение противодавления до величины порядка $3\sigma_T$ приводит к увеличению σ_s до 10% одновременно с понижением θ на 83%). Однако, увеличение противодавления сопровождается возрастающей силовой на-

грузкой на инструмент, поэтому его конкретная величина определяется на основе многокритериальной оптимизации в диалоговом режиме проектирования.

10. Сопоставление пяти возможных профилей сечения винтового канала матрицы показало, что для формирования в материале СМК структур наиболее предпочтительными характеристиками обладает профиль сечения канала №5 в виде прямоугольника со скруглёнными углами. При отсутствии выраженных концентраторов напряжений ему соответствует минимальная высота винтового канала ($h = 8\text{мм}$), наилучшее раскрытие поверхности заготовки ($K_{\text{expand}} = 20.3\%$) и значительная доля площади активных областей поверхности матрицы ($K_{\text{active}} = 0.48$). Этот результат позволил уточнить проектную операцию CS. Установлено, что наиболее предпочтительное соотношение между большей и меньшей сторонами профиля составляет: 1.5 – 1.6.

11. Согласно проведенному расчёту для винтовых матриц с поперечными размерами 50x80мм, которые применяются при пластифицирующей обработке вторичных алюминиевых сплавов, высота винтового участка может быть уменьшена на 22.5%, при сохранении качества продукции. Это позволит снизить затраты на производство матриц, как благодаря уменьшению их себестоимости, так и за счёт повышения стойкости. Рекомендации по проектированию и программные средства для расчёта высоты винтовых матриц переданы на ДП «Техноскрап» ООО «Скрап». Ожидаемый годовой экономический эффект составляет 39 833 грн/год.

12. На основе расчётов обоснована целесообразность введения процесса ВЭ в технологическую цепочку обработки титана ВТ1-0 для подготовки мелкозернистой структуры ($d \approx 500\text{мкм}$) с малой повреждённостью ($\theta < 1,5 \cdot 10^{-3}$), которая будет наследоваться при последующих технологических операциях. Это позволило минимизировать количество отжигов и получить конечный продукт – СМК титановую проволоку с повышенными (на 23%) прочностными характеристиками по сравнению с аналогами, произведенными по традиционной технологии.

13. Получил дальнейшее развитие метод проектирования процесса ВЭ путем применения объектно-ориентированного подхода. Усовершенствованный метод проектирования и разработанные проектные операции позволяют эффективным образом учесть все полученные в работе результаты при создании конкретных технологий ВЭ.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Прокофьева О.В. Определение высоты канала матрицы для винтовой экструзии / О.В. Прокофьева // Физика и техника высоких давлений. – 2007. – Т.17, №3. – С.147-152.

2. Прокофьева О.В. Анализ деформированного состояния металла при винтовой экструзии: сопоставление результатов, полученных разными методами / О.В. Прокофьева, Я.Е. Бейгельзимер, Р.Ю. Кулагин // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ: ДГМА. – 2007. – С. 5-9.

3. Бейгельзимер Я.Е. Экспериментальное подтверждение ряда эффектов винтовой экструзии, предварительно спрогнозированных теоретически / Я.Е. Бейгельзимер, О.В. Прокофьева, А.В. Решетов, С.Г. Сынков // *Металл и литьё Украины*. – 2006. – №3-4. – С. 48-51.

4. Сынков С.Г. Анализ технологических схем и конструкций инструмента для винтовой экструзии / С.Г. Сынков, Я.Е. Бейгельзимер, А.В. Решетов, Д.В. Орлов, А.С. Сынков, О.В. Прокофьева // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – 2006. – №3/1 (21). – С. 21-24.

5. Бейгельзимер Я.Е. Изменение структуры металлов в процессах прямой и винтовой экструзии: математическое моделирование / Я.Е. Бейгельзимер, О.В. Прокофьева, В.Н. Варюхин // *Металлы*. – 2006. – №1. – С. 30-38.

6. Beygelzimer Y. Hardening Viscous Failure and Strain Localization during Severe Plastic Deformation / Y. Beygelzimer, O. Prokof'eva, B. Efros, V. Varyukhin // *Materials Science Forum*. – 2006. – V. 503-504. – P. 551-556.

7. Прокофьева О.В. Управление структурой и свойствами материалов при винтовой экструзии – теоретические аспекты / О.В. Прокофьева, Я.Е. Бейгельзимер // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр.* – Краматорськ: ДГМА. – 2006. – С.42-46.

8. Прокофьева О.В. Влияние профиля сечения матрицы на параметры винтовой экструзии / О.В. Прокофьева, Я.Е. Бейгельзимер // *Физика и техника высоких давлений*. – 2005. – Т.15, №4. – С. 65-71.

9. Прокофьева О.В. Оценка величины давления металла на стенки матрицы при винтовой экструзии / О.В. Прокофьева, Я.Е. Бейгельзимер // *Вісник ДДМА*. – 2005. – №1. – С.57-61.

10. Бейгельзимер Я.Е. Фрагментация структуры и разрушение металлических материалов при больших пластических деформациях: предпосылки к моделированию / Я.Е. Бейгельзимер, Б.М. Эфрос, О.В. Прокофьева // *Физика и техника высоких давлений*. – 2004. – Т.14, №3. – С. 58-73.

Личный вклад соискателя в опубликованных работах:

[2] – проведен сравнительный анализ деформированного состояния материала при ВЭ, полученного с помощью МКЭ и определённого экспериментально-расчётной методикой. Разработаны основы проектной операции по определению НДС заготовки. Выявлена закономерность, которая позволила усовершенствовать экспериментально-расчётный метод исследования течения металла при ВЭ; [3] – осуществлён теоретический прогноз эффектов, которые получили экспериментальное подтверждение; [4] – теоретически обосновано, что для получения СМК структур эффективным является использование матриц с сечением винтового канала в форме прямоугольника со скруглёнными углами; [5-7] – разработана модель процессов фрагментации и разрушения металлов при ИПД для процесса ВЭ, установлена зависимость структурных характеристик от параметров этого процесса (маршрутов деформации, противодавления), разработана соответствующая проектная операция; [8] – выявлены активные участки поверхности контакта заготовки с матрицей,

установлено, что их относительная площадь и распределение по периметру канала имеют существенное влияние на течение металла при ВЭ, в частности более равномерное их распределение приводит к снижению контактного давления, а неравномерное – к повышению; [9] – проведен сравнительный анализ разных профилей сечения винтового канала матрицы по их влиянию на течение металла при ВЭ, разработана соответствующая проектная операция; [10] – определены основные механизмы фрагментации структуры материала при ИПД.

АНОТАЦІЯ

Прокоф'єва О.В. Вдосконалення методів розрахунку і проектування процесу гвинтової екструзії. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – Процеси та машини обробки тиском. – Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», Донецьк, 2008.

Розв'язана актуальна науково-технічна задача вдосконалення методів розрахунку і проектування процесу гвинтової екструзії (ГЕ) на основі дослідження напружено-деформованого стану заготовки і розвитку моделі процесів формування структури та властивостей металів при зазначеній обробці.

При ГЕ виявлені активні ділянки поверхні контакту заготовки з матрицею. Показано, що перетікання металу в межах поперечного перерізу заготовки може бути описане перетворенням простого зсуву із одночасним поворотом, пропорційним куту зсуву. На цій основі вдосконалено експериментально-розрахунковий метод, завдяки чому він став придатним при проектуванні ГЕ. Розвинуто модель процесів формування структури і властивостей матеріалу при ГЕ. Вдосконалено метод проектування процесу шляхом застосування об'єктно-орієнтованого підходу та розроблено 4 проектні операції.

Результати роботи використано при розробці технологічної схеми виготовлення титанового дроту із застосуванням ГЕ, та для обґрунтування зменшення висоти гвинтової ділянки матриць для обробки вторинних алюмінієвих сплавів.

Ключові слова: інтенсивні пластичні деформації, гвинтова екструзія, напружено-деформований стан, механічні характеристики, субмікрокристалічна структура, проектування.

АННОТАЦИЯ

Прокофьева О.В. Совершенствование методов расчёта и проектирования процесса винтовой экструзии. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.03.05 – Процессы и машины обработки давлением. – Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», Донецк, 2008.

Решена актуальная научно-техническая задача совершенствования методов расчёта и проектирования процесса винтовой экструзии (ВЭ) на основе исследова-

ния напряженно-деформированного состояния заготовки и развития модели процессов формирования структуры и свойств металлов при данной обработке.

Получили дальнейшее развитие представления о структуре очага деформации при ВЭ: выявлены активные участки поверхности контакта заготовки с матрицей, которые характеризуются наиболее высоким контактным давлением и создают вращающий момент, деформирующий заготовку. Показано, что относительная площадь и распределение активных участков по периметру канала матрицы оказывают существенное влияние на течение металла при ВЭ. Получено уравнение, решением которого является необходимая высота винтового участка канала матрицы. Оно базируется на допущении о том, что всё сечение заготовки переходит в пластическое состояние, когда вращающий момент достигает своего критического значения. На основе расчётов обоснована возможность снижения высоты винтовых матриц, используемых в настоящее время в лаборатории ДонФТИ НАНУ.

Показано, что обнаруженное ранее экспериментально перетекание металла в пределах поперечного сечения заготовки при ВЭ, с достаточно высокой степенью точности описывается преобразованием простого сдвига, совмещенного с одновременным поворотом, пропорциональным углу сдвига. Выявленная закономерность позволила предложить и реализовать метод оперативного анализа напряженно-деформированного состояния заготовки, который включен в процесс проектирования ВЭ.

Получила дальнейшее развитие математическая модель процессов фрагментации и разрушения металлов при интенсивных пластических деформациях путём учета того факта, что напряженно-деформированное состояние материальных частиц изменяется при их движении вдоль линий тока. Модель позволила установить зависимость структурных и механических характеристик металла от параметров ВЭ. Показано качественное и количественное соответствие прогноза по модели эксперименту, в частности, погрешность в определении напряжения течения для меди М1 не превышает 14%. На основе разработанной модели выявлены основные маршруты ВЭ. Теоретически показано, что применение чередующихся винтовых матриц разноимённой ориентации снижает размер фрагментов и повышает прочностные характеристики металлов, по сравнению с маршрутом ВЭ через матрицы одноименной ориентации, при одном и том же суммарном числе проходов. Данный вывод подтвержден в эксперименте. Реализация ВЭ с противодавлением позволяет повысить прочностные характеристики металла (σ_s до 10%, согласно расчётам) и восстановить его пластические свойства (снижение расчётного θ на 83%).

Получил дальнейшее развитие метод проектирования процесса ВЭ путем применения объектно-ориентированного подхода. Суть подхода в том, что каждому параметру процесса (объекту) ставится в соответствие своя проектная операция, которая определяет значения его составляющих. Информационное взаимодействие проектных операций осуществляется по принципу «классной доски», на которой параллельно выполняемые процессы находят необходимую информацию, и куда поступают данные их работы, используемые в дальнейшем другими процессами. На основе проведенных в работе исследований разработаны следующие проектные операции: определение формы профиля матрицы, определение высоты винтового

канала, определение напряженно-деформированного состояния заготовки, определение режима деформирования. Данный метод проектирования и разработанные проектные операции позволяют эффективным образом учесть все полученные в работе результаты при создании конкретных технологий ВЭ.

Усовершенствованные в работе методы расчёта и проектирования применены для решения ряда практических задач. В частности, обоснована целесообразность введения процесса ВЭ в технологическую цепочку обработки титана ВТ1-0 для подготовки мелкозернистой структуры, которая наследуется при последующих технологических операциях. Это позволило минимизировать количество отжигов и получить конечный продукт – проволоку с повышенными (на 23%) прочностными характеристиками по сравнению с аналогами, произведенными по традиционной технологии.

Согласно проведенному расчёту для винтовых матриц, которые применяются при пластифицирующей обработке вторичных алюминиевых сплавов, высота винтового участка может быть уменьшена на 22.5%, при сохранении качества продукции. Рекомендации по проектированию и программные средства для расчёта винтовых матриц переданы на ДП «Техноскрап» ООО «Скрап». Ожидаемый годовой экономический эффект составляет 39 833 грн/год.

Ключевые слова: интенсивные пластические деформации, винтовая экструзия, напряженно-деформированное состояние, механические характеристики, субмикрористаллическая структура, проектирование.

ABSTRACT

O. Prokof'yeva. Perfection of the calculation and design methods for twist extrusion process. – Manuscript.

Thesis for competition on a candidate degree in material science and engineering on the speciality 05.03.05 – Processes and tools for metal forming. – State institution of higher education «Donetsk National Technical University», Donetsk, 2008.

The actual scientific and technical problem of the calculation and design methods perfection for twist extrusion (TE) was solved on the basis of the stress-strain state research and the metal structure and properties formation model development.

The active areas of a die contact surface with a billet were revealed. It was shown that metal flow within the limits of a billet cross-section can be described by simple shear conversion combined with simultaneous rotation, proportional to the shear corner. On this basis the experimentally-calculation method was perfected and became suitable for the TE design. The model of materials structure and properties formation under TE was developed. The method of design process was perfected by application of the object-oriented approach, and 4 design operations were developed.

The results of the thesis were used for development of the technological chain for titanium wire production with TE application and for validation of dies twist channel height reduction for secondary aluminium alloys treatment.

Key words: intensive plastic deformation, twist extrusion, stress-strain state, mechanical characteristics, submicrocrystalline structure, design.