

ДОНБАССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНАЯ
АКАДЕМИЯ

На правах рукописи

ШКИРА АЛЕКСЕЙ ВИТАЛЬЕВИЧ

УДК 621.777.4:621.77.01

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ШТАМПОВКИ ДЕТАЛЕЙ С ФЛАНЦЕМ И ОТРОСТКОМ НА ОСНОВЕ
ПРИМЕНЕНИЯ СПОСОБОВ КОМБИНИРОВАННОГО
ВЫДАВЛИВАНИЯ**

Специальность:

05.03.05 – Процессы и машины обработки давлением

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н., профессор

АЛИЕВ И. С.

Краматорск – 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....		5
РАЗДЕЛ 1.	СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ.....	11
1.1.	Пути развития процессов холодного выдавливания.....	11
1.2.	Теоретическое исследование процессов комбинированного выдавливания.....	20
1.3.	Штампы и оснастка для процессов комбинированного выдавливания.....	37
	Выводы по разделу.....	50
РАЗДЕЛ 2.	ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	51
2.1.	Выбор направления исследования.....	51
2.2.	Методика проведения теоретических исследований.....	56
2.3.	Методика проведения экспериментальных исследований..	72
	Выводы по разделу.....	82
РАЗДЕЛ 3.	ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ФЛАНЦЕМ.....	83
3.1.	Моделирование силового режима процесса комбинированного трехстороннего выдавливания энергетическим методом	83
3.2.	Моделирование силового режима процесса комбинированного трехстороннего выдавливания энергетическим методом схемы с трапецеидальными модулями.....	95
3.3.	Моделирование процесса комбинированного выдавливания методом конечных элементов.....	107
	Выводы по разделу.....	142

РАЗДЕЛ 4.	ЭСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ФЛАНЦЕМ.....	145
4.1.	Исследование деформированного состояния при комбинированном трехстороннем выдавливании деталей с фланцем и отростком.....	145
4.2.	Исследование силового режима комбинированного трехстороннего выдавливания.....	155
4.3.	Оценка формоизменения в процессе комбинированного трехстороннего выдавливания.....	159
	Выводы по разделу.....	163
РАЗДЕЛ 5.	ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ.....	165
5.1.	Методика проектирования процессов выдавливания	165
5.2.	Технология и штамповая оснастка для процесса радиально-прямо-обратного выдавливания.....	174
5.3.	Расширение технологических возможностей комбинированного выдавливания.....	179
	Выводы по разделу.....	183
	ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....	184
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	187
Приложение А	Расчет приведенного давления процесса комбинированного трехстороннего выдавливания энергетическим методом в MathCAD.....	212
Приложение Б	Расчет приведенного давления процесса комбинированного трехстороннего выдавливания энергетическим методом схемы с трапецеидальными модулями в MathCAD.....	214

Приложение В	Расчётная программа для определения уравнения регрессии 3-х факторного имитационного эксперимента в MathCAD.....	217
Приложение Г	Расчет ресурса пластичности при комбинированном трехстороннем выдавливании.....	219
Приложение Д	Расчетные формулы для определения компонентов напряженного состояния.....	236
Приложение Е	Справка по внедрению результатов диссертационной работы.....	243
Приложение Ж	Акт по внедрению результатов диссертационной работы.....	244

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Основной задачей машиностроительного производства в современных условиях высокой конкуренции является выпуск высококачественной продукции с минимальными затратами. Практической реализации этих актуальных требований способствует применение ресурсосберегающих процессов заготовительного производства, в частности точной объемной штамповки (ТОШ).

Фасонные изделия сложной конфигурации широко распространены в промышленности и изготавливаются поэтапно способами ТОШ, в том числе выдавливанием. Для этих процессов характерны высокие удельные нагрузки на инструмент и ограничения номенклатуры изделий. Для снижения силы деформирования при простом выдавливании увеличивают количество переходов, снижают силы трения и площадь контакта инструмента с заготовкой. Кроме того, для снижения силы деформирования, применяют способы локального и комбинированного деформирования.

Для деталей сложной формы перспективным является способ комбинированного трехстороннего выдавливания. Этот способ позволяет значительно снизить силу деформирования, и как следствие увеличить стойкость инструмента. Также уменьшается количество переходов, благодаря чему уменьшается количество штамповой оснастки и соответственно снижается себестоимость продукции. Однако, несмотря на преимущества, применение этого способа в практике штамповочного производства, его практическая разработка и освоение требует значительных затрат на технологическую подготовку, так как поиск рациональных режимов проведения технологических операций требует трудоемких экспериментальных работ по отработке технологий. Это связано с отсутствием технологических рекомендаций и методик проектирования, и выбора технологических режимов деформирования с несколькими степенями

свободы течения материала. Недостаток таких рекомендаций ощутим и при разработке процессов выдавливания деталей типа втулок с фланцем и осевым отростком. Поэтому существует необходимость проведения теоретических и экспериментальных исследований для восполнения существующего пробела и создания научно-обоснованных методик проектирования процессов выдавливания деталей данного типа способом комбинированного трехстороннего выдавливания.

Исходя из вышеизложенного, тема диссертационной работы, посвященной совершенствованию технологических процессов холодной объемной штамповки деталей с фланцем и отростком на основе применения способов комбинированного трехстороннего выдавливания, является актуальной.

Связь работы с научными программами, планами. Тема диссертации соответствует приоритетному направлению развития науки и техники в Украине «Новые вещества и материалы» (Закон Украины №2519-IV от 9 сентября 2010 года) и научному направлению «Развитие ресурсосберегающих процессов обработки давлением на основе создания новых технологических способов и методик анализа и закономерностей пластического деформирования» научной школы ОМД Донбасской государственной машиностроительной академии (ДГМА). Работа выполнена в рамках госбюджетных научно-исследовательских работ (НИР), предусмотренных планами Министерства образования и науки Украины и выполненных на кафедре ОМД ДГМА (работы 0115U004736, 0110U000112), а также в рамках договорных научно-исследовательских работ с рядом предприятий (автор принимал участие во всех темах как исполнитель).

Цель и задачи исследования. Целью работы является повышение эффективности технологических процессов холодной объемной штамповки на основе разработки и применения способов комбинированного выдавливания, которые способствуют расширению технологических возможностей процесса изготовления деталей с фланцем и отростком и снижению энергосиловых

параметров.

Для достижения указанной цели в работе были поставлены и решены следующие основные задачи:

- выполнить анализ тенденций и путей совершенствования процессов выдавливания деталей различной конфигурации и способов, и оснащения холодного выдавливания;

- выполнить теоретический анализ силового режима процессов комбинированного трехстороннего выдавливания деталей с фланцем и отростком с учетом влияния геометрических параметров процесса и получить аналитические зависимости энергосиловых параметров;

- выполнить теоретический анализ напряженно-деформированного состояния, формоизменения заготовки и ее деформируемости при радиально-обратно-прямом выдавливании, определить факторы, влияющие на параметры формоизменения и получить аналитические зависимости энергосиловых параметров от геометрических размеров инструмента;

- на основе экспериментальных исследований технологических режимов трехстороннего выдавливания проверить адекватность математических моделей и допущений, принятых при теоретическом анализе процесса, а также установить возможности технологических схем штамповки;

- разработать методики и рекомендации по проектированию технологических процессов комбинированного трехстороннего выдавливания и конструирования штамповой оснастки;

- разработать процессы точной объемной штамповки деталей с фланцем и отростком на основе использования способа радиально-обратно-прямого выдавливания.

Объект исследования. Процессы точной объемной штамповки выдавливанием.

Предмет исследования. Закономерности и режимы формоизменения деталей с фланцем и отростком при комбинированном трехстороннем выдавливании.

Методы исследования. В основу теоретических исследований положены энергетический метод баланса мощностей (ЭМ) и метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в специализированных программных комплексах.

Экспериментальные исследования процесса проводились с использованием методов физического моделирования и тензометрии для измерения технологических сил, метода координатных сеток для определения деформированного состояния заготовок.

Для обработки массива данных, полученного математическим экспериментом, использовались методы статистики.

Научная новизна полученных результатов.

- впервые энергетическим методом баланса мощностей, на основе предложенных кинематически возможных полей скоростей, разработана математическая модель процесса комбинированного трехстороннего выдавливания деталей с фланцем и отростком, позволяющая определить силовой режим деформирования и поэтапное формообразование сложнопрофилированных деталей;

- впервые на основе метода конечных элементов установлены закономерности формоизменения при комбинированном трехстороннем выдавливании деталей с фланцем и отростком, которые позволяют прогнозировать изменение размеров штампуемой детали в зависимости от степени деформирования и геометрических параметров переходных участков инструмента;

- на основе результатов анализа напряжено-деформированного состояния и феноменологической теории деформируемости дана оценка степени расхода ресурса пластичности материала заготовки при выдавливании полых деталей с фланцем и отростком и установлены опасные с точки зрения разрушения зоны, расположенные на периферии фланца и на участке между переходными кромками инструмента;

- получили дальнейшее развитие представления о закономерностях протекания процесса радиально-обратно-прямого выдавливания,

позволившие обосновать и предложить способ выдавливания деталей с фланцем и отростком с возвратно поступательным течением металла в отросток, который способствует снижению неравномерности деформированного состояния детали.

Практическое значение полученных результатов. На основе установленных закономерностей силового и деформационного режимов разработаны методики проектирования технологического процесса трёхстороннего выдавливания деталей с фланцем и отростком, позволяющая снизить затраты на технологическую подготовку.

На основе математических моделей разработано программное обеспечение, позволяющее определить приведенное давление и формоизменение в процессах трехстороннего выдавливания деталей с фланцем и отростком с учетом реальной геометрии процесса и степени деформации.

Предложен способ получения детали типа стакан с повышенными показателями проработки застойной зоны в центральной части заготовки на основе регулирования кинематики движения инструмента и знакопеременной деформации. Новизна предложенного способа подтверждена патентом Украины.

Предложена конструкция штампа для осуществления процесса комбинированного трехстороннего выдавливания на прессах двойного действия. Полученные технологические рекомендации по трёхстороннему комбинированному выдавливанию переданы для промышленного освоения на АО «Мотор Сич».

Личный вклад соискателя.

Вклад автора заключается в обосновании и решении теоретических задач по определению напряженно-деформированного состояния, формоизменения и деформируемости заготовки. При проведении исследований автору принадлежит выбор и разработка методик исследований, проведение теоретического анализа процессов комбинированного трехстороннего

выдавливания, создание программного обеспечения, подготовка и проведение экспериментов, анализ и обобщение полученных результатов, разработка новых технологий и практических рекомендаций.

Вклад соискателя в работах, опубликованных вместе с соавторами, представлен в аннотациях к списку опубликованных работ по теме диссертации.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на всеукраинских и международных научно-технических конференциях (МНТК): XVI-XIX МНТК «Достижения и проблемы развития технологий и машин обработки давлением», г. Краматорск, 2013-2016 гг.; Летняя школа «Компьютерное моделирование и прототипирование в металлургическом и заготовительных производствах», г. Москва (МАМИ), 2013 г.; X-XII Международная НТК «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку», г. Краматорск, 2013-2015 гг.; Всеукраинская НТК молодых специалистов «Энергомашспецсталь 2013», г. Краматорск, 2013 г.; XIV Международная НТК «Прогрессивная техника, технология и инженерное образование», г. Севастополь, 2013 г.; I Всеукраинская научно-практическая конференция «Сучасні технології промислового комплексу», г. Херсон, 2015 г., а также на ежегодных научных конференциях ДГМА (2012-2016 гг.) и объединённом научном семинаре по ОМД ДГМА (2016 г.).

Публикации. Материалы и основные положения диссертационной работы опубликованы в 14 работах по научной тематике, из них 6 статей в специализированных изданиях, 1 в зарубежном журнале, 6 работ в сборниках по материалам НТК. Получен 1 патент Украины на полезную модель.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю, проф., д.т.н. Алиеву И. С. за обсуждение результатов исследований, данные советы и замечания; доц. Алиевой Л. И. за научные консультации, сотрудникам кафедры ОМД ДГМА за помощь в проведение экспериментов и оформлении работы.

РАЗДЕЛ 1

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ

1.1 Пути развития процессов холодного выдавливания

Развитие науки тесным образом связано с повышением практического использования ее результатов в промышленном и хозяйственном производстве. Важнейшим фактором в решении подобных задач является разработка новых технологических процессов, позволяющих получать изделия высокого качества с заданными эксплуатационными свойствами и с наименьшими затратами на их производство [1].

Номенклатура выпускаемых изделий на предприятиях машиностроения и приборостроения содержит большое количество полых деталей с фланцами, буртами, отростками различной формы. Для их изготовления применяются различные материалы. Наряду с применением высокопластичных материалов, таких как медь, сплавы на ее основе, сплавы на основе алюминия, детали изготавливаются и из углеродистых сталей.

Одним из прогрессивных ресурсосберегающих методов получения изделий высокого качества является холодная объемная штамповка. Основные преимущества холодного выдавливания заключаются в высоких показателях производительности, точности размеров и качества поверхности, эффективном использовании металла, повышении механических свойств упрочняющегося материала [2, 3]. Значительно снижается трудоёмкость изготовления деталей. Процессы ХОШ характеризуются высоким уровнем механизации и автоматизации. Применение многопозиционных штамповочных автоматов, а также установка на прессы многопозиционных штампов-автоматов обеспечивает повышение производительности в 5 - 10 раз и более по сравнению с современными автоматами для обработки

резанием эквивалентных деталей [4–8].

Интенсивное развитие технологии выдавливания в последние десятилетия основано на фундаментальной научной базе, созданной трудами отечественных и зарубежных ученых, работающих в области теории и технологии ОМД.

Значительный вклад в развитие и становление технологии ТОШ холодным и полугорячим выдавливанием внесли И.С. Алиев, А.Э. Артес, Э.П. Басалаев, Я.Е. Бейгельзимер, М.З. Ерманок, К.Н. Богоявленский, А.Л. Воронцов, В.А. Головин, Ю.И. Гуменюк, А.М. Дмитриев, В.И. Дорошко, А.В. Евдокимов, В.В. Евстифеев, В.А. Евстратов, В.Л. Калюжный, Д.П. Кузнецов, В.А. Кроха, Е.Н. Ланской, А.В. Лясников, А.Н. Митькин, Б.С. Мороз, Г.А. Навроцкий, А.Г. Овчинников, В.А. Огородников, Л.Д. Оленин, В.Г. Паршин, И.Л. Перлин, И.П. Ренне, В.В. Рис, О.А. Розенберг, И.О. Сивак, В.З. Спусканюк, В.И. Стеблюк, Л.Г. Степанский, В.Е. Фаворский, Ю.Ф. Филимонов, Ю.К. Филиппов, П.Д. Чудаков, Л.А. Шофман, С.П. Яковлев, Р. Гейгер, К. Ланге, Х. Кудо, Х.Л.Д. Пью, Г.Д. Фельдман, В. Фелькнер, Д. Эверхардт и многие другие ученые.

Применение процессов выдавливания позволяет максимально приблизить форму и размеры заготовок к параметрам готовой детали. Благодаря этому достигается значительная экономия металла, $K_{им}$ увеличивается до 0,98, при этом сокращается, а иногда и полностью исключается, последующая обработка резанием. Холодным выдавливанием можно получать полые и сплошные заготовки достаточно сложной симметричной или асимметричной формы. Внешние и внутренние поверхности деталей могут иметь цилиндрическую, многогранную или зубчатую форму [9-12].

При всех весомых достоинствах холодная объёмная штамповка обладает и рядом ограничений, главным из которых является высокое сопротивление пластической деформации и пониженная пластичность большинства металлов при комнатной температуре. Высокое сопротивление пластической деформации и низкая пластичность, связаны с

деформационным упрочнением, которое приводит к возникновению больших удельных усилий на инструмент и, как следствие, его быстрому износу [13].

Наиболее полную характеристику формоизменяющих операций холодной объемной штамповки дает их классификация по кинематике относительного движения металла и инструмента. Все формоизменяющие операции по кинематике относительного движения металла и инструмента делят на простые и комбинированные [5, 14].

Простые операции — это операции, в которых перемещение металла однозначно задано кинематикой движения инструмента, т. е. металл имеет возможность двигаться относительно инструмента только в одном направлении [13].

При комбинированных операциях металл имеет две или несколько свобод течения металла.

Все простые формоизменяющие операции целесообразно в некоторых случаях дополнительно делить на открытые и закрытые. Открытые операции иногда называют свободными. При открытой операции перемещение металла не ограничено боковыми стенками инструмента. Форма изделия в плане не задана инструментом. Она определяется анизотропией металла, анизотропией трения, правильностью геометрической формы заготовки, а в общем случае — правилом наименьшего сопротивления. При закрытой операции перемещение металла в радиальном направлении ограничено боковыми стенками инструмента. Обычно процесс состоит из двух этапов: открытого, который постепенно переходит в закрытый [15].

Среди простых процессов можно выделить четыре основных способа выдавливания, отличившиеся схемами напряженно-деформированного состояния и областью использования. В работе [3] приведена таблица структурно-морфологического анализа и принципиальные базовые схемы продольного, поперечного и комбинированного выдавливания. Классификация способов приведена на рис. 1.1.

При прямом выдавливании (рис. 1.2, а) истечение металла происходит в направлении приложения усилия и совпадает с направлением движения

пуансона. Этим способом выдавливают детали типа стержней с фланцами, трубок или стаканов с фланцами, либо без них, если выдавливание осуществляется напроход.

При обратном выдавливании (рис. 1.2, б) истечение металла происходит в направлении, противоположном движению пуансона. Данным способом получают детали типа стаканов и коробок.

Способ поперечного (бокового или радиального) выдавливания [16], характеризуемый истечением металла в направлении, перпендикулярном к движению пуансона, можно подразделить на два вида. При поперечном радиальном выдавливании металл выдавливают в круговую полость (рис. 4.1, в), что приводит к образованию осесимметричных деталей с утолщениями (фланцами). Для бокового выдавливания характерно течение металла в одну или несколько канальных полостей, с образованием на детали отростков различной конфигурации (рис. 1.2, г) [17].

Существует расширение возможностей холодного выдавливания путем изменения вида среды, предающей нагрузку, а также схему приложения деформирующих сил [18].

Главное направление интенсификации процессов холодного объемно-пластического истечения должно быть основано на регулировании (с применением смазок оптимальной вязкости) сил контактного трения, создании благоприятных схем напряженно-деформированного состояния и выборе оптимальной в энергетическом отношении схемы формоизменения детали.

Значительным резервом расширения технологических возможностей ХОШ является разработка и внедрение процессов, позволяющих существенно уменьшить силовые характеристики за счет регулирования кинематики течения металла и его напряженного состояния в полости штампа как при традиционных схемах ХОШ, так и в комбинации с процессами с принудительной локализацией очага деформации [19].

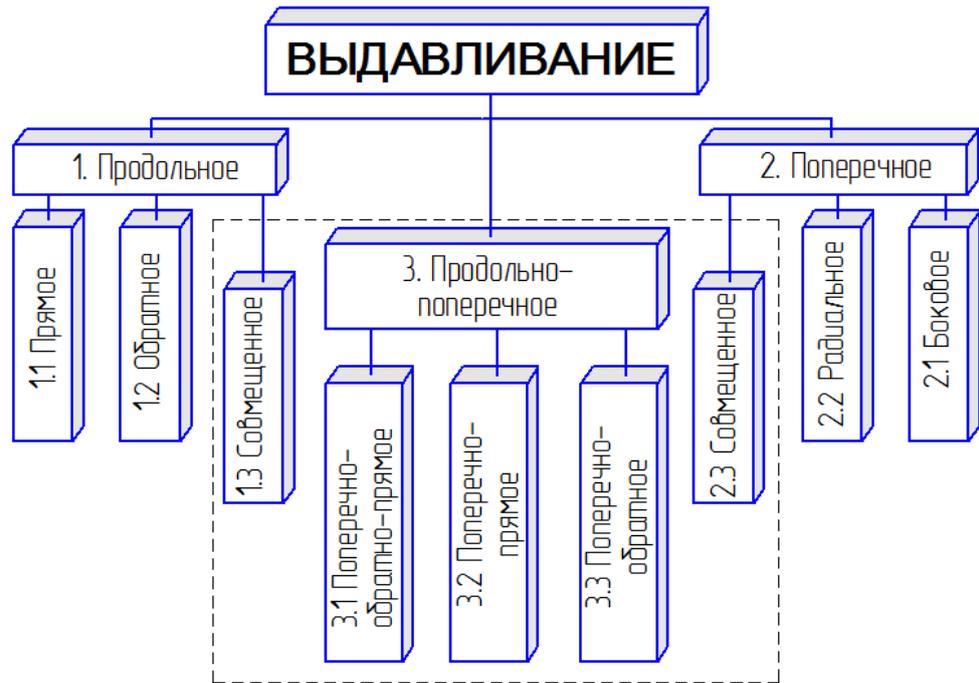


Рисунок 1.1 - Классификация способов выдавливания

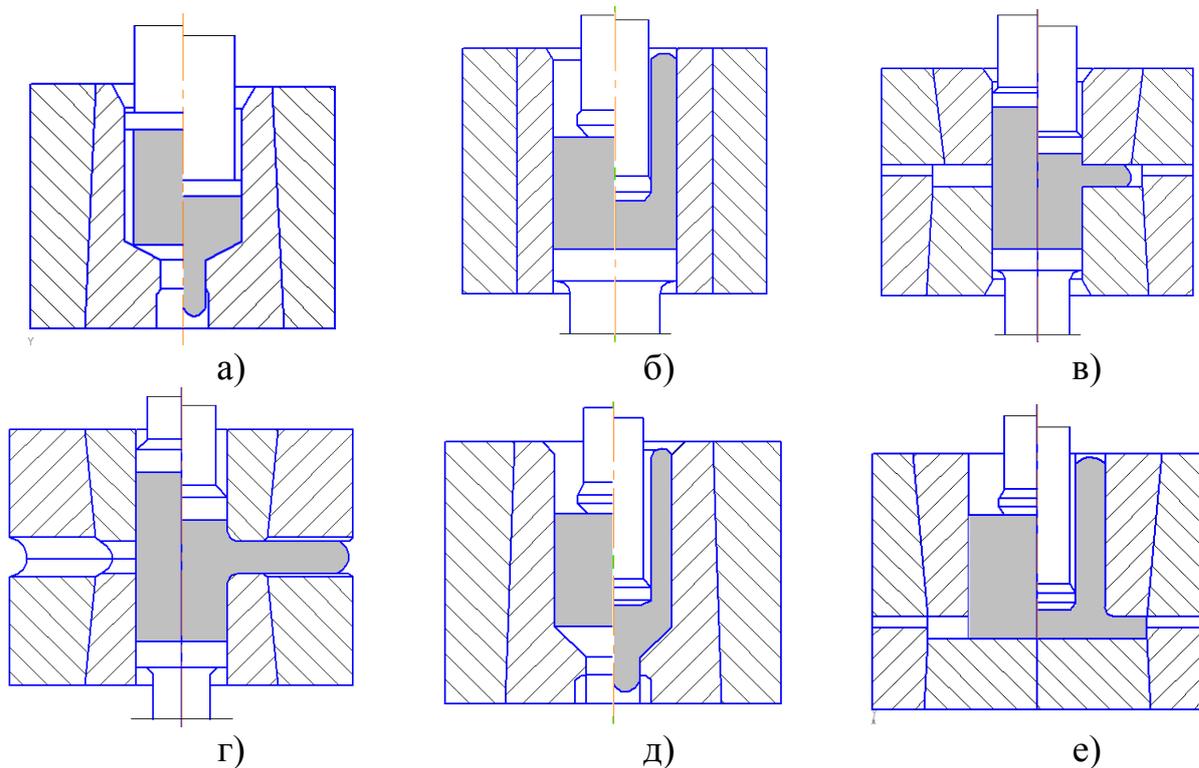


Рисунок 1.2 - Способы холодного выдавливания (а – прямое; б – обратное; в – поперечное (радиальное); г – поперечное (боковое); д – комбинированное(обратно-прямое); е – комбинированное (радиально-обратное)

Расширить номенклатуру штампуемых деталей и область применения выдавливания можно, осваивая способы, основанные на сочетании прямого, обратного и поперечного выдавливания. Для внедрения процессов штамповки сложных деталей необходимы разработка и широкое применение различных совмещенных и комбинированных процессов, способов и устройств для регулирования кинематики течения металла и его напряженного состояния в штампе [5, 10, 20, 21].

Комбинированное продольно-поперечное выдавливание из сплошной заготовки характеризуются множеством реализуемых вариантов [19].

На рис. 1.3 приведена классификация технологии схем комбинированного поперечно-обратного выдавливания, разработанная в результате анализа кинематических вариантов деформирования полых деталей.

Процессам поперечно-прямого выдавливания присуще большее разнообразие в комбинировании простых схем и, соответственно, поэтому возможна и большая сложность конструкций штампуемых деталей. Поперечно-прямое выдавливание можно осуществить по схемам совмещенного (с одновременным истечением металла по различным направлениям) или последовательного (с разделением очагов деформации вдоль траектории течения или по времени) деформировании. На рис. 1.4 верхний ряд можно отнести к схемам совмещенного, а нижний — к схемам последовательного комбинированного выдавливания. В совмещенных схемах, содержащих прямое выдавливание, направления интенсивного течения металла разделяются с самого начала процесса, что ограничивает предельную степень деформации [22].

На рис. 1.5 показаны некоторые способы, характеризующие направления совершенствования традиционных схем продольного выдавливания полых деталей. Применение активных сил трения (рис. 1.5, IA) позволяет уменьшить коэффициент трения и, как следствие, уменьшить усилие выдавливания. Однако используя такую схему выдавливания можно наблюдать дефекты на наружной стенке получаемого изделия в виде трещин и утяжин [23–30].

	1	2	3	4	5
А					
Б					
Детали					
А					
Б					
Детали					

Рисунок 1.3 - Классификация технологических схем поперечно-обратного выдавливания

В работе [31] подробно рассмотрены причины образования таких дефектов и пути их устранения. На рис 1.5 ИБ показана схема с реактивными силами трения. Кроме того, изменение направления сил трения сопровождается закрытием первичных поперечных микро- и макротрещин на боковой поверхности. [28, 30, 32]. Использование схемы с реактивными силами трения приводит к росту усилий деформирования [23].

Выполнение способа, представленного на рис. 1.5 ПА-В, позволяет устранить разрывы и достичь полного оформления деталей типа стаканов с осевым отростком и утолщением, который размещен у донца и как следствие повысить качество изделий и возможности процессов штамповки [32, 33].

Способ однопереходной штамповки изделий типа стаканов с боковым выступом, включающий формирование полости изделия путем внедрения в заготовку прошивного пуансона С целью повышения качества изделий (рис. 1.5, IIIА) поперечное выдавливание производят путем перемещения контрпуансона навстречу прошивному пуансону, а заканчивают по достижении прошивным пуансоном среднего уровня формируемого бокового выступа [34].

На рис. 1.5 показаны некоторые способы, характеризующие направления совершенствования традиционных схем продольного выдавливания полых деталей. Применение активных сил трения (рис. 1.5 IА) позволяет уменьшить коэффициент трения и, как следствие, уменьшить усилие выдавливания. Однако используя такую схему выдавливания можно наблюдать дефекты на наружной стенке получаемого изделия в виде трещин и утяжин [23–30].

На рис. 1.5 III Б–Г изображены схемы выдавливания в профилированном инструменте, цель которых – получить детали со сложной наружной и внутренней поверхностями, расширить, тем самым, технологические возможности и области применения процессов выдавливания [34, 35].

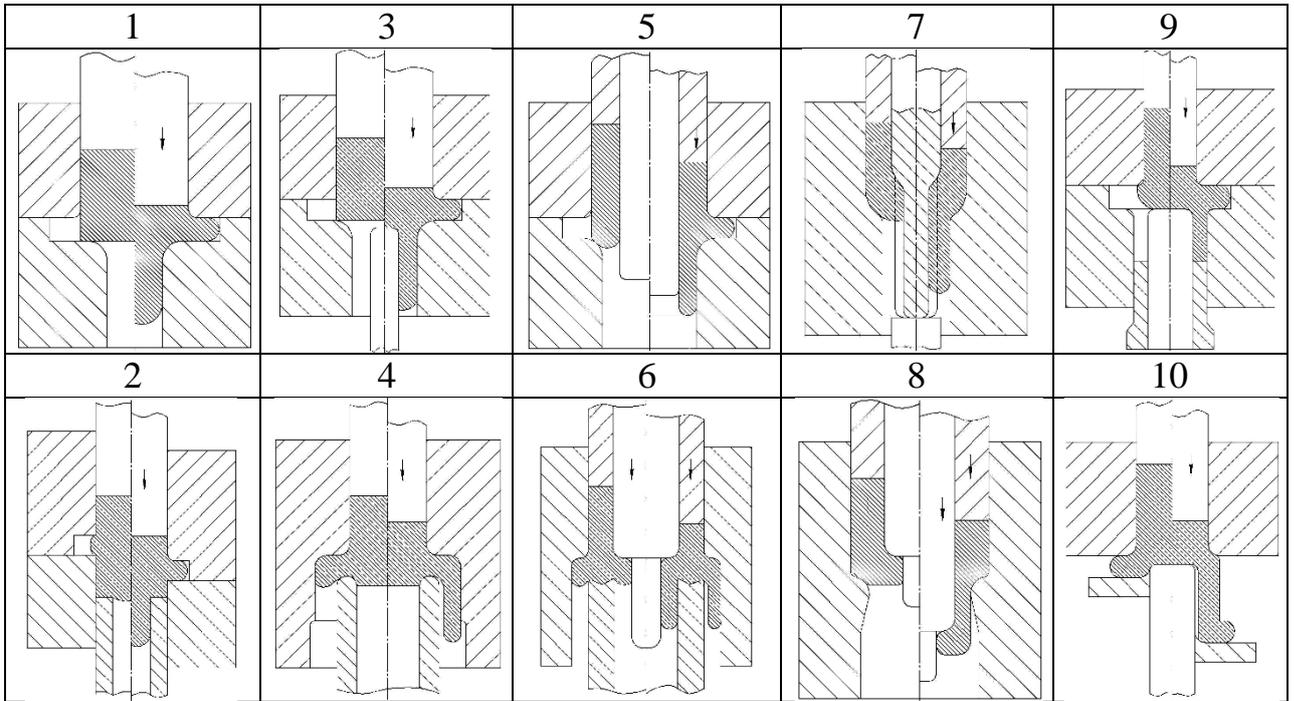


Рисунок 1.4 - Классификация технологических схем поперечно-прямого выдавливания

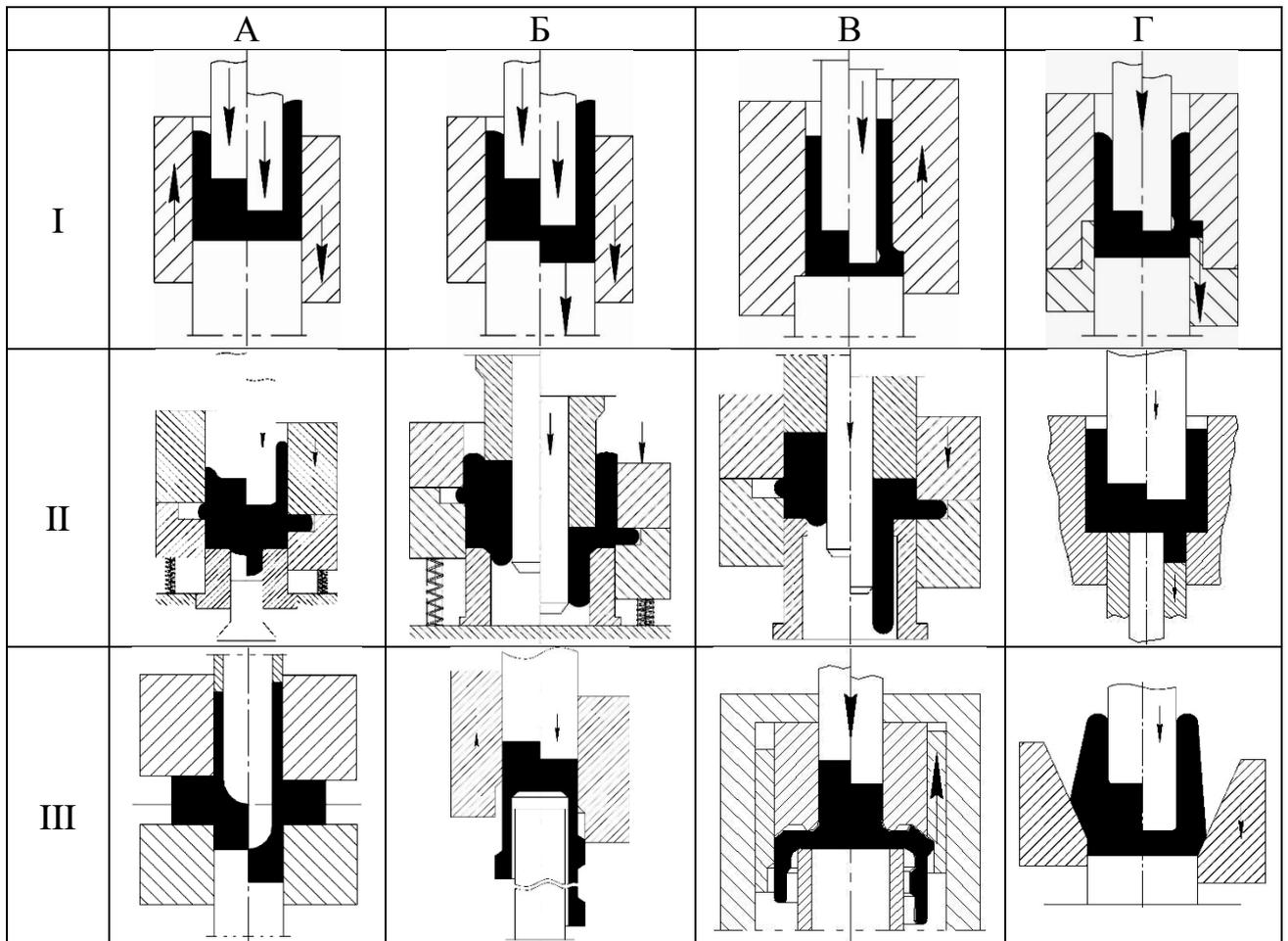


Рисунок 1.5 - Способы выдавливания полых деталей

1.2 Теоретическое исследование процессов комбинированного выдавливания

Л.Г. Степанский отметил, что теоретическими основами для разработки такой системы являются работы по теории процессов обработки металлов давлением [36]. Анализ работ, а также промышленного опыта производства стальных изделий методами ХОШ показывает, что качество таких изделий определяется комплексом взаимозависимых характеристик, которые можно объединить в четыре группы:

- 1) механические свойства и структура металла;
- 2) геометрические параметры;
- 3) характеристики поверхности;
- 4) остаточные напряжения.

Одним из перспективных, но мало исследованных, процессов холодной объёмной штамповки является комбинированное выдавливание, в том числе комбинированное радиально–прямое (рис.1.6). Более широкое распространение получил процесс радиально-обратного выдавливания.

В исследовании Л.И. Алиевой силовых параметров комбинированного выдавливания стержневых деталей с фланцем, в силу определенных ограничений радиально-обратного выдавливания, таких как большие энергетические затраты, применением в основном для получения полых деталей и возможное дефектообразование, встал вопрос о использовании радиально-прямого выдавливания для изготовления изделий с фланцем [37, 38].

Моделирование процесса комбинированного выдавливания детали с фланцем методом конечных элементов позволило определить место образования очага деформации и величины степеней логарифмической деформации. Установлено, что с увеличением относительного радиуса закругления матрицы R и относительной высоты фланца h значение приведенного давления снижается, а при увеличении относительной

величины плеча b – увеличивается [39].

К способам штамповки полых деталей типа стакан с фланцем, позволяющим снизить силу выдавливания по отношению к традиционно используемым процессам продольного и поперечного выдавливания, относится способ комбинированного радиально-обратного выдавливания. Снижение сил выдавливания в этом способе обусловливается наличие дополнительных степеней течения металла. При выдавливании по схеме комбинированного выдавливания возможно появление на дне стакана при интенсивном течении металла вверх вертикальной утяжины, а при интенсивном течении металла во фланец, возможно появление радиальной утяжины и неприлегание фланца (рис.1.7, а, б) [40–42].

Исследованием Л.И. Алиевой, Н.С. Грудкиной и др. было установлено формоизменение детали в процессе комбинированного радиально-обратного выдавливания. Установлено, что утяжина в нижней части детали образуется на последней стадии выдавливания, когда течения металла в радиальном направлении практически отсутствует, а основная часть металла заготовки течет вертикально вверх [43]. Кроме того, определено влияние размера очага деформации при радиально-обратном выдавливании на энергосиловые характеристики [44, 45].

В работе Ю.К. Филиппова было предложено теоретическое исследование комбинированного процесса радиального и обратного выдавливания в конической матрице (рис. 1.8).

Для теоретического исследования был выбран метод баланса мощности. Его достоинствами являются наглядность, оперативность, возможность эффективного применения ЭВМ, возможность использования опытных данных для уточнения граничных условий, кинематических полей скоростей, размеров и формы зон интенсивной деформации.

Предварительные экспериментальные исследования показали, что в процессе выдавливания сечение заготовки можно разделить на характерные области с различными скоростями течения металла [46]. Схожими

исследованиями занимались В.И. Игнатенко и В.А. Головин [47, 48].

Из работы А.К. Евдокимова, можно выделить комбинированное выдавливание с противодавлением. Характерным недостатком этого процесса является неустойчивость скоростей течения материала в различных направлениях. В производстве это приводит к тому, что технолог должен задавать значительные припуски на обрезку, а если они не выполняются, то деталь считается окончательным браком, при этом коэффициент использования металла существенно сокращается [49].

Для предотвращения появления дефекта в комбинированном прямо – обратном холодном выдавливании поршня, D.J. Lee был разработан новый процесс выдавливания (рис.1.9). Данное исследование предлагает новые процессы, которые могут предотвратить дефекты, удаляя мертвые зоны металла. Исследование заключается в том, чтобы предотвратить дефект, следует изменить структуру матрицы и двигаться в осевом направлении выдавливания в контейнере, для обеспечения одновременного заполнения и ликвидации дефекта [50].

В работе Y.S. Lee представлены штамповочные характеристики радиально-прямого выдавливания. В данной работе, исследуются штамповочные характеристики, которые влияют на конструктивные параметры, такие как диаметр оправки, радиус матрицы и коэффициент трения (рис.1.10). Для проверки достоверности исследования, в результате моделирования, выполненного при тех же условиях, в качестве эксперимента сравниваются с экспериментальными данными в условия формирования нагрузки [51].

В работе В.С. Hwang исследуется метод верхней оценки не симметричных процессов комбинированного выдавливания. В данном исследовании проводился анализ полей скоростей, которые определяют штамповочные нагрузки, выдавливаемую длину и скорость распределения металла по ходу течения в процессе комбинированного выдавливания (рис.1.11).

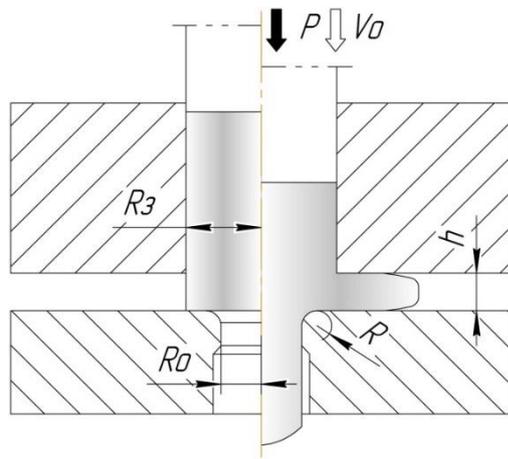


Рисунок 1.6 – Схема комбинированного радиально-прямого выдавливания

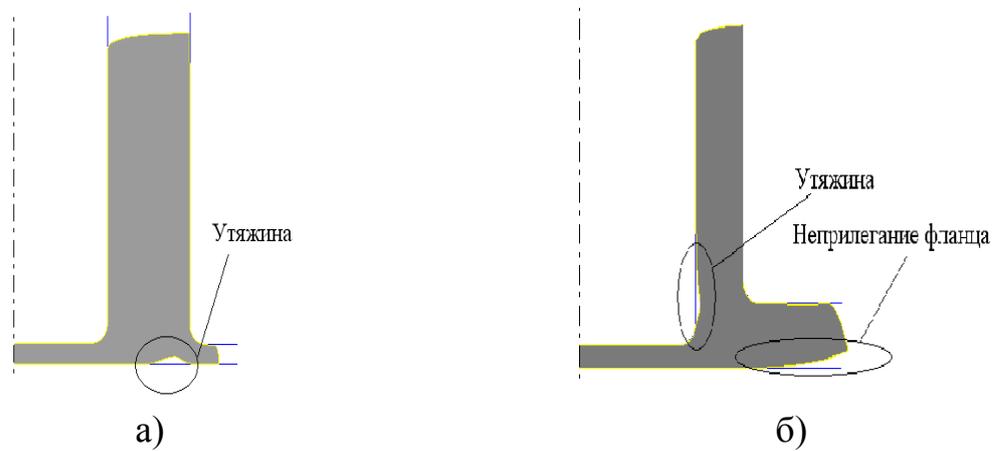


Рисунок 1.7 – Дефекты, возникающие при радиально-обратном выдавливании (а – образование вертикальной утяжины; б – образование радиальной утяжины и неприлегания фланца)

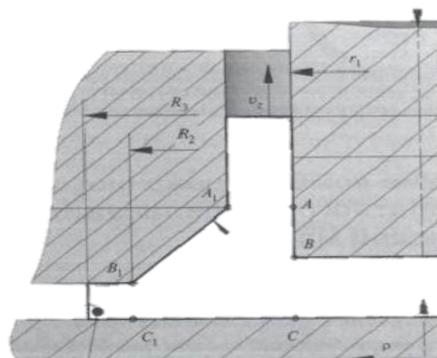


Рисунок 1.8 – Эскиз конической матрицы для радиально – обратного выдавливания

Эксперимент осуществлялся на образце свинец-сурьма при комнатной температуре без смазки (рис.1.12). Штамповочные нагрузки и выдавливаемая длина были сравнены между теорией и экспериментом [52].

В работе R. Ebrahimi был предложен аналитический подход для радиально-прямого процесса выдавливания. Этот подход используется для получения суммарной деформации, которая достигается в компоненте при радиальном выдавливании. Анализ основан на определении компонентов полей скоростей и скоростях деформации (рис.1.13). Определяется давление выдавливания в радиальном направлении в виде функции свойств материала и конструктивных параметров, используя метод верхней оценки, подтверждается анализ по экспериментальным данным (рис.1.14) [53].

Левченко В. Н. в своих исследованиях проводит численное моделирование процесса комбинированного выдавливания, дополнительно проводит расчеты процессов прямого и обратного выдавливания (рис.1. 15). На основе энергетического метода разработана математическая модель процесса комбинированного выдавливания, позволяющая определить энергосиловые параметры процесса как функции от основных параметров [54].

Н.И. Lee в своих исследования комбинированного двухстороннего выдавливания проводит анализ прямого и обратного выдавливания шестиугольных и трохoidalно-образных скрученных болтов [55]. Предполагается, что процесс выдавливания делится на два этапа (рис. 1.16). На первом этапе, осесимметричное прямое выдавливание и не осесимметричное обратное выдавливание происходят одновременно до тех пор, пока обратное выдавливание вывернутого углубления не будет завершено. На втором этапе происходит только трубчатый процесс прямого выдавливания. Предлагаются новые кинематически допустимые поля скоростей, чтобы определить, формирующее усилие, выдавленную длину и картину деформации относительно хода пуансона.

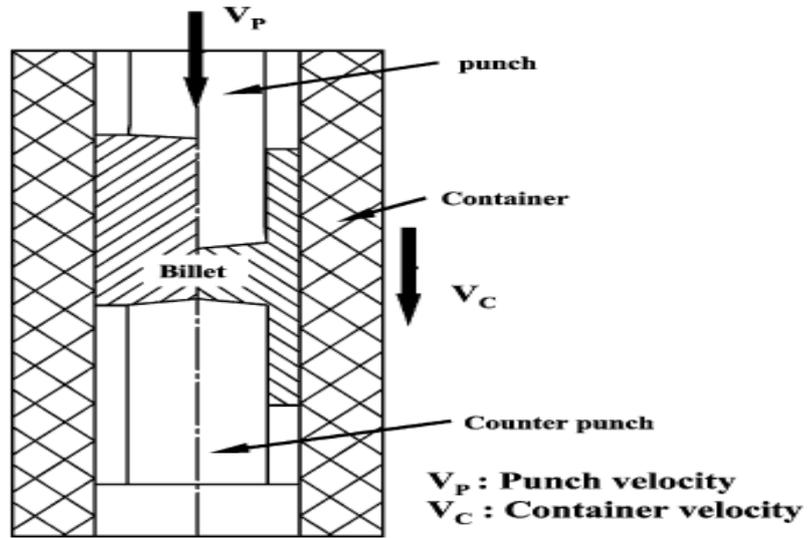


Рисунок 1.9 – Процесс прямо-обратного выдавливания поршня

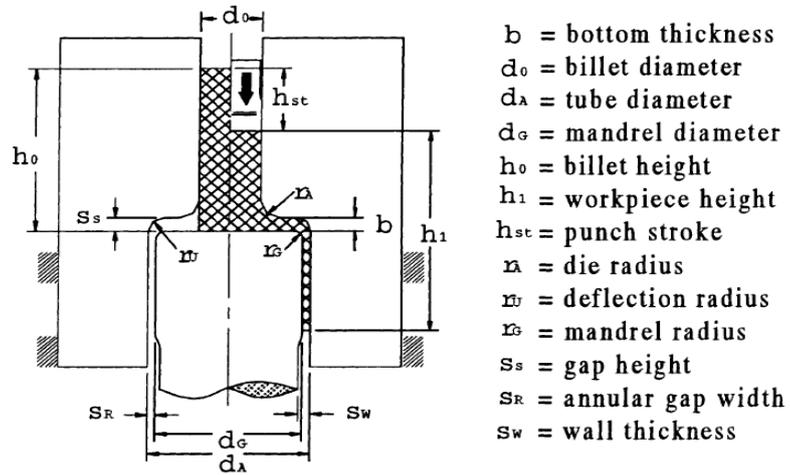


Рисунок 1.10 – Геометрия матрицы, используемая при анализе

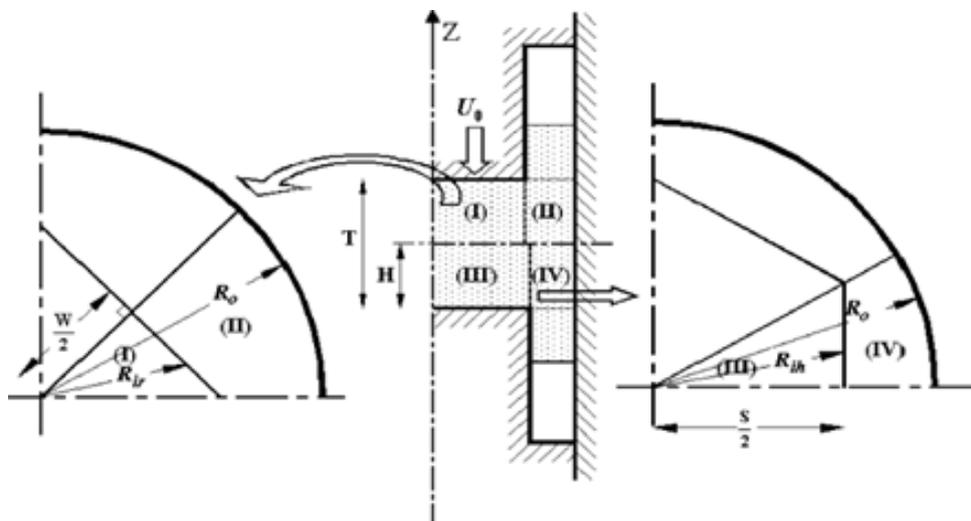


Рисунок 1.11 – Поле скоростей при выдавливании

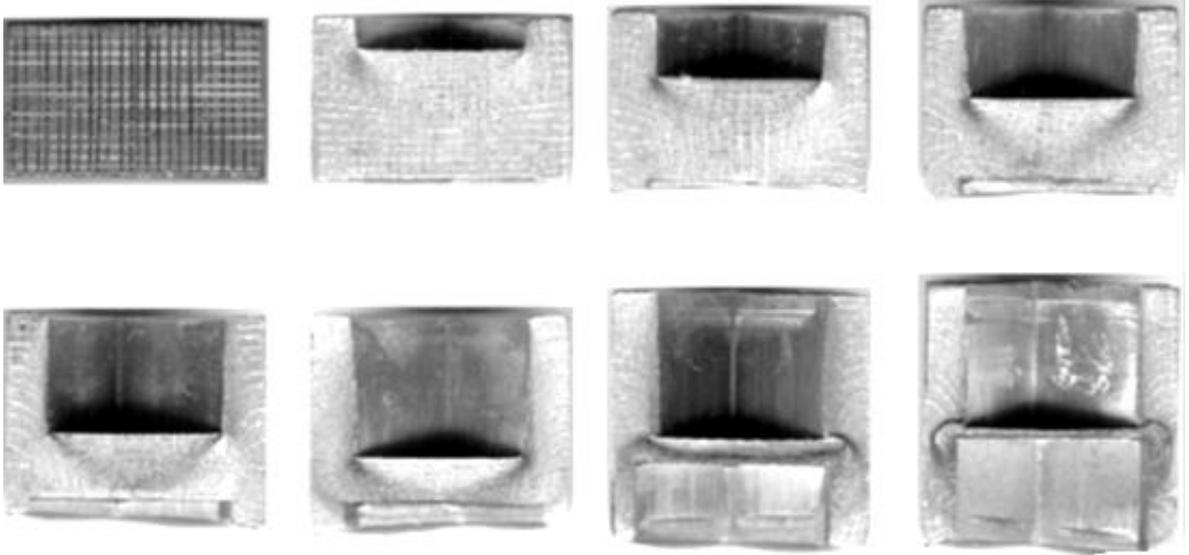


Рисунок 1.12 – Свинцовая заготовка для эксперимента

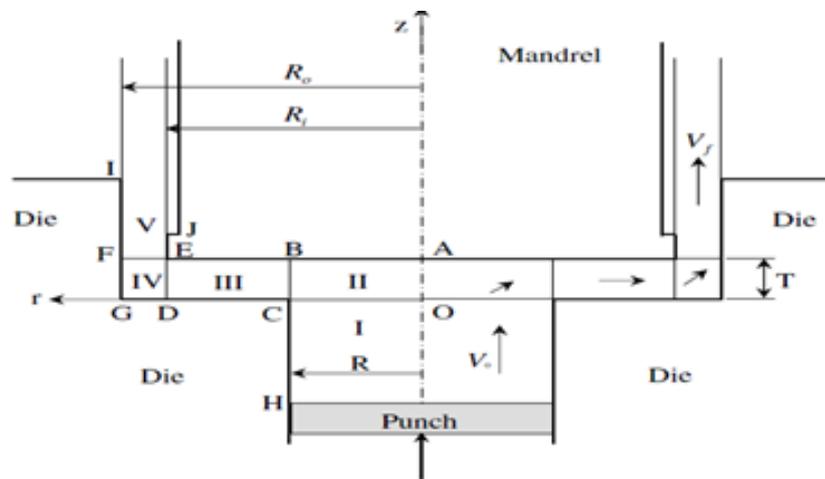


Рисунок 1.13 – Поля скоростей при радиально-прямом выдавливании



Рисунок 1.14 – Алюминиевая заготовка для эксперимента

Hu Yamin провел серию экспериментов процессов комбинированного выдавливания чашки-стержня (рис. 1.17) для изучения влияния технологических факторов, таких как температура деформации и смазка, на пластические свойства сплава магния [56]. В данной работе был представлен глубокий анализ механизма деформации на каждом этапе процесса выдавливания. В этой статье была предложена смазка и оптимизированная температура деформации.

В основе теоретических методов ОМД лежит представление, что для реального металла справедливы основные уравнения механики твердого тела, рассматривающие последнее как непрерывную и изотропную среду. Это допущение является достаточно правомерным, поскольку предварительно всесторонне деформированный и гомогенизированный соответствующей термообработкой металл обладает свойствами макро-непрерывности.

В качестве математической модели деформируемого металла принимается идеально жесткая пластическая среда. Полагают, что процесс деформации происходит в изотермических условиях, температуру инструмента считают равной температуре деформируемого тела. Условие выполняется при деформационных процессах в холодном состоянии.

В процессе холодного выдавливания наблюдается сложное напряженно-деформированное состояние с элементами растяжения в зоне свободного истечения металла [16]. Процесс холодного выдавливания сопровождается значительным упрочнением обрабатываемого металла. Изменение твердости и микроструктуры заготовки после выдавливания зависит от величины деформации отдельных ее зон и характеризует ее неравномерность. Наиболее деформированы поверхностные слои, прилегающие к очагу деформации [57].

Анализ комбинированного выдавливания с одновременным течением металла в поперечном и продольном направлениях позволяет изготовить большое количество деталей различных между собой по форме и имеющих сложную конфигурацию наружной поверхности в оптимальном силовом

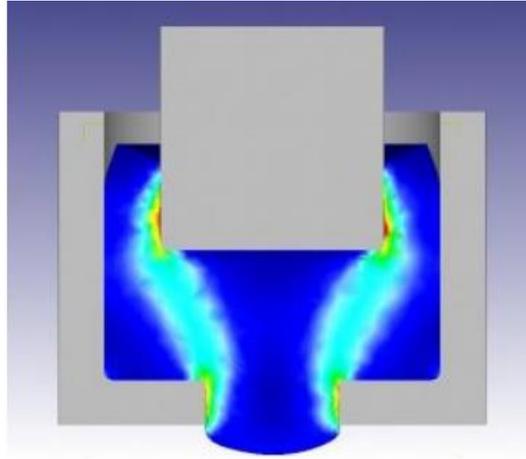


Рисунок 1.15 – Схема циклического комбинированного выдавливания

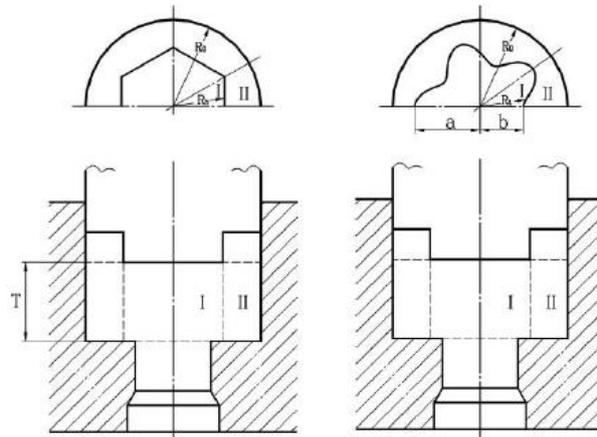


Fig. 2. A general scheme of stage II in the forward and backward extrusion process of hexagonal and trochoidal bolts.

Рисунок 1.16 – Схема поэтапного комбинированного деформирования

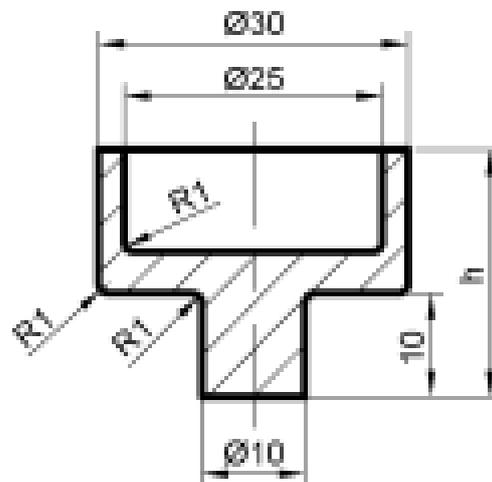


Рисунок 1.17 – Исследуемая схема комбинированного выдавливания

режиме [58]. Теоретическому анализу комбинированного выдавливания должно предшествовать определение особенностей формирования очага пластической деформации и выявления группы, к которой в зависимости от вида очага деформации следует отнести рассматриваемый процесс [59].

Как показывают опытные данные [60], схемы одновременного выдавливания по нескольким направлениям в зависимости от особенностей формирования очага деформации (ОД) можно разделить на три группы (табл. 1.1):

- схемы с присоединенным ОД;
- схемы с объединенным ОД;
- схемы с разъединенным ОД.

Анализ каждой группы схем комбинированного выдавливания имеет свои особенности. Наибольшей простотой отличается анализ процессов первой группы, когда два смежных ОД простых способов выдавливания контактируют одновременно и параллельно с активным инструментом (или жесткой зоной, передающей нагрузку) и примыкают, друг к другу, некоторой граничной поверхностью раздела течения. В этом случае задача сводится к установлению положения поверхности раздела течения на последовательных этапах формирования. Известны примеры анализа таких задач совмещенного обратно-прямого выдавливания деталей типа стакана с отростком со стороны дна.

Вторая группа схем комбинированного выдавливания отличается тем, что разнонаправленные потоки металла зарождаются в одном общем объединенном (совместном) ОД. Этот случай наблюдается при деформировании низких заготовок или на заключительных стадиях процесса.

Для схем с объединенным ОД анализ технологических режимов возможен, если применять в качестве варьируемых параметров кинематические и скоростные параметры.

Наибольшую трудоемкость представляет анализ процессов третьей группы, т.е. схем выдавливания с разъединенными очагами деформации. При

наличии промежуточной жесткой зоны между разъединенными очагами деформации выбор скорости (например, скорости перемещения той же жесткой зоны) в качестве варьируемого параметра не приводит к положительному результату, так как при исследовании функций полной мощности на экстремум кинематический параметр не будет входить в получаемое выражение.

Наибольшую трудоемкость представляет анализ процессов третьей группы, т.е. схем выдавливания с разъединенными очагами деформации. При наличии промежуточной жесткой зоны между разъединенными очагами деформации выбор скорости (например, скорости перемещения той же жесткой зоны) в качестве варьируемого параметра не приводит к положительному результату, так как при исследовании функций полной мощности на экстремум кинематический параметр не будет входить в получаемое выражение.

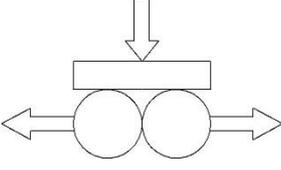
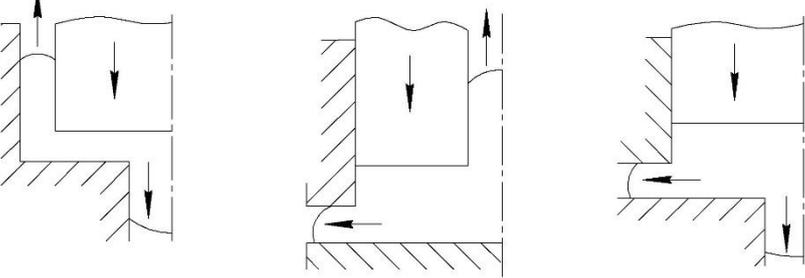
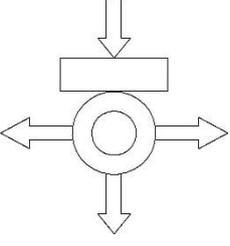
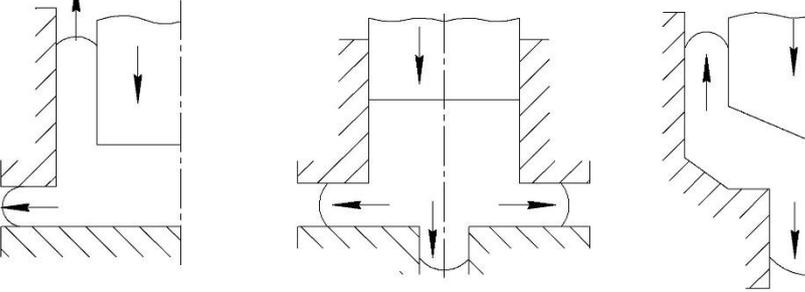
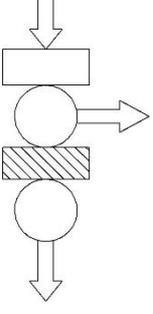
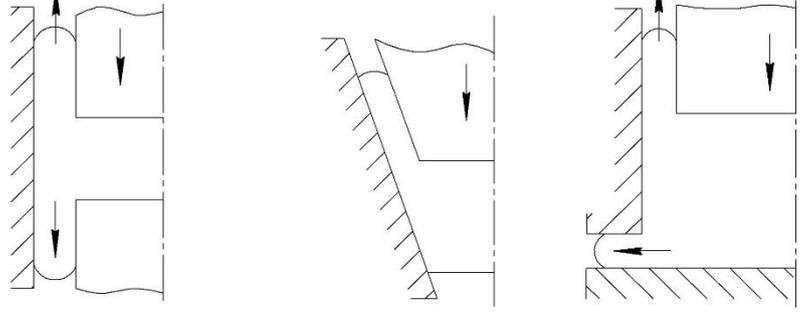
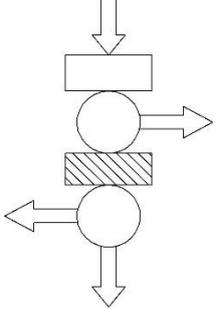
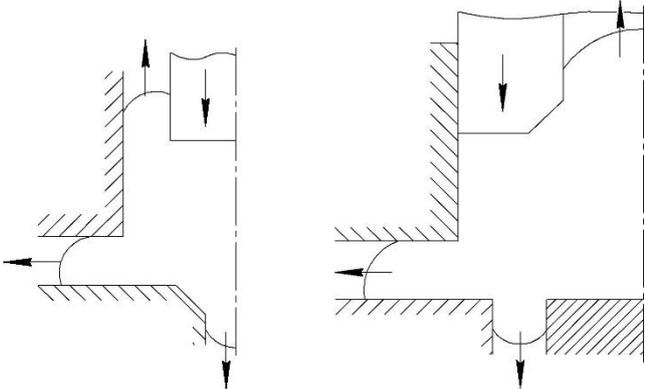
Для таких схем деформирования, видимо, приемлемо предположение Степанского Л. Г. о том, что при комбинированном течении наряду с балансом мощностей должно выполняться условие равновесия мощностей, действующих с двух сторон от плоскости, разделяющей два самостоятельных очага деформации.

Моделирование процессов выдавливания, образующих четвертую группу предполагает применение всех рассмотренных подходов в зависимости от того, каковы особенности комбинированных ОД [61].

В ряде работ указывается на неэффективность применения в качестве варьируемых переменных кинематических и скоростных параметров. В работах [62–65] отмечают целесообразность решения проблемы минимизации путем введения четырехугольных жестких элементов, но не дают рекомендаций относительно схем течения, для которых приемлемы такие элементы.

Известные решения [64] для комбинированного выдавливания стержня и втулки с перемычкой получены с использованием четырехугольного

Таблица 1.1 – Виды очагов деформации при холодном выдавливании

	Условная схема	Схема выдавливания
Присоединенный ОД		
Объединенный ОД		
Разъединенный ОД		
Комбинированный ОД		

элемента. Четырехугольный элемент применяли для поперечно-обратного выдавливания (рис.1.18. а, б). Здесь изменение выходных скоростей обеспечивается варьированием положения точки D на поверхности нижней полуматрицы и точки A на оси симметрии - однако, когда точка A занимает крайнее нижнее положение поле скоростей (рис. 1.18, в) становится кинематически невозможным, а изменение положения D теряет смысл [64, 65].

В работе [66] проведен анализ процесса радиально-обратного выдавливания полый детали с фланцем методом верхней оценки и конечных элементов. При анализе МВО была реализована схема объединенного очага деформации. Для анализ методом конечных элементов была использована автоматизированная система QFORM - 2D.

Метод конечных элементов получил большое распространение с развитием ЭВМ, так как это значительно упростило его использование. Так в работе [67–70] МКЭ использовался для прогнозирования образования трещины при комбинированном выдавливании. Также был предложен более надежный способ выдавливания с подвижной матрицей, что позволило уменьшить вероятность образования трещины за счет разделенного очага деформации, который к конечной стадии процесса становится объединенным.

В работе [71] также разработана математическая модель радиально-прямого выдавливания полого изделия с фланцем при помощи энергетического метода. Даны рекомендации по определению оптимизированного значения параметра, определяющего положение поверхности раздела течения металла и по определению конечного формоизменения.

В работе [72] с помощью энергетического метода был смоделирован процесс радиально-прямого выдавливания. В результате было существенно сокращено время моделирования и была получена возможность интерактивно управлять компоновкой процесс из готовых кинематических модулей, что делает получаемые результаты более прогнозируемыми.

На сегодняшний день, актуальными для изучения и исследования, являются схемы трехстороннего выдавливания [73, 74].

Среди исследований технологических возможностей новых способов комбинированного выдавливания можно выделить работу И.С. Алиева [75]. Было отмечено, что простые схемы прямого, обратного и поперечного выдавливания комбинируют в различных вариантах. Сочетание простых схем может быть совмещенным или последовательным (как по времени, так и по пути деформирования).

Для большинства способов комбинированного выдавливания базовой схемой служит схема выдавливания с тремя степенями свободы течения металла в штампе, содержащем независимо подвижные составные (из двух частей) рабочие инструменты: матрицу, пуансон и противополопуансон (рис. 1.19).

В последнее время в ряде работ широко используется анализ процессов комбинированного выдавливания на основе МКЭ, которые направлены на установку НДС [76–78].

A. Farhoumand занимался анализом трехстороннего выдавливания (рис. 1.20). Эта работа представляет анализ прямо-обратно-радиального выдавливания. Метод конечных элементов, который был использован для изучения влияния геометрических параметров, таких как радиус закругления матрицы и высоты зазора, а также условий влияния трения [79].

Программное обеспечение ABAQUS используется для моделирования конечных элементов. Результаты конечных элементов сравниваются с экспериментальными данными с точки зрения формирования нагрузки и течения материала в различных зонах, распределение твердости в продольном сечении продукта. Также используется для проверки распределение деформации, полученную из анализа методом конечных элементов (рис. 1.21). Сравнение теоретических и экспериментальных данных, дали хорошие результаты. Эксперимент проводился с помощью алюминиевых образцов (рис. 1.22) [80].

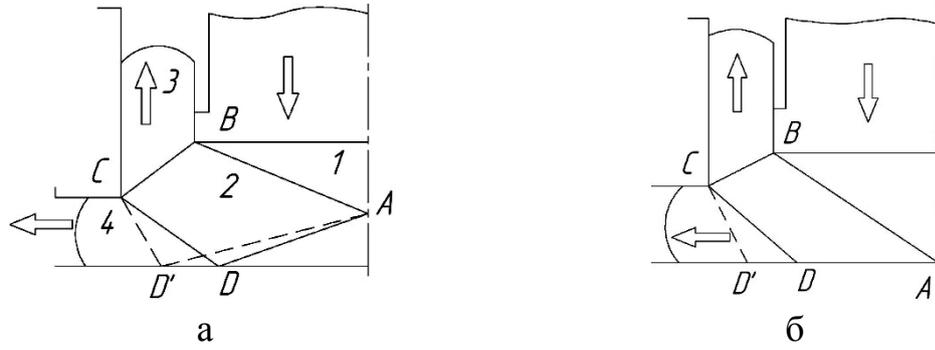


Рисунок 1.18 - КВПС для детали типа стакан с фланцем

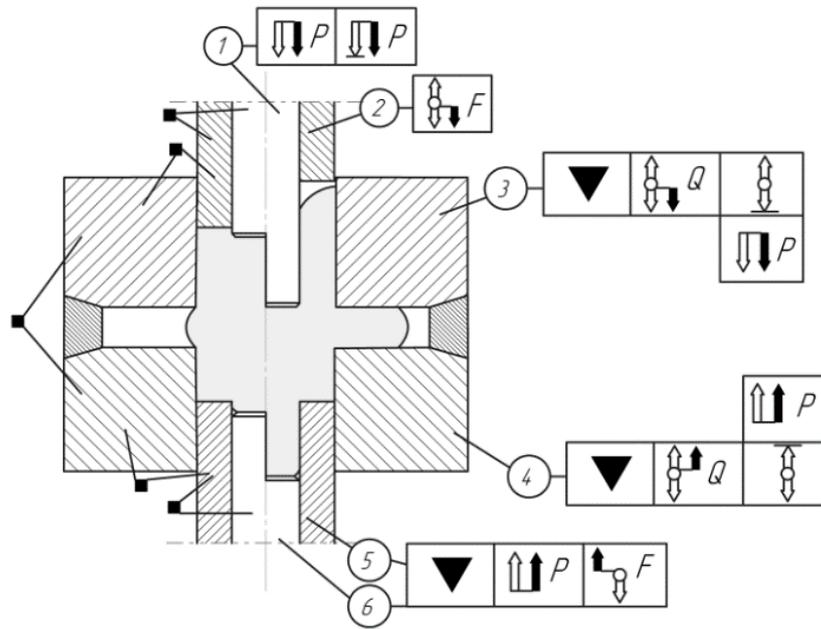


Рисунок 1.19 – Схема выдавливания с тремя степенями свободы течения металла

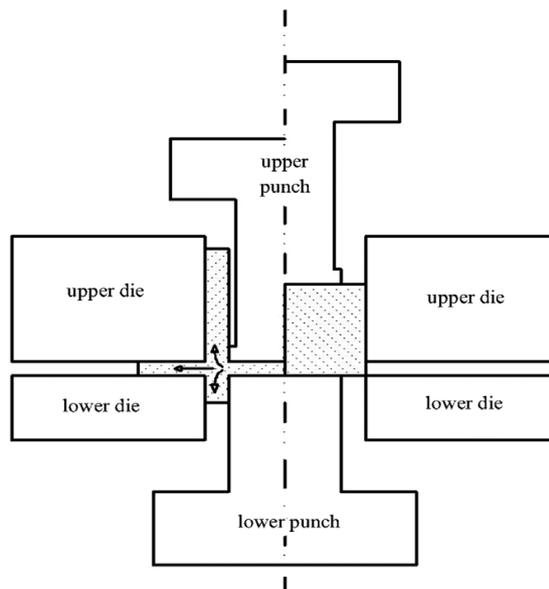


Рисунок 1.20 – Схема трехстороннего выдавливания

Жесткопластический метод конечных элементов используется для количественного анализа процесса радиального выдавливания в сочетании с обратным выдавливанием. В работе Но-Joon Choi [80] известно также, что различные переменные, такие как величина зазора, радиус закругления матрицы и фрикционные условия принимаются как параметры процесса для анализа (рис.1.23).

Анализировалось трехстороннее выдавливание с односторонней нагрузкой инструмента. Рассматривалось влияние геометрических параметров инструмента на течение металла. Анализ производился с помощью метода конечных элементов. Замеры твердости в продольном сечении использовались для определения распределения деформации. В работе указывается, что высота полости между полуматрицами и радиус скругления угла матрицы оказывают значительное влияние на формирование усилия. Увеличение этих параметров приводит большему течению металла в радиальном направлении. Также, анализировалось трехстороннее выдавливание с двусторонней нагрузкой инструмента. Кроме того, анализировалось влияние геометрических параметров на течение металла в трех направлениях.

Внимание было уделено формированию усилия выдавливания и соотношениям между объемами металла выдавленным в различных направлениях. Коэффициент трения оказывает большое влияние на усилие выдавливания и степень деформации.

В работе [79] проведено моделирование методом конечных элементов процесса формообразования заготовки типа втулка с фланцем комбинированным трёхсторонним выдавливанием. Получены зависимости управления процессом комбинированного выдавливания за счёт изменения геометрии рабочего инструмента. Разработана методика прогнозирования дефекта металла и даны рекомендации по предотвращению появления данного дефекта при комбинированном трёхстороннем выдавливании деталей типа втулка с фланцем.

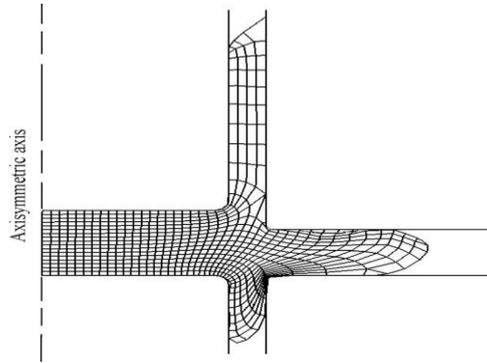


Рисунок 1.21 – Течение металла в различных зонах при комбинированном выдавливании



Рисунок 1.22 – Образец из алюминия

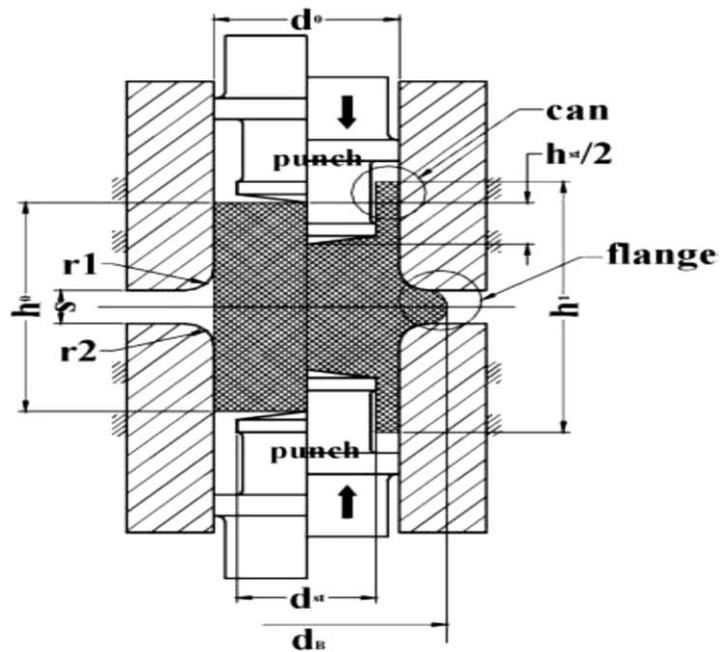


Рисунок 1.23 – Схема для анализа процесса выдавливания

1.3 Штампы и оснастка для процессов комбинированного выдавливания

Стабильность и эффективность процесса выдавливания в значительной мере зависят от конструкции используемого штампа.

Штампы с разъемными матрицами, необходимые для поперечного и комбинированного выдавливания, недостаточно распространены как из-за сложности конструкции, так и из-за недостаточности рекомендаций по их выбору и конструированию. Однако примеры внедрения таких штампов свидетельствуют об их перспективности и конкурентоспособности [3, 9, 81–85].

Благодаря интенсификации формоизменения, приводящей к уменьшению числа штамповочных переходов, применение штампов с разъемной матрицей оказывается выгодным даже для осесимметричных поковок несложной формы (рис. 1.24) [84, 86].

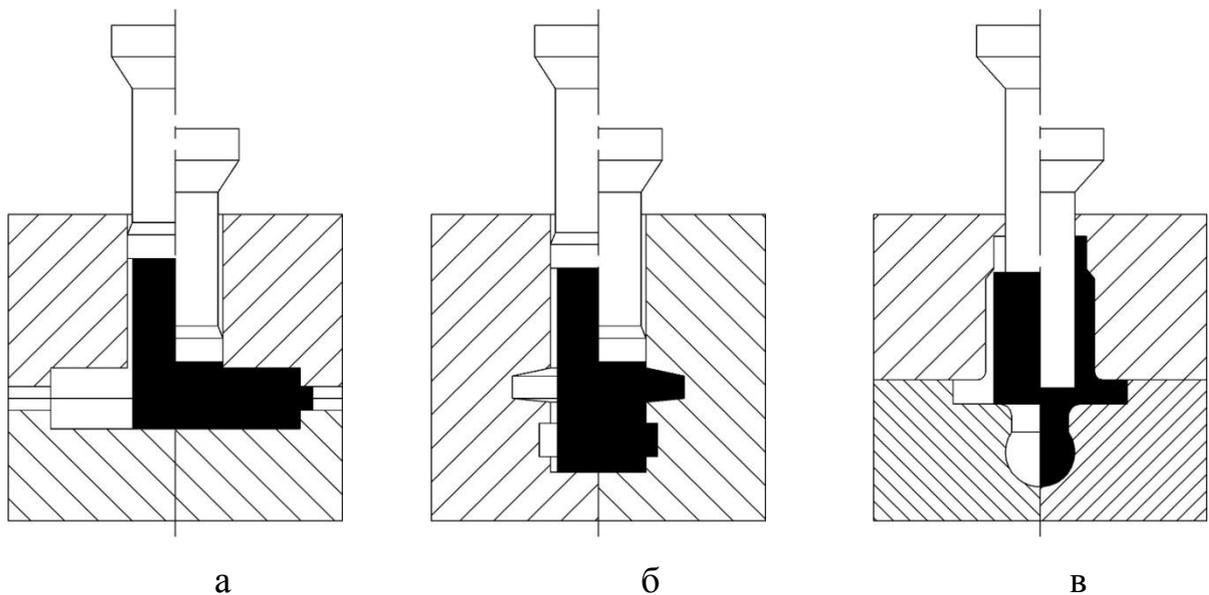


Рисунок 1.24 - Основные варианты разъема матрицы (а — поперечный; б — продольный; в — смешанный)

Штампы с продольным разъемом полуматриц [82, 83] применяются в горячей объемной штамповке и особенно часто на винтовых прессах, с поперечным разъемом полуматриц [85] – для малоотходной штамповки сложнопрофильных деталей [64]. Данные штампы могут иметь как одну, так и несколько поверхностей разреза, расположенных на различных уровнях и имеющих различную пространственную ориентацию. Конструктивной особенностью штампов для поперечного выдавливания в разъемных матрицах является необходимость запирания составной матрицы усилием, гарантированно превышающим усилие распора полости под воздействием деформируемого металла [82, 83]. Традиционное решение данной задачи – жесткое запирающее полуматриц, обеспечивающее постоянство размеров получаемых изделий.

Новые решения для конструкции штампов, разработанные на основе систематизации технологических задач, подтвердили возможность значительного расширения возможностей процессов штамповки без существенного усложнения оснастки. Из множеств, существующих и возможных конструктивных схем штампов с разъемными матрицами можно выделить отдельные группы штампов, отличающиеся положением разъемной матрицы и плоскости разреза, количеством плоскостей разреза, реализуемой кинематической схемой и степенью подвижности матрицы [87]. Для группирования компоновочных схем можно использовать и принцип действия системы запирающей разъемной матрицы, характер замыкания силовой системы и особенности развития силового режима.

Положение плоскости разреза полуматриц имеет большое значение с точки зрения конструктивного исполнения зажимного узла штампа, однако из всего многообразия конструкций штампов можно выделить ряд общих признаков зажимных устройств [85]:

- устройства с активным зажимом;
- устройства с реактивным зажимом;

– устройства с пассивным зажимом.

Устройства с активным зажимом используют для запираания и удержания полуматриц в замкнутом состоянии дополнительные механизмы автономным приводом [88–92]. Оригинальный механизм в виде клина с переменным углом раскрытия предложен в работах Бровмана М.Я. с соавторами, табл. 1.2 схема В2. Так в штампах с продольной плоскостью разъёма характерно применение промежуточных, чаще всего рычажных механизмов, приводимых от автономного привода (табл. 1.2, А1, В1). Для штампов с поперечной плоскостью разъёма характерным является применение клиновых или кулачково-клиновых приводных устройств зажима полуматриц (табл. 1.2, Б1, В1). Для устройств с активным зажимом характерным является отсутствие передачи усилия раскрытия матриц на ползун прессы, за счет полного восприятия замыкающим устройством. Недостатком замыкающих устройств данного типа является наличие дополнительного привода, усложняющего конструкцию и наладку штампа,

требующего наличия устройств для привода исполнительных органов замыкающих устройств штампа и согласования перемещений.

Отличительная особенность устройств с реактивным зажимом (табл. 1.2, Б2) – полная или частичная передача усилия раскрытия матриц на ползун прессы. Наиболее простые устройства данного типа – пружинные и гидравлические буферного типа, передающие все усилие раскрытия матриц на ползун прессы, что вынуждает применять пресс гораздо большей, чем необходимо для деформирования мощности [81]. Так в группе штампов с продольной плоскостью разъёма полуматриц типичными представителями устройств с реактивным зажимом являются штампы с конической подпружиненной запорной обоймой и устройства (табл. 1.2, А2), использующие принцип самозажима полуматриц (табл. 1.2, А3), а подгруппе с поперечной плоскостью разъёма штампы с буферно-пружинным зажимом (табл. 1.2, Б2).

Значительное возрастание усилия раскрытия к концу рабочего хода отрицательно влияет на работоспособность штампа и может вызвать заклинивание прессы. По предлагаемой классификации штампы с буферным зажимом относятся к группе устройств с нарастанием усилия раскрытия.

Схема табл. 1.2 А2 относится к группе устройств со снижением усилия раскрытия. Широко применяются устройства с самозажимом матриц рычажного типа или за счет размещения блока разъемных матриц в контейнере с конической полостью (табл. 1.2, А3).

В устройствах с пассивным зажимом силы раскрытия матриц замыкаются в штамповом блоке, а, следовательно, не передаются ни на ползун прессы, ни на какой-либо дополнительный привод. Наиболее широкое распространение данные схемы получили в штампах с поперечной плоскостью разъёма. Среди конструктивных решений целесообразно отметить ригельные устройства зажима (табл. 1.2, Б3), автоматически замыкающиеся кулачковые устройства (табл. 1.2, В2) и автоматически замыкающиеся и размыкающиеся устройства с поворотной скобой (табл. 1.2, В3). Применение устройств данного типа позволяет использовать штампы на любом универсальном прессе. К недостаткам решения можно отнести сложности с размыканием запирающих устройств [16, 81].

В устройствах с компаундным зажимом – реализуется идея использования для зажима полуматриц технологического усилия деформирования. Устройства и технологические схемы деформирования данного типа мало распространены. Среди известных решений можно выделить схемы зажима силами трения (табл. 1.2, Д2) и конструкции, в которых соотношение между усилиями раскрытия и технологическим усилием зависит от конструктивного исполнения устройства (табл. 1.2, Д1, Д3).

В последние годы были разработаны нетрадиционные способы холодного выдавливания для не симметричной формы заготовки и с различной геометрией инструмента, среди них, радиальное выдавливание,

ротационное формирование и не осесимметричное выдавливание. Исследовалось М. Плосак два нетрадиционных процесса холодного выдавливания: радиальное выдавливание с помощью круглого пуансона и обратного выдавливания с пуансоном квадратного сечения (рис. 1.25). Эксперименты проводились для того, чтобы определить основные параметры процесса. Кроме того, был разработан метод верхней оценки, для прогнозирования нагрузки в радиальном выдавливании, который показывает относительно хорошее сравнение с экспериментом [93].

Л.И. Алиевой с соавторами был разработан штамп для комбинированного выдавливания стакана с фланцем (рис. 1.26). Штамп для комбинированного выдавливания стакана с фланцем содержит пуансон, противополопуансон, матрицу, контейнер, верхнюю плиту и нижнюю плиту. Штамп дополнительно имеет штифты, которые центрируют заготовку относительно верхней полуматрицы, рычагов и прижима. Известный штамп используется для экспериментальной оценки формоизменения металла, не позволяет точно установить заготовку согласно матрицы и не может использоваться в крупносерийном производстве вследствие быстрого износа упругого элемента [94].

А.П. Качановым был разработан штамп для холодного обратного выдавливания (рис. 1.27). Данный штамп работает следующим образом. При ходе ползуна пресса вниз происходит заход направляющей части пуансона в матрицу. При этом отходит настройка плавающего пуансона и его направление. При ходе ползуна пресса вверх происходит выход пуансона с матрицы, который необходим для того, чтобы была возможность удаления отштампованной поковки из матрицы путем выталкивания. Эта особенность заставляет предусматривать между направляющей частью пуансона и матрицей такую величину технологического зазора, которая исключала бы возможность их соударения во время хода ползуна пресса вниз в момент захода пуансона в матрицу.

Таблица 1.2 - Конструкции замыкающих устройств

Продольная плоскость разъёма матриц			
	1	2	3
Поперечная плоскость разъёма матриц			



а)



б)

Рисунок 1.25 – Пуансон квадратного сечения (а) и полуфабрикат (б)

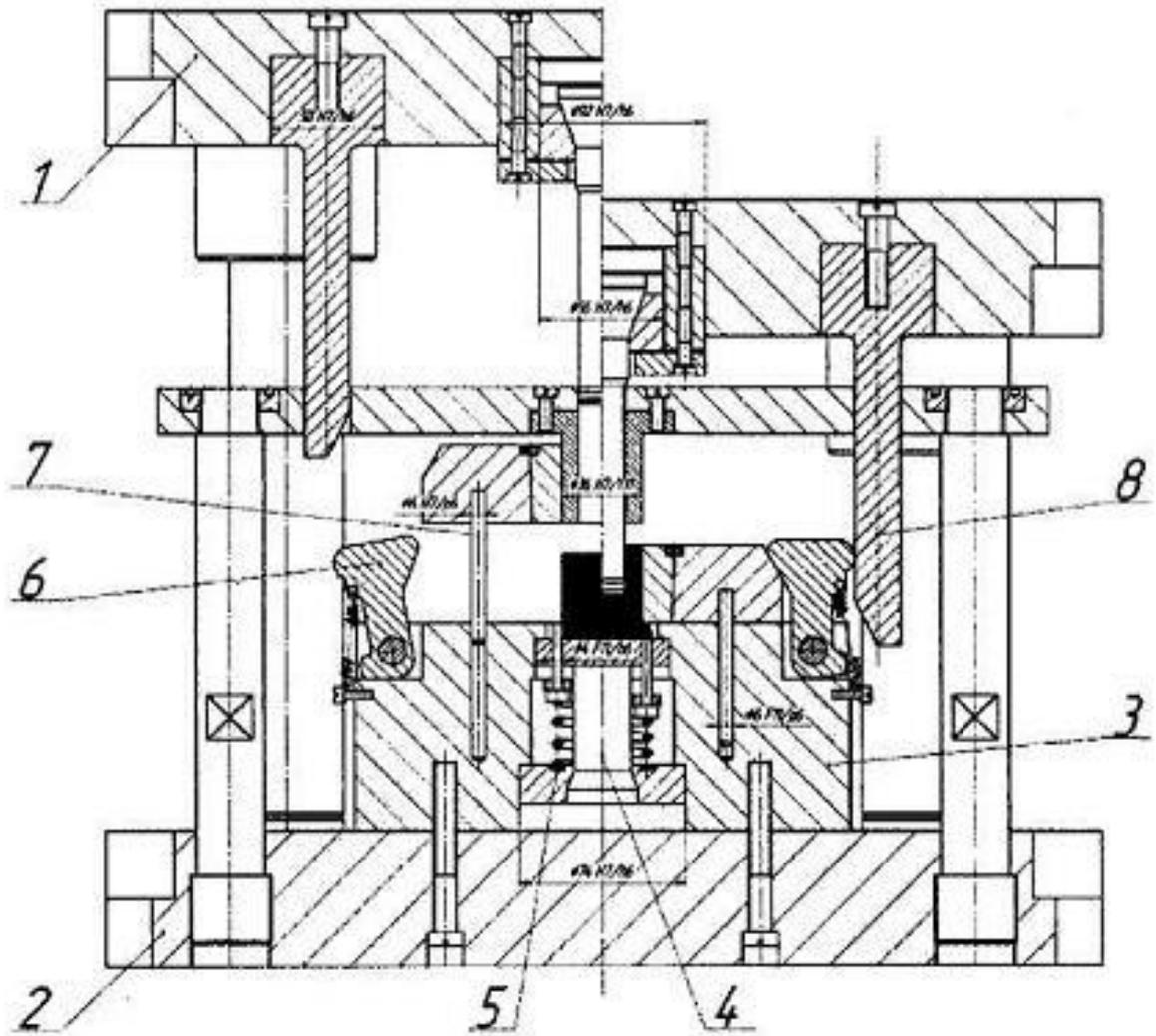


Рисунок 1.26 – Штамп для комбинированного выдавливания

Эта величина технологического зазора должна иметь значение, которое по своей абсолютной величине не меньше, чем суммарная погрешность оборудования, которое используется.

При таких условиях работы, точность получаемых деталей, получается низкой. Через начальную несоосность пуансона относительно матрицы, потому что является функцией от погрешностей составления и изготовления штампа в целом, а также от погрешностей пресса, таких как: зазоры между направляющими ползуна и станины пресса, неперпендикулярность хода ползуна поверхности стола, непараллельность нижней поверхности ползуна поверхности стола и других. Задачей настоящего изобретения является получение особо точных деталей с минимальной величиной разностенности, а также повышение устойчивости рабочего инструмента [95].

Еще один штамп для холодного выдавливания со встроенным гидравлическим компенсатором разработан А.П. Качановым (рис. 1.28). В данном штампе введено закрепленную в полости нижней плиты, которую заполнено рабочей жидкостью, при помощи матрицедержателя, плавающую матрицу. С возможностью движения относительно нижней плиты штампа с установленными между ними гидроизоляционными прокладками, которые расположены соответственно между матрицей и матрицедержателем, и между матрицедержателем и нижней плитой, втулку, которую запрессовано в верхнюю часть матрицы для направления пуансона, плавающий выталкиватель с возможностью движения вместе с матрицей, сферическую опору выталкивателя, плунжеры, закрепленных на направляющих колонках с возможностью движения во втулках, пружиненные золотники, с возможностью движения во втулках регулирующих винтов. Это обеспечивает возможность получения особо точных деталей типа «стакан» с минимальной величиной разноосности, а также гарантирует повышение устойчивости рабочего инструмента [96].

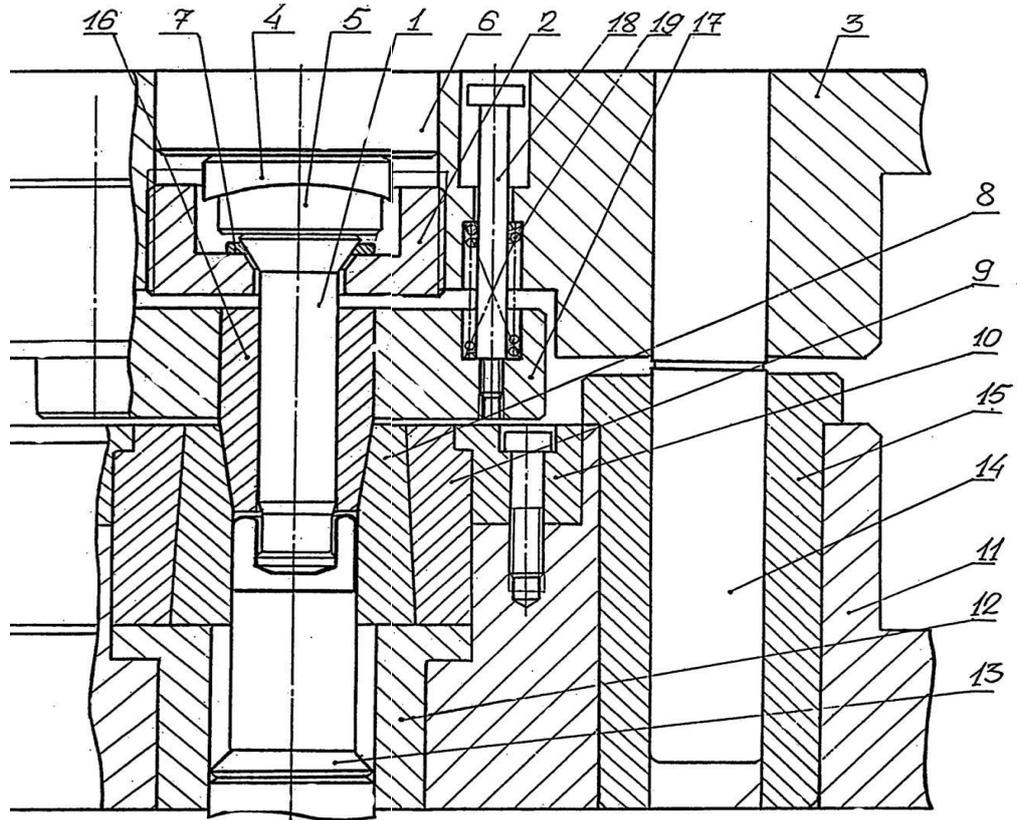


Рисунок 1.27 – Штамп для холодного обратного выдавливания

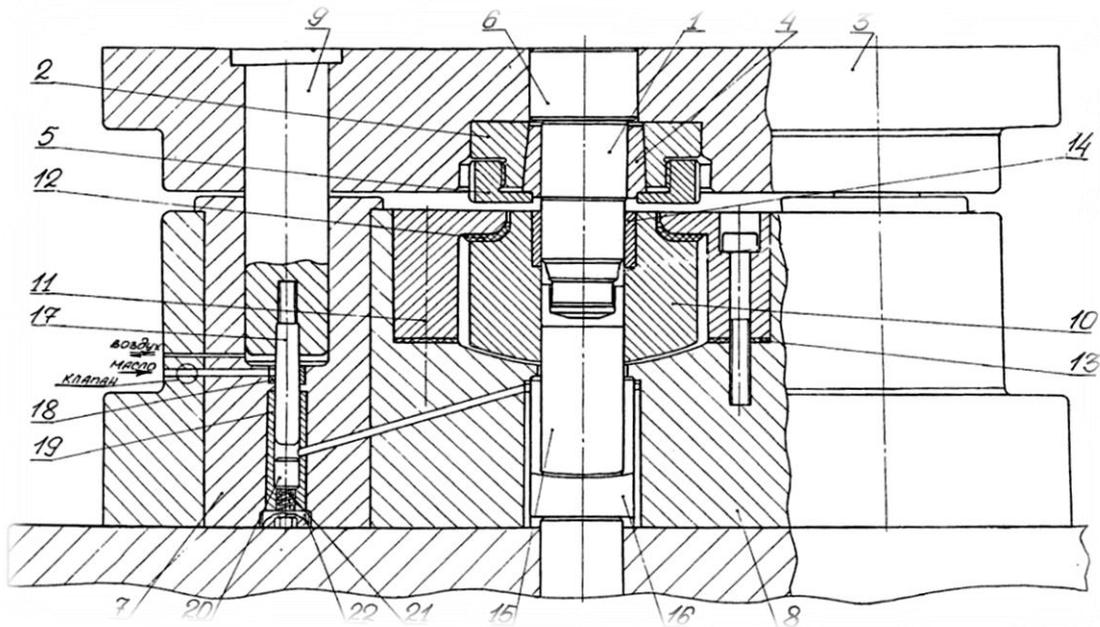


Рисунок 1.28 – Штамп для холодного выдавливания со встроенным гидравлическим компенсатором

И.С. Алиевым был представлен штамп для выдавливания пустотелых деталей со сложным профилем (рис. 1.29). Предложенная конструкция штампа для выдавливания полых деталей со сложным профилем.

Содержащий вращающиеся вокруг неподвижной оси, расположенной на неподвижных опорах, рычаги, которые взаимодействуют одним концом с профилированной боковой поверхностью пуансона, а вторым концом, который проходит сквозь выточку в деформирующем пуансоне, с торцом оправки позволяет за счет совмещения операций радиально-прямого выдавливания и изменение зазора, в который течет металл, между оправкой и матрицей, передвижением оправки, за один рабочий ход пресса получать полые детали со сложной внутренней поверхностью [97]. Использование зажимных устройств для получения типовых деталей так же рассмотрено в работах [98, 99].

Л.И. Алиева и соавторы предложили штамп для комбинированного выдавливания деталей с фланцем и отростком (рис. 1.30). Предложенная конструкция штампа для комбинированного выдавливания деталей с фланцем и отростком. Содержащий пуансон, контейнер, в котором находится матрица, которая подпружинена, контрпуансон, выталкиватель, который опирается на подъемные штоки, которые подпружинены, и препятствует изгибу и поломке контрпуансона, позволяет получать зазор между пуансоном и матрицей, а также между матрицей и контрпуансоном, в который течет металл, получать детали с фланцем и отростком. Штамп не позволяет получать с низкой трудоемкостью и себестоимостью детали [100].

О.К. Филиппов экспериментально исследовал течение металла при комбинированном процессе радиального и обратного выдавливания в конической матрице (рис. 1.31). Для оценки возможностей формоизменения и качества изделий, получаемых при выдавливании, наиболее важным является изучение напряженно-деформированного состояния обрабатываемого материала, знание распределения скоростей течения металла в заготовке позволяет прогнозировать форму и размеры детали, а знание распределения накопленной деформации — формировать необходимые показатели качества детали.

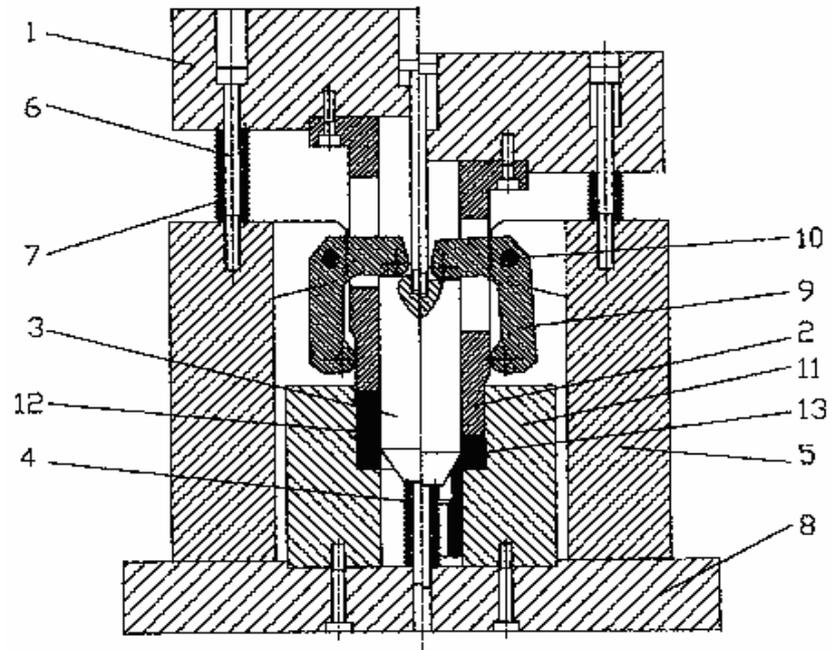


Рисунок 1.29 – Штамп для выдавливания пустотелых деталей со сложным профилем

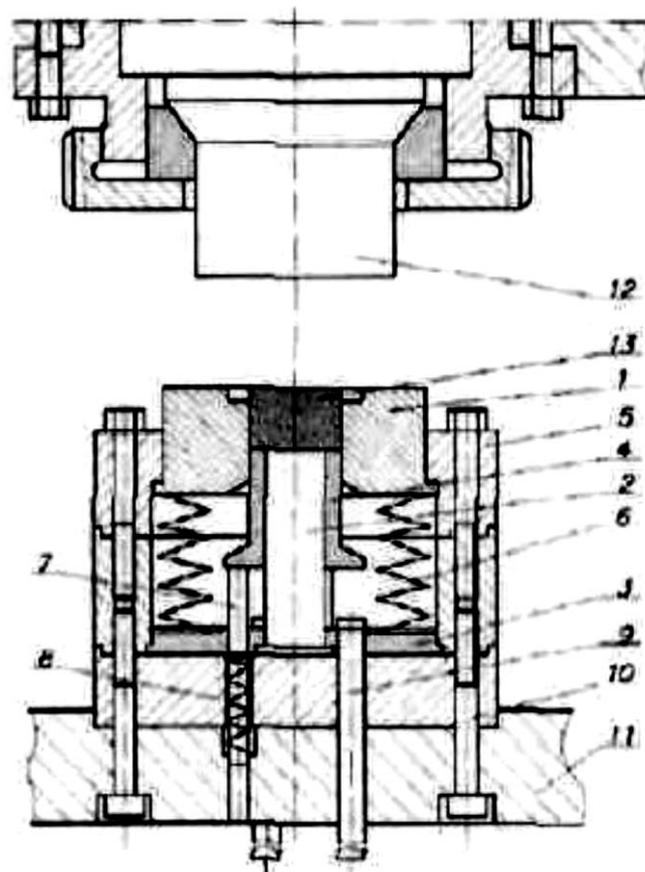


Рисунок 1.30 – Штамп для комбинированного выдавливания деталей с фланцем и отростком

Кроме того, известное распределение деформаций позволяет выявлять наиболее опасные зоны с большими степенями локальной деформации и по ним оценивать допустимые геометрические характеристики формообразования конструктивных элементов деталей. Для решения подобных задач хорошо зарекомендовал себя метод координатных (делительных) сеток. Были проведены экспериментальные исследования кинематики течения металла с целью получения данных для математического описания комбинированного процесса радиального и обратного выдавливания в конической матрице [101].

Прогрессивные технологические процессы холодного и полугорячего деформирования позволяют получать металлические заготовки деталей с высокими эксплуатационными свойствами и минимальными допусками. Однако разработка технологических переходов и проектирование оптимальной конструкции инструментальной оснастки возможны лишь на основе накопленных данных о закономерностях пластического течения металлических материалов. В.Г. Кутяйкин анализировал микроструктуру заготовок в очаге деформации при вдавливании пуансона с плоским торцом (рис. 1.32).

Проведенный анализ показал, что во всех направлениях (осевом и радиальном), перпендикулярных к поверхностям вдавливаемого пуансона, происходит сжатие зерен микроструктуры. Однако часто деформация зерен происходит не во всем объеме заготовки. Она охватывает лишь локальный объем вокруг вдавливаемого пуансона. Этот объем в научно-технической литературе называется очагом деформации. Необходимо отметить, что в продольном (осевом) сечении внешнее очертание очага деформации перед торцом вдавливаемого пуансона близко к полусфере, а вдоль боковой поверхности пуансона практически повторяет очертание контура пуансона. Однако размеры и внутреннее состояние очага могут существенно различаться в зависимости от формы пуансона [102].

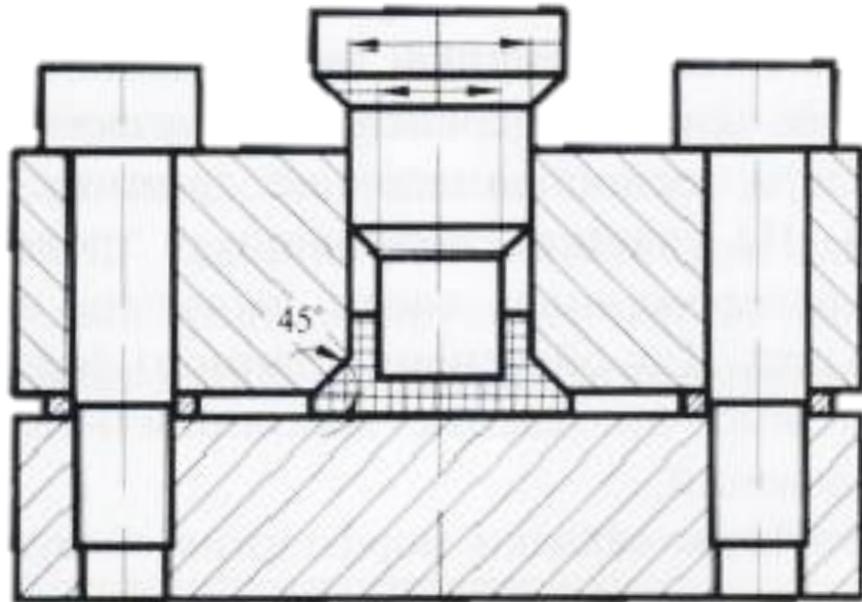


Рисунок 1.31 – Схема экспериментального штампа с конической матрицей

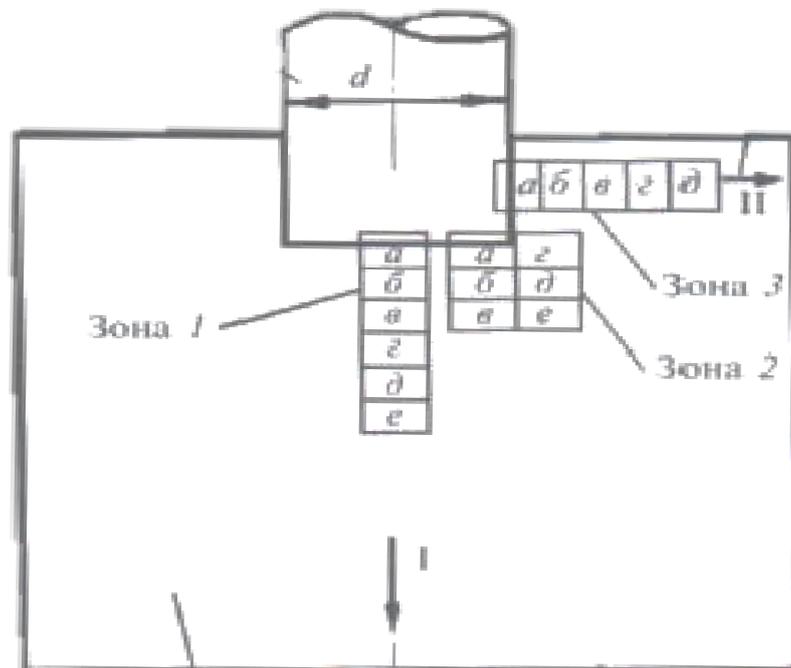


Рисунок 1.32 – Схема расположения зон при вдавливании пуансона с плоским торцом

Выводы по разделу

На основании проведенного анализа состояния и путей развития процессов точной объемной штамповки можно сделать следующие выводы:

1. Процессы ТОШ являются ресурсосберегающими технологиями, которые обеспечивают минимальные затраты и высокую точность готового изделия. Разработка новых ресурсосберегающих технологий ХОШ позволяет получать детали сложной формы. Поэтому имеется тенденция к увеличению практического освоения подобных процессов.

2. Для исследования процессов выдавливания используется большое количество методов. На основе энергетического метода и МКЭ разработаны модели, позволяющие оценить особенности поэтапного формообразования и развития энергосилового режима, что выводит исследования на новый уровень.

3. Изготовления деталей сложной формы с высокой степенью точности и с меньшими рабочими нагрузками перспективно использование процессов, основанных на новых способах комбинированного выдавливания в разъемных и подвижных матрицах.

4. В результате анализа установлено, что несмотря на наличие решений по определению силового режима и НДС заготовки в процессах выдавливания деталей сложной конфигурации, остается актуальным вопрос уточнения этих решений применительно к процессам комбинированного течения. Требуется оценка степени исчерпания ресурса пластичности и закономерностей формообразования при выдавливании деталей с фланцем и отростком.

5. Отсутствуют практические рекомендации по проектированию технологического процесса комбинированного трехстороннего выдавливания и эффективной штамповой оснастки для реализации процесса.

Учитывая общие тенденции развития, достигнутый уровень освоения процессов ТОШ и перспективы изготовления деталей с фланцем и отростком методом холодного выдавливания сформулированы цель и задачи исследований, изложенные во введении диссертации.

РАЗДЕЛ 2

ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основной задачей в машиностроении и металлургии в условиях высокой конкуренции, является выпуск высококачественной и точной продукции с минимальными экономическими и техническими показателями производства. Реализовать на практике это возможно за счет применение процессов обработки металлов давлением и, в частности, ресурсосберегающие процессы точной объёмной штамповки, в том числе холодное выдавливание.

Фасонные изделия сложной конфигурации, широко распространённые в промышленности, зачастую изготавливают поэтапно с применением холодного продольного (обратным и прямым) и поперечного (радиального) выдавливания (рис. 2.1).

Для снижения усилий деформирования при простом одностороннем выдавливании увеличивают количество переходов и степеней свободы истечения металла, снижают силы трения и площадь контакта инструмента с заготовкой. Кроме того, применяют комбинированные способы выдавливания, как двух, так и трехстороннего деформирования [103, 104].

2.1. Выбор направления исследования

Процессы точной объёмной штамповки позволяют получать детали и заготовки максимально приближенные по геометрии к готовому изделию. В процессах холодной штамповки коэффициент использования материала (КИМ) достигает 0,98% [105, 106]. Также процессы ХОШ характеризуются высокой энергоэффективностью и производительностью. Наиболее высокие экономические показатели возможны при серийном производстве. В случаях

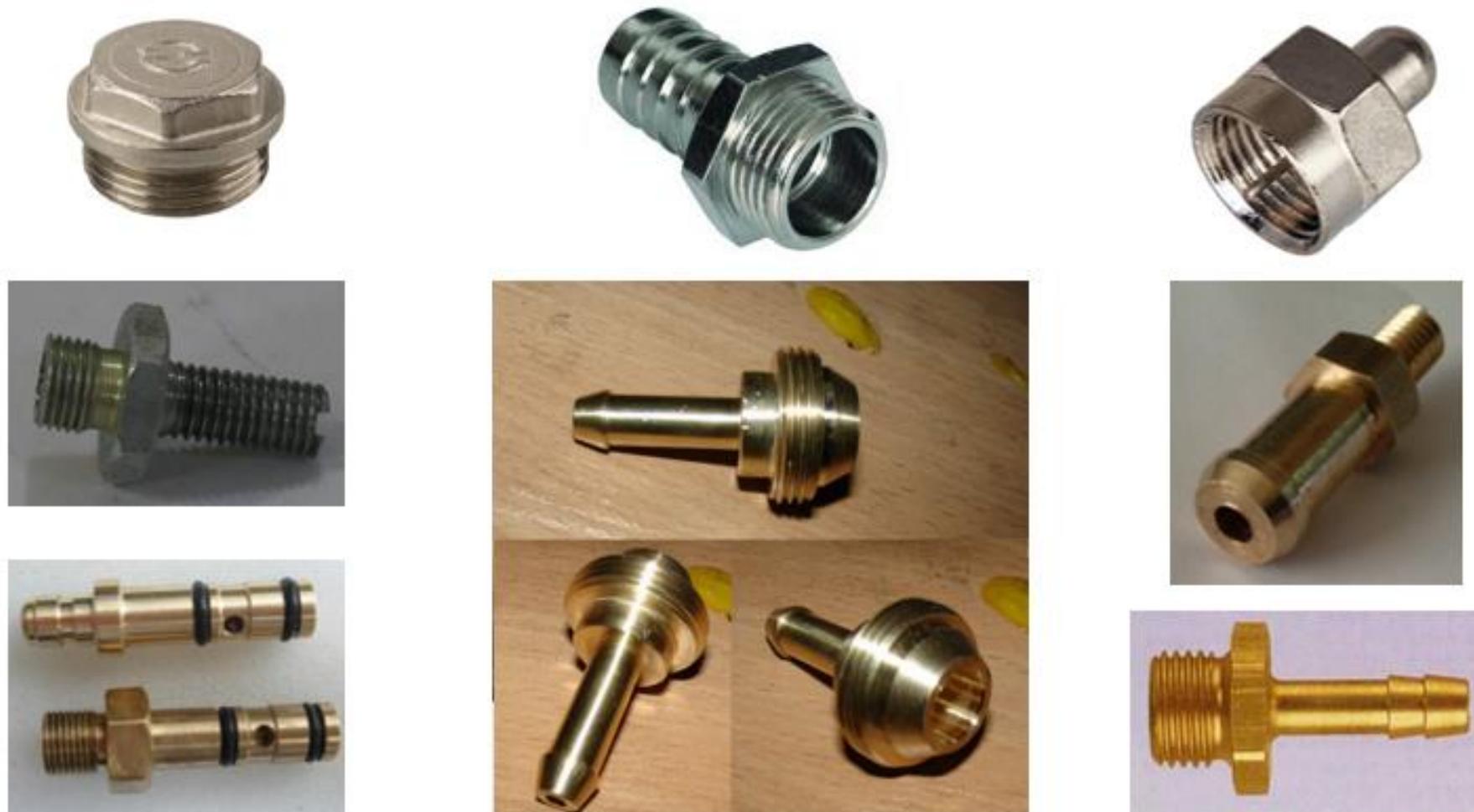


Рисунок 2.1 – Разновидности деталей сложной наружной конфигурации с фланцем и отростком

использования универсальной переналаживаемой оснастки, процессы ХОШ становятся конкурентоспособными в сравнении с процессами резания, которые преобладают на машиностроительных предприятиях Украины. Поэтому для более широкого использования холодной штамповки имеет смысл освоение типоразмеров и конфигураций сложно профильных изделий с несколькими направлениями течения материала.

В холодной штамповке до сих пор не существует алгоритмов, руководствуясь которым можно назначить оптимальные технологические параметры, обеспечить требуемое формоизменение, а также приемлемую для производства прочность и стойкость рабочего инструмента. В большинстве случаев разработка технологии с использованием того или иного вида выдавливания представляет уникальный в своём роде процесс, результаты которого во многом зависят от квалификации технолога. В результате для производства одной детали может быть несколько вариантов ее изготовления при этом каждый вариант требует экспериментальной проверки, а значит и изготовления или модернизация инструмента, штампа, оборудования что повлечет за собой как временные, так и материальные затраты. Экономическая нецелесообразность такого подхода наиболее очевидна в случае небольшой партии деталей, когда затраты на отработку технологии сделают производство нерентабельным. Для интенсификации процесса разработки технологических операции объёмной штамповки необходима информация о напряжённно-деформированном состоянии (НДС) материала заготовки, влиянии геометрических параметров на формоизменение заготовки. Для получения соответствующей информации могут быть использованы методы экспериментального исследования и теоретического моделирования, а также их комбинация [5, 107-109].

Задачам обработки металлов давлением свойственны большие пластические деформации. Металлы обладают сложными физико-механическими свойствами, которые изменяются в процессе деформации.

Необходимо иметь расчетный аппарат, который позволил бы наблюдать за процессом пластического формоизменения каждой отдельной частицы, из которых состоит обрабатываемое тело [110, 111].

При разработке технологических процессов обработки металлов давлением приходится сталкиваться с необходимостью определения расчетным путем усилий, работы и мощности деформации. Это нужно для выбора типа и мощности штамповочного оборудования [8, 112 – 116].

На сегодняшний день детали с тремя направлениями течения материала возможно получить поэтапным формоизменением заготовки. Малоизученными являются схемы комбинированного выдавливания с трехсторонним направлением течения материала (рис 2.2). Данные схемы обладают такими достоинствами как расширенные возможности в формоизменении и благоприятное напряженно-деформированное состояние заготовки в процессе выдавливания.

Комбинированное трехстороннее выдавливание имеет ряд преимуществ по сравнению с поэтапным формоизменением, такие как: упрощенная оснастка, свободное течение материала, совмещенный очаг деформации, энергоэффективность за счет уменьшения количества переходов и т.д.

На выбор метода исследования оказывает влияние характер поставленных задач [117 – 119]. Цель теоретических исследований - анализ процессов комбинированного выдавливания, создание математической модели, позволяющей оценить силовой режим деформирования, раскрытия с учетом основных технологических факторов, влияющих на ход процесса.

Использование математических моделей дает возможность еще на стадии проектирования технологического процесса предсказать поведение материала в реальном процессе при различных сочетаниях управляющих и геометрических параметров и получить необходимые для проектирования сведения.

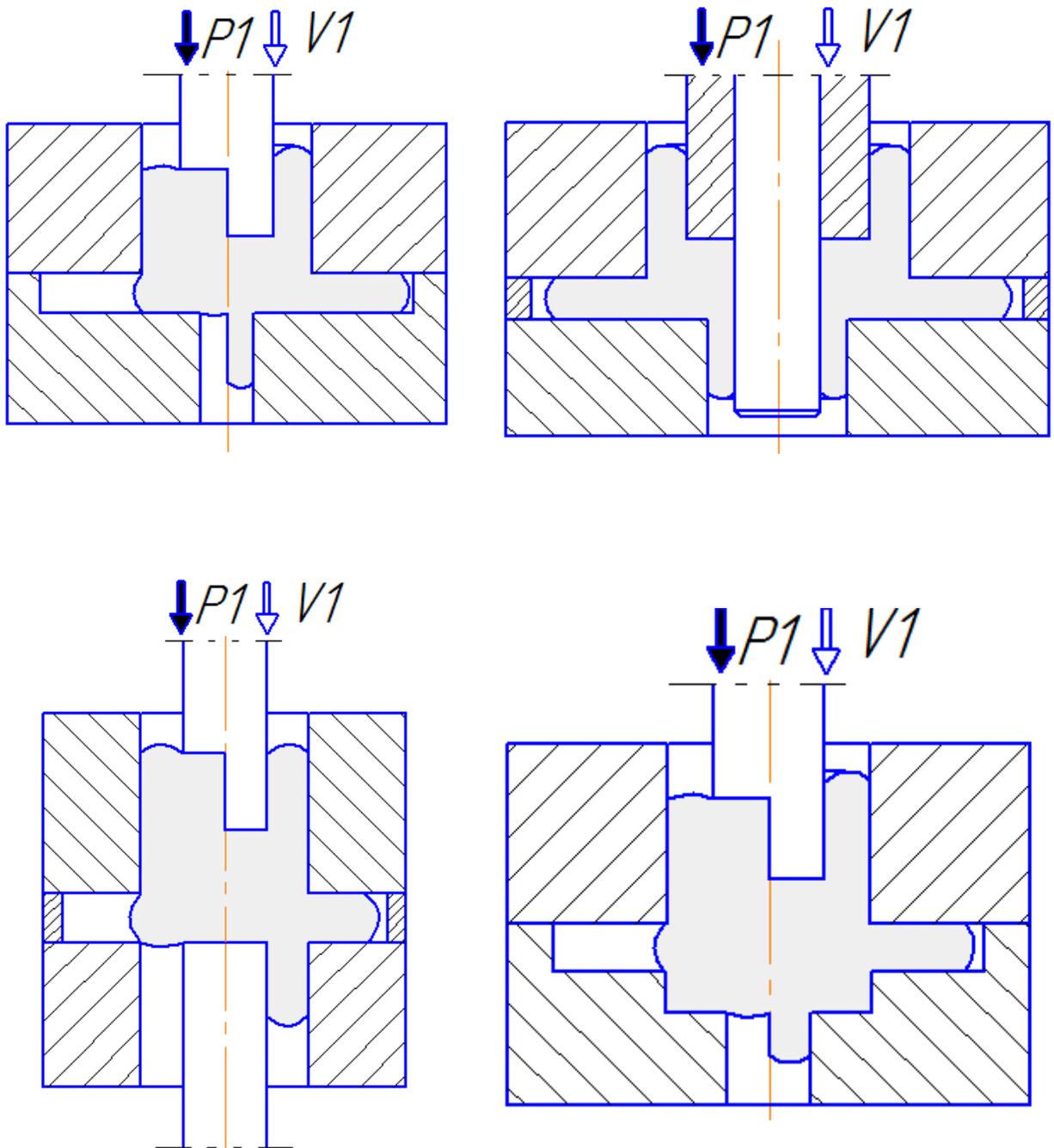


Рисунок 2.2 - Схемы трехстороннего выдавливания

Анализ известных теоретических методов расчета технологических процессов [8, 107, 110 - 124] позволил выделить энергетический метод, метод конечных элементов и планирование эксперимента для анализа комбинированного трехстороннего выдавливания, для применения в данной работе.

Из экспериментально-аналитических методов для определения деформированного состояния и анализа процесса течения металла был выбран метод координатных сеток [125, 126].

2.2 Методика проведения теоретических исследований

Применение энергетического метода баланса мощностей.

Одним из эффективных методов решения задач пластического деформирования считается энергетический метод (ЭМ) основными преимуществами которого являются его гибкость, оперативность, возможность эффективного применения ЭВМ для выбора подходящих функций и варьируемых параметров, описывающих кинематику течения [10, 19, 99, 127 – 135].

Согласно данному методу в деформируемой заготовке выделяют ряд пластических зон – кинематических элементов. После чего для каждого элемента находят кинематически возможное поле скоростей (КВПС) и на его основе полную мощность деформирования, упрощение которой позволяет уточнить оценки силового режима и картин пластического течения и оптимизировать параметры протекания процесса деформации [5, 121 – 123, 136 – 141].

$$\begin{aligned} v_z &= c_1 \cdot z + c_2 \\ v_r &= -\frac{1}{2} \cdot c_1 \cdot r + \frac{c_3}{r}, \end{aligned} \quad (2.1)$$

где c_1, c_2, c_3 – искомые переменные.

Основные допущения, которые присутствуют в энергетическом методе:

- а) скорость движения инструмента постоянна;
- б) изотропность материала;
- в) материал неупрочняем, несжимаем, упругими деформациями пренебрегают;
- г) напряжения трения на контактной поверхности постоянны и наперед заданы (по закону Зибеля).

Характерные для метода условия и ограничения:

- а) условие несжимаемости (условие постоянства объема) – объем тела до деформации равен объему тела после деформации;
- б) кинематические граничные условия – эти условия определяют перемещение или скорость перемещений отдельно взятых объемов, поверхностей или частиц тела подвергаемого деформации в скоростях на входе или на выходе;
- в) условие неразрывности нормальных компонент скорости течения, разрыв возможен только в касательных составляющих.

Для решения задачи энергетическим методом необходимо разделить деформируемую заготовку на несколько зон простой формы и определить все возможные мощности, затрачиваемые на деформирование заготовки .

Уравнение баланса мощностей выглядит следующим образом:

$$N_a = N_d + N_c + N_t, \quad (2.2)$$

где N_a, N_d, N_c, N_t – мощности активных, деформирующих сил и сил среза и трения.

Мощность активных сил:

$$N_d = \iiint_{V_a} \sigma_s \dot{\varepsilon}_i dV_a, \quad (2.3)$$

где N_d – мощность, затрачиваемая на деформирование;

σ_s – напряжение текучести, МПа;

$\dot{\varepsilon}_i$ – интенсивность скоростей деформации;

V_a – объем деформирования;

dV_a – бесконечно малый объем деформирования.

Интенсивность скоростей деформации:

$$\dot{\varepsilon}_i = \sqrt{\frac{2}{3}(\dot{\varepsilon}_r^2 + \dot{\varepsilon}_\theta^2 + \dot{\varepsilon}_z^2) + \frac{1}{2}\dot{\gamma}_{rz}^2}, \quad (2.4)$$

где $\dot{\varepsilon}_z = \frac{dV_z}{dz}$, $\dot{\varepsilon}_r = \frac{dV_r}{dr}$, $\dot{\varepsilon}_\theta = \frac{V_r}{r}$, $\dot{\gamma}_{rz} = \frac{dV_r}{dz} + \frac{dV_z}{dr}$ – скорости

линейных и угловых деформаций.

При этом должно выполняться условие несжимаемости материала:

$$\dot{\varepsilon}_z + \dot{\varepsilon}_r + \dot{\varepsilon}_\theta = 0. \quad (2.5)$$

Подынтегральное выражение может получиться достаточно сложным для интегрирования, поэтому необходимо линеаризация интенсивности скоростей деформаций:

$$\dot{\varepsilon}_i = 1.08 \cdot |\dot{\varepsilon}_{\max}|. \quad (2.6)$$

Мощность сил среза:

$$N_c = \iint_{F_c} \tau_c V_c df_c, \quad (2.7)$$

где N_c – мощность, затрачиваемая на срез;

$$\tau_c = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \text{ – напряжение среза, МПа;}$$

V_c – относительная скорость среза двух соседних зон;

F_c – поверхность среза, мм²;

df_c – бесконечно малая площадка среза.

Мощность сил трения:

$$N_c = \iint_{F_k} \tau_k V_k df_k, \quad (2.8)$$

где N_i – мощность, затрачиваемая на трение;

$$\tau_k = \frac{2\sigma_s}{\sqrt{3}} \mu_s \text{ – контактное напряжение, МПа;}$$

V_k – относительная скорость движения заготовки и инструмента;

F_k – поверхность контакта заготовки и инструмента;

df_k – бесконечно малая площадка контакта.

Основное для энергетического метода – это уравнение энергетического баланса мощностей внешних и внутренних сил на кинематически возможных перемещениях:

$$p \cdot F \cdot V_0 = \iiint_V \sigma_s \cdot \dot{\varepsilon}_i \cdot dV + \iint_{F_T} \tau_k \cdot [V_k] \cdot df_k + \iint_{F_C} \tau_s \cdot [V_c] \cdot df_c. \quad (2.9)$$

Приравняв активную мощность сумме мощностей деформирования, трения и среза, получим значение давления p :

$$p = \frac{\sum (N_{di} + N_{ci} + N_{ti})}{F \cdot V_0}. \quad (2.10)$$

Для простоты расчетов приведем давление к безразмерной величине:

$$\bar{p} = \frac{P}{\sigma_s}. \quad (2.11)$$

Приведенное давление является универсальной величиной, позволяющей для определенной схемы деформации для различных материалов рассчитать величину усилия деформирования:

$$P = \bar{p} \cdot \sigma_s \cdot F, \quad (2.12)$$

где F – площадь контакта деформирующего инструмента.

Применение метода конечных элементов для исследования процессов комбинированного трехстороннего выдавливания.

На сегодняшний день метод конечных элементов является самым перспективным в вопросе решения плоских и осесимметричных задач. В своей методологической основе этот метод тесно связан с такими проекционными методами, как метод Галеркина или метод Ритца, однако вместо координатных функций в этом методе в качестве координатных используются функции с конечным носителем, отличные от нуля только в сравнительно небольшой области изменения аргументов [142, 143]. Метод нашел широкое применение для решения задач пластической деформации заготовок, расчета напряженно-деформируемого состояния (НДС) и температурных полей в задачах которые ставятся перед обработкой металлов давлением.

Метод сводится к следующему: область разбивается на отдельные элементы, в пределах этого элемента записывается функциональное выражение для каждого из искомых параметров системы уравнения, как простые функции координат; приравнивая значения в узловых точках для

соседних областей, получаются уравнения (системы уравнений), с помощью которых определяем коэффициенты в функциональных уравнениях.

Созданию такого метода во многом способствовало развитие вычислительной техники. Сегодня создано большое количество программных продуктов для моделирования процессов обработки металлов давлением, в основе которых положен метод конечных элементов.

Использование метода конечных элементов требует большого количества времени и очень трудоемко. Однако развитие вычислительной техники и разработка программного обеспечения позволили свести трудоемкость использования этого метода к минимуму.

Существует множество специализированных и общеинженерных пакетов для анализа методом конечных элементов, такие как QForm 2D/3D, DeForm 2D/3D, Abacus, FORGE, AutoForm и др.

Одним из наиболее популярных пакетов использующих МКЭ является DeForm 2D/3D.

Алгоритм создания модели в пакете DeForm 2D/3D следующий. В программе Solid Works создавались трехмерные геометрии инструмента и заготовки в натуральном масштабе. После чего создавалась сборка элементов согласно схеме выдавливания с соблюдением необходимых геометрических параметров и сохранялось с разрешением «.stl». Далее в программе DeForm 2D/3D в разделе «Препроцессор» добавлялись все элементы сборки в разрешении «.stl». Здесь же задавались для заготовки материал, сетка, а для инструмента направление движение. После чего задавался ход главного инструмента, коэффициент трения по Зибелю. Затем производился автоматический расчет в программном пакете DeForm 2D/3D [144].

С помощью метода конечных элементов, используя математический аппарат метода планирования эксперимента, исследовался силовой режим деформирования и формоизменение. Также оценивалось напряженно-деформированное состояние, используя данные которого, рассчитывался ресурс пластичности.

Применение метода планирования эксперимента.

Повышение эффективности исследований и инженерных разработок достигается использованием математических методов планирования экспериментов. Использование математико-статистических методов при постановке задач, в процессе обработки полученных данных существенно сокращает сроки решения, снижает затраты на исследования и повышает качество полученных результатов [136, 145].

В качестве независимых переменных выбираются исследуемые параметры процессов ОМД. Локальная область определения факторов устанавливается из априорных соображений. Каждый из факторов варьируется на двух уровнях. Интервалы варьирования факторов и их значения в натуральном масштабе на основном, верхнем и нижнем уровнях указываются в таблице уровней факторов (табл. 2.1).

Кодированные значения факторов (x_i) связаны с натуральными (X_i) соотношениями:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i_0}}{\Delta X_i}. \quad (2.13)$$

В соответствии с выбранным планом для линейной функции уравнения регрессии выполняется 16 опытов. Каждый опыт повторяется 3 раза. Последовательность обработки результатов эксперимента для равномерного дублирования опытов:

1. Расчёт дисперсии опыта. Для каждого опыта по формуле (2.14) рассчитывается построчная дисперсия.

$$S_{y_u}^2 = \frac{\sum_{g=1}^{n_u} (y_{u_g} - \bar{y}_u)^2}{f_u}, \quad (2.14)$$

где y_{u_g} – результат g-го повторения u-го опыта;

\bar{y}_u – среднее арифметическое значение всех n_u дублей u -го опыта;
 $f_u = n_u - 1$ – число степеней свободы при определении u -й построчной дисперсии $S_{y_u}^2$.

Для проверки однородности ряда по формуле (2.15) рассчитывается величина критерия Кохрена.

$$G^{расч} = \frac{S_{y_u \max}^2}{\sum_{u=1}^N S_{y_u}^2}, \quad (2.15)$$

где $G^{расч} < G^{табл}$ – условие однородности ряда дисперсий.

2. Расчёт коэффициентов регрессии. В данном случае модель строится по следующей зависимости:

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq 4} b_i \cdot x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq 4} b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{1 \leq i < j < l \leq 4} b_{ijl} \cdot x_i \cdot x_j \cdot x_l + b_{1234} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4. \quad (2.16)$$

Для расчётов коэффициентов b используется расширенная матрица планирования (табл. 2.2) и результаты опытов (среднее из трёх). Коэффициенты рассчитываются по формуле (2.17).

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{i_u} \cdot y_u}{N}. \quad (2.17)$$

3. Проверка статистической значимости коэффициентов. По формуле (2.18) определяется дисперсия оценок коэффициентов.

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{n \cdot N}. \quad (2.18)$$

Далее по формуле (2.19) определяется доверительный интервал коэффициентов регрессии.

$$\Delta_{b_i} = t_{\alpha, f_1} \cdot S_{b_i}. \quad (2.19)$$

Коэффициенты, абсолютная величина которых равна доверительному интервалу или больше его, следует признать статистически значимыми. Статистически незначимые коэффициенты из модели можно исключить.

4. Проверка адекватности модели. По формуле (2.20) определяется дисперсия неадекватности.

$$SS_{неад} = n \cdot \sum_{u=1}^N (y_{u\text{ расч}} - \bar{y}_{u\text{ эксп}})^2. \quad (2.20)$$

Гипотеза об адекватности модели определяется по критерию Фишера:

$$F_{f_2, f_1}^{расч} = \frac{S_{неад}^2}{S_y^2}, \quad (2.21)$$

где $F_{f_2, f_1}^{расч} < F^{табл}$ – гипотеза об адекватности модели не отвергается.

Часто влияние факторов на величину отклика описывается нелинейными зависимостями. В таких случаях, необходимо составлять планы второго порядка [136]. В результате получают регрессионные модели в виде полного квадратичного полинома, для которых факторы варьируются на трёх уровнях. Решением этой проблемы является реализация плана 3^k . Но поскольку реализация такого плана требует большого числа опытов уже при $k=4$, то вместо планов типа 3^k широко применяют планы, в которых в качестве ядра используются ортогональные планы типа 2^k , на котором достраивают конструкцию плана второго порядка [146].

Интервалы варьирования факторов для трёхуровневого эксперимента и их значения в натуральном масштабе на основном, верхнем и нижнем уровнях указываются в таблице уровней факторов (табл. 2.3).

Таблица 2.1 – Уровни факторов

Факторы	X_1	X_2	X_3	X_4
Основной уровень (X_{i_0})	X_{1_0}	X_{2_0}	X_{3_0}	X_{4_0}
Интервал варьирования (ΔX_i)	ΔX_1	ΔX_2	ΔX_3	ΔX_4
Верхний уровень ($x_i=1$)	$X_{1_0} + \Delta X_1$	$X_{2_0} + \Delta X_2$	$X_{3_0} + \Delta X_3$	$X_{4_0} + \Delta X_4$
Нижний уровень ($x_i=-1$)	$X_{1_0} - \Delta X_1$	$X_{2_0} - \Delta X_2$	$X_{3_0} - \Delta X_3$	$X_{4_0} - \Delta X_4$

Таблица 2.2 – Расширенная матрица плана

№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4	$x_1x_2x_3$	$x_1x_2x_4$	$x_1x_3x_4$	$x_2x_3x_4$	$x_1x_2x_3x_4$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1
3	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1
4	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1
5	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1
6	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
7	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
9	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1
10	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1
11	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1
12	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1
13	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1
14	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1
15	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1
16	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1

Кодированные значения факторов (x_i) связаны с натуральными значениями (X_i) следующим соотношением (2.13). Матрица планирования записывается в виде табл. 2.4.

Для планов типа B_k коэффициенты регрессионного уравнения можно определить по следующим формулам:

$$b_0 = C_1 \sum_{u=1}^N y_u - C_2 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u, \quad (2.22)$$

$$b_i = C_3 \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u, \quad (2.23)$$

$$b_{ij} = C_4 \sum_{u=1}^N (x_i x_j)_u y_u, \quad (2.24)$$

$$b_{ii} = C_5 \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u + C_6 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u - C_2 \sum_{u=1}^N y_u, \quad (2.25)$$

где $C_1 \dots C_6$ – вспомогательные константы; y_u – значение отклика в u -ом опыте; x_{iu} – значение i -го фактора в u -м опыте [136].

Уравнение регрессии определяется зависимостью:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{14} b_i x_i + \sum_{i=1}^{14} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{14} b_i x_i^2, \quad (2.26)$$

Определение напряжённого состояния. Оценка исчерпания ресурса пластичности.

В процессе холодного пластического деформирования, наряду с упрочнением металла, происходит накопление в нём повреждённостей, приводящее к разуплотнению материала и снижению показателей остаточной пластичности. В результате этого наблюдается ухудшение служебных свойств изделий, вплоть до разрушения заготовок в процессе пластической обработки или изделий при эксплуатации. Поэтому обеспечение качества изделий при обработке методами ОМД невозможно без оценки способности металлов деформироваться без разрушения, при минимальном исчерпании ресурса пластичности.

Таблица 2.3 – Уровни факторов

Факторы	X_1	X_2	X_3
Основной уровень (X_{i_0})	X_{1_0}	X_{2_0}	X_{3_0}
Интервал варьирования (ΔX_i)	ΔX_1	ΔX_2	ΔX_3
Верхний уровень ($x_i=1$)	$X_{1_0} + \Delta X_1$	$X_{2_0} + \Delta X_2$	$X_{3_0} + \Delta X_3$
Нижний уровень ($x_i=-1$)	$X_{1_0} - \Delta X_1$	$X_{2_0} - \Delta X_2$	$X_{3_0} - \Delta X_3$

Таблица 2.4 – Расширенная матрица плана

№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	-1	0	0	0	0	0	1	0	0
10	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0
11	1	0	-1	0	0	0	0	0	1	0
12	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
13	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	1
14	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1

Главным фактором, влияющим на пластичность металлов в условиях холодного деформирования, является схема напряжённого состояния. Зависимость пластичности от параметров, характеризующих схему напряжённого состояния, называют диаграммой пластичности.

Наибольшее распространение получило представление зависимости пластичности от показателя напряжённого состояния, предложенного Г. А. Смирновым-Аляевым [147]:

$$\eta = \frac{3 \cdot \sigma_0}{\sigma_u} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_u}, \quad (2.27)$$

где σ_0 – гидростатическое (среднее) напряжение;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – компоненты тензора главных напряжений;

σ_u – интенсивность напряжений.

Показатель η не учитывает влияния третьего инварианта тензора напряжений, поэтому диаграмму пластичности в координатах " $\varepsilon_u - \eta$ " нельзя считать единой для всех возможных видов напряжённого состояния.

Для объективной оценки деформируемости металлов в различных технологических процессах необходимо располагать «единой» диаграммой пластичности, описывающей их пластичность при разных схемах напряжённого состояния. Испытания металлов на пластичность в камере высокого давления разными методами показали различные результаты, соответствующие одним и тем же значениям показателя напряжённого состояния. В частности В. Л. Колмогоровым [148] установлено, что при растяжении в условиях $\eta = 0$ пластичность выше, чем при кручении. А. А. Богатов и др. показали, что результат испытаний получается разный, при этом какая характеристика больше, зависит от марки металла [149]. В. А. Огородников установил [150], что при кручении, в случае создания в

камере высокого давления условий с равными значениями показателя напряжённого состояния, пластичность будет все же ниже, чем при сжатии.

Для исключения возможных расхождений при оценке деформируемости металлов необходимо, чтобы в исследуемом технологическом процессе и экспериментах по построению диаграмм пластичности соблюдались условия идентичности параметра Надаи-Лодэ, характеризующего вид девиатора напряжений

$$\mu_{\sigma} = 2 \cdot \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1 = \frac{2 \cdot \sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}. \quad (2.28)$$

Зависимость пластичности от схемы напряжённого состояния может быть описана путем построения полной поверхности пластичности в координатах " $\varepsilon_u - \eta - \mu_{\sigma}$ ". Указанная зависимость предложена С. И. Губкиным [151], однако её построение связано с целым рядом трудностей экспериментального характера.

Выбор и обоснование инвариантов напряжённого состояния при решении задач механики материалов рассмотрено в работе А. А. Лебедева, В. М. Михалевича [152].

В работе [150] В. А. Огородниковым предложено строить поверхность пластичности в координатах " $\varepsilon_u - \mu - \chi$ ", где χ – показатель, учитывающий третий инвариант тензора напряжений

$$\chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_{\sigma})}}{\sqrt{3 \cdot I_2(D_{\sigma})}} = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3}}{\sigma_u}. \quad (2.29)$$

Поверхность пластичности, построенную в координатах " $\varepsilon_u - \mu - \chi$ ", можно определить как объёмную диаграмму пластичности. Сечение поверхности плоскостью, перпендикулярной оси $\chi = 0$, приводит к получению диаграммы пластичности в координатах $\varepsilon_u = \varepsilon_u(\eta)$. Для построения диаграмм

пластичности по данной методике необходимо проводить трудоемкие испытания в камере высокого давления. Это исключает возможность испытания пластичных материалов на сжатие, а испытания на растяжение приводят к искажению результатов вследствие появления шейки.

Сиваком И. О. разработана методика построения поверхностей $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ (рис. 2.3) путём простых испытаний на растяжение, сжатие, чистый сдвиг и испытаний на осадку цилиндрических образцов в оболочках разной толщины [153, 154].

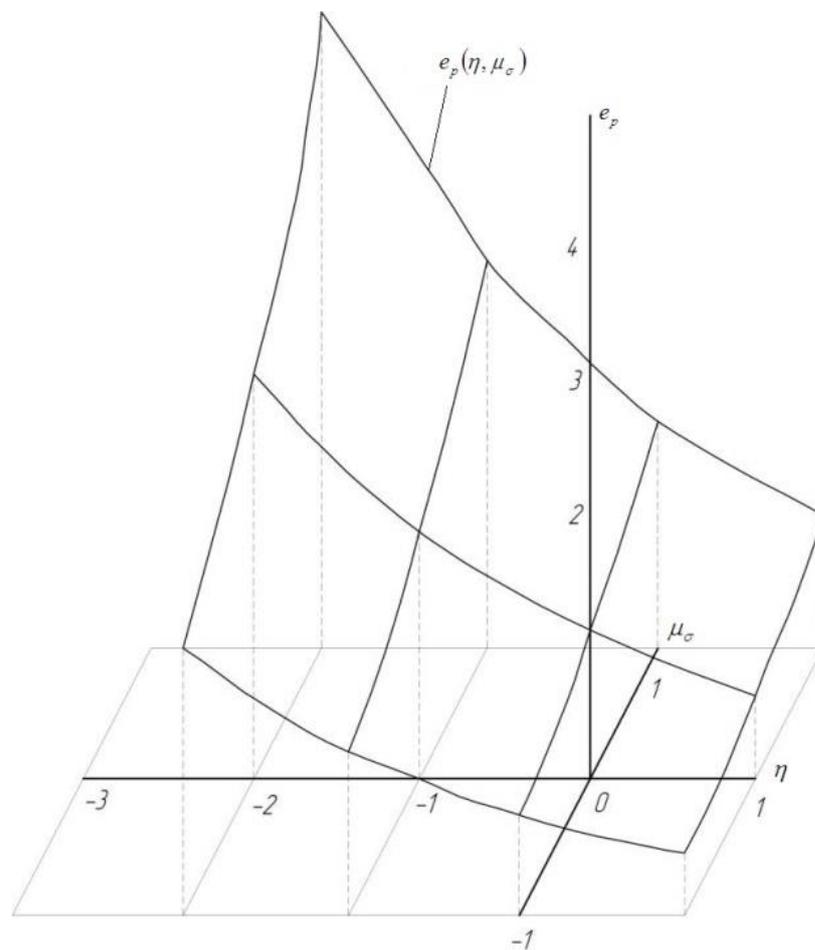


Рисунок 2.3 – Поверхность предельных деформаций

При деформировании, когда показатель напряжённого состояния не остаётся постоянным, пластичность принято оценивать на основе так называемых критериев разрушения. Сущность критериев разрушения

заключается в применении модели накопления повреждённости металла, зависящей от величины накопленной деформации и напряжённого состояния.

Степень повреждённости металла называют использованным ресурсом пластичности (В.А.Огородников), который принято обозначать буквой Ψ . Величину Ψ недеформированного металла принимают равной нулю, а условие разрушения имеет вид $\Psi = 1$.

Используя информацию о НДС материала и обоснованно применив критерии разрушения, можно определить величину использованного и остаточного ресурсов пластичности и прогнозировать качество изделий, производимых методами локального деформирования.

Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния были использованы для оценки значений использованного ресурса пластичности Ψ , который определяли по формуле (2.30).

Главные напряжения определяются из решения характеристического уравнения, которое в общем случае является кубическим.

$$\Psi = \int_0^{e_u} \frac{de_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}, \quad (2.30)$$

где $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ – поверхность граничных деформаций;

$\mu_\sigma = \frac{2 \cdot \sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$ – параметр Надаи-Лоде.

$$\sigma^3 - I_1 \cdot \sigma^2 + I_2 \cdot \sigma - I_3 = 0, \quad (2.31)$$

где σ – искомые главные напряжения;

I_1, I_2, I_3 – первый, второй и третий варианты тензора напряжений.

2.3 Методика проведения экспериментальных исследований

Экспериментальная часть проведенных исследований основывается на физическом моделировании процессов обработки металлов давлением с использованием натуральных экспериментов и экспериментально-аналитического метода делительных сеток.

При выборе оборудования для экспериментальных исследований нужно было учитывать необходимую для процесса холодного комбинированного выдавливания мощность оборудования, достаточного межштампового пространства, возможность регулировки скорости движения деформирующего инструмента.

Экспериментальные исследования были проведены в лабораторных условиях с использованием испытательных машин МС-500 (рис. 2.4, а) и МС-2000 (см. рис. 2.4, б) с усилием 500 и 2000 кН соответственно.



а



б

Рисунок 2.4 - Оборудование для проведения экспериментов (а - гидравлический пресс МС-500 усилием 500 кН; б - гидравлический пресс МС-2000 усилием 2000 кН)

В данной работе экспериментальные исследования были проведены с целью получения данных подтверждающих адекватность выбранных расчетных схем и математических моделей деформирования, а также для получения картины течения материала с целью определения сдвиговых деформаций, логарифмических деформаций и интенсивности деформаций по сечению.

Методика натуральных экспериментов.

Эксперименты были проведены на цилиндрических образцах из материалов С1 и АД31.

Упрочнение материала учитывалось по кривым истинных напряжений, полученных в результате проведения испытаний на сжатие цилиндрических образцов [155 – 157].

Изготовление свинцовых образцов для экспериментов производилось следующим образом. В специально изготовленную оснастку отливались цилиндрические свинцовые образцы. После образцы зачищались и подвергались калибровке давлением в специальном контейнере, при этом обеспечивалась высокая точность наружных размеров, высокое качество поверхностей, параллельность торцевых поверхностей.

Подготовка алюминиевых образцов проводилась следующим образом. От прутка меньшего диаметра, чем необходимый, отрезались заготовки, длины которых были рассчитаны по закону постоянства объемов. Затем заготовки подвергались осадке и калибровке, в специальном контейнере, до необходимых размеров. После чего проводился отжиг алюминиевых образцов для дальнейшей деформации.

Использование специального контейнера обеспечивало высокую точность наружных размеров, высокое качество поверхностей, параллельность торцевых поверхностей.

Отжиг для разупрочнения АД31, проводят при 350 – 430°С с выдержкой 1 час. При этих температурах происходит полный распад пересыщенного твердого раствора и коагуляция упрочняющих фаз.

Охлаждение происходит на воздухе. После отжига сплав имеет низкие значения временного сопротивления, удовлетворительную пластичность и высокую сопротивляемость коррозии под напряжением. Отожженный АД31 способен выдержать холодную обработку давлением с высокими степенями деформации. График режима отжига представлен на рис. 2.5.

После ТО для очистки поверхности применяется механический метод обработки – галтовочный барабан. Заготовки для очистки от окалины, загрязнений, а также для удаления заусенца, подвергаются галтовке с сырыми опилками, слегка смоченными бензином и абразивной крошкой. Галтовка производится дважды с заменой опилок, продолжительность галтовки 7 ... 10 минут. Затем заготовки выгружают на вибрационное сито и промывают в бензине. Далее осуществляется нанесение подмазочного слоя. Схема технологического процесса подготовки подмазочного слоя на заготовках приведена в таблице 2.5.

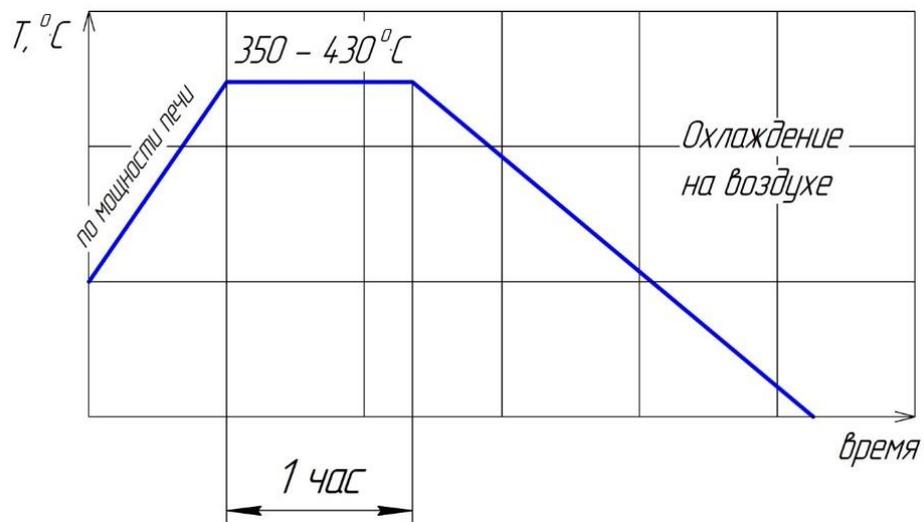


Рисунок 2.5 – График термической обработки алюминиевых образцов

При холодном выдавливании смазка должна обладать следующими свойствами: способностью уменьшать силы молекулярного притяжения между обрабатываемым материалом и инструментом; высокой пластичностью; высокой термостойкостью.

В качестве смазки для выдавливания применяется технический жир. Смазка наносится на подготовленный подсмазочный слой окунанием заготовок в ванну со смазкой. Окончательное удаление смазки осуществляется химическим обезжириванием и сушкой отштампованных деталей (табл. 2.5).

Регистрация показаний проводилась по шкале усилий на испытательной машине и при помощи АЦП. Регистрация хода проводилась по линейке прессы и с помощью ходографа.

Для проведения экспериментов была разработана конструкция универсального штампа (рис. 2.6) для комбинированного трёхстороннего выдавливания, а также был изготовлен набор оснастки, состоящий из матриц, пуансонов, колец, противопуансонов необходимых геометрических размеров (рис. 2.7).

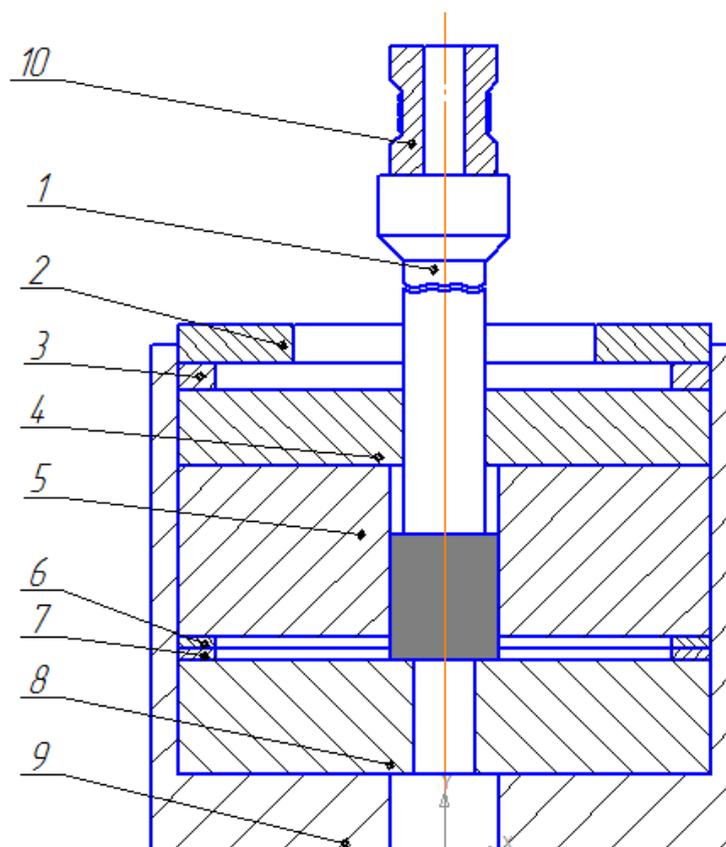


Рисунок 2.6 – Схема универсального штампа: 1 – пуансон, 2 – крышка, 3 – кольцо, 4 – центрирующее кольцо, 5 – верхняя матрица, 6,7 – полукольца, 8 – нижняя матрица, 9 – контейнер, 10 - месдоза



Рисунок 2.7 – Оснастка, используемая для экспериментов

Для учета упрочнения материалов АД31 использовались кривые истинных напряжений, построенных по результатам механических испытаний на сжатие цилиндрических образцов (рис. 2.8).

Аппроксимация кривых упрочнения, приведенных на рис. 2.8 производилась степенным уравнением $\sigma_s = Ce^n$. Значения сопротивлений течению при определенных степенях деформации приведены в таблице 2.6.

Степенное выражение, полученное для АД31: $\sigma_s = 191,51 \cdot e^{0,2029} \text{МПа}$; для АД1: $\sigma_s = 138,42 \cdot e^{0,2182} \text{МПа}$; для С1: $\sigma_s = 25.558 \cdot e^{0,1890} \text{МПа}$.

Для исследования силового режима процесса выдавливания в качестве датчиков усилия использовались тензометрические месдозы. Месдозы (рис. 2.9) изготавливались из стали Х12М с последующей закалкой HRC 56...60, и наклейкой тензорезисторов и подключением по мостовой схеме. Месдозы тарировались по шкале испытательной машины, показания которой предварительно были проверены образцовым динамометром сжатия. Для каждой месдозы строился тарировочный график взаимосвязи между показаниями регистрирующего прибора и усилием.

Таблица 2.5 – Схема подготовки подсмазочного слоя

Операция	Компоненты	Массовая концентрация, г/л	Режим обработки	
			Темпера- тура, °С	Время обработк и, мин
Обезжиривание химическое	Тринатрийфо- сфат	50-60	80-100	0,083-0,1
	(ГОСТ 201-76) Жидкое стекло	5-10	-	-
Промывка в горячей проточной воде	Вода	-	80-100	0,2-0,3
Промывка в холодной проточной воде	Вода	-	-	0,2-0,3
Анодирование	Серная кислота	180-200	20-25	15-25
Промывка в холодной проточной воде	Вода	-	-	0,2-0,3
Обработка в растворе хромпика	Хромпик калиевый технический	100-120	80-100	15-20
Промывка в холодной проточной воде	Вода	-	-	0,2-0,3
Промывка в горячей проточной воде	Вода	-	60-100	0,2-0,3
Сушка	-	-	80-120	15-20

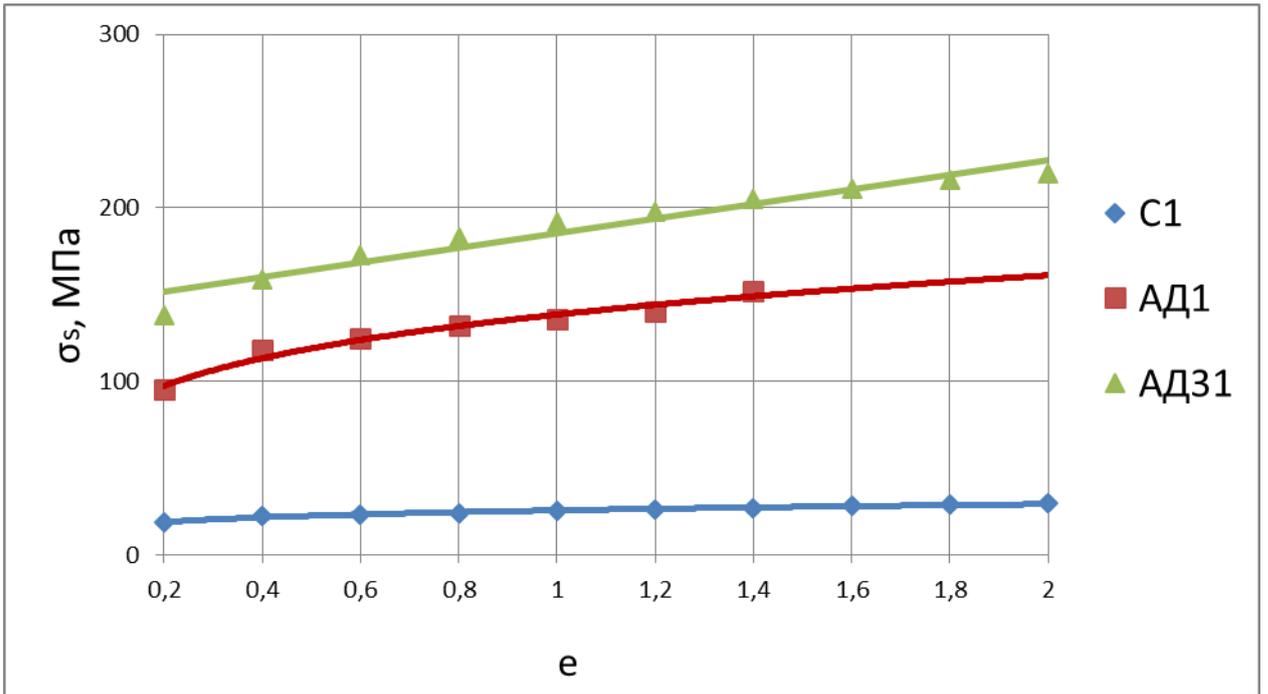


Рисунок 2.8 - Кривые упрочнения для используемых материалов

Таблица 2.6 - Значения сопротивлений течению

e	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
АД1	95	118	125	132	136	140	152	162	169	177
АД31	138	159	173	183	192	198	205	211	216	220
С1	19	22	23	24	25	26	27	28	29	30

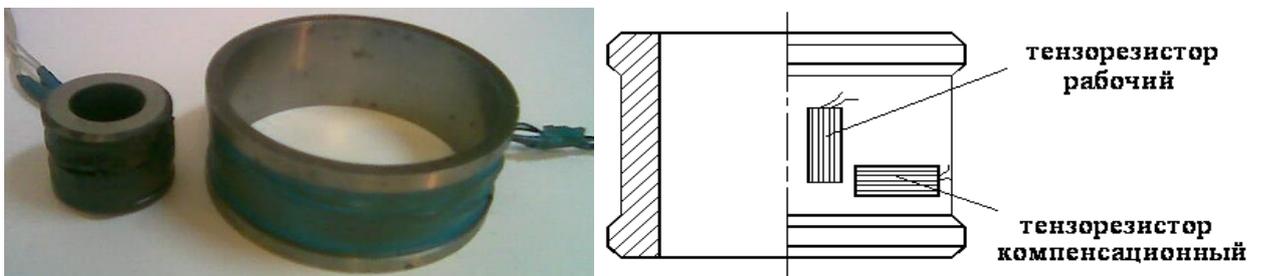


Рисунок 2.9 – Тензометрические месдозы

Регистрация перемещений производилась при помощи ходографа балочного типа (рис. 2.10).

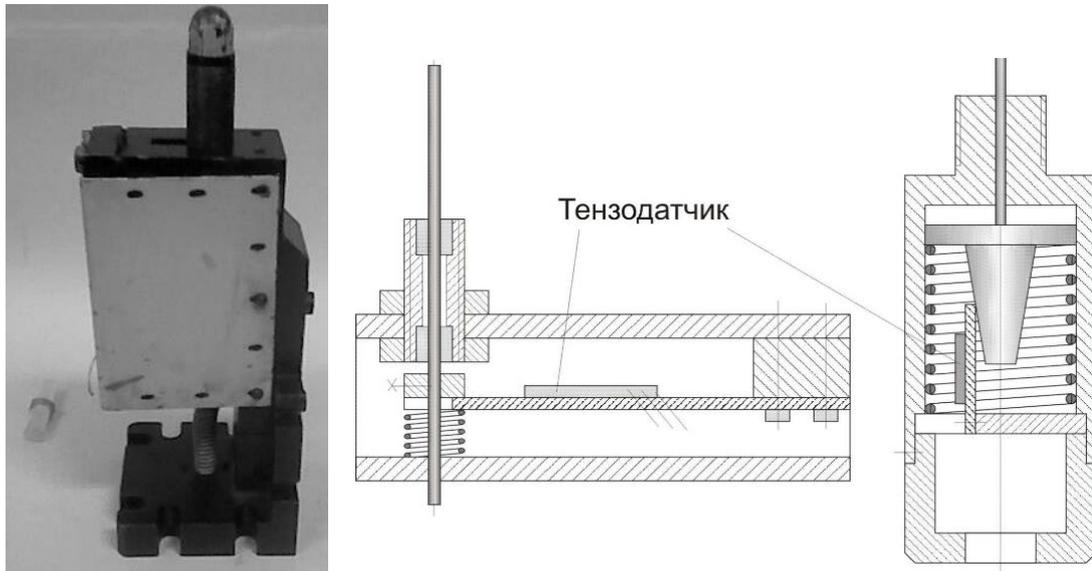


Рисунок 2.10 - Ходограф балочного типа и схема его устройства

Для регистрации показаний датчиков использовались комплект тензометрической аппаратуры, в который входили: 32-х канальный аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) L-Card E-440 (рис. 2.11) и ПК с пакетом программного обеспечения L-Graph.

Питание тензорезисторов производилось от аккумулятора напряжением 6,5 В. Для исключения помех при регистрации сигнала, поступающего от тензодатчиков, от близлежащих электроприборов проводилось заземление АЦП и корпуса ПК. Схемы подключения тензорезисторов к АЦП и тензоаппаратуры к ПК приведены на рис. 2.12.

Общий вид экспериментальной установки с тензометрической аппаратурой на базе АЦП L-Card E-440 приведен на рис. 2.13.

В штампе используются сменные матрицы с наружным диаметром $D_m=110$ мм. Внутренний диаметр матриц 28,2 и 15,7 мм. Применялась пуансон и противоположный пуансон $d=21,2$ мм, без радиуса закругления. Все матрицы и пуансоны изготовлены из стали X12M ГОСТ 5950–73 с закалкой в масле и отпуском до HRC 56...60, рабочая поверхность шлифовалась до $R_a 0,4$.



Рисунок 2.11 - Аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) L-Card E-440

Для оценки точности результатов экспериментальных исследований (силовых параметров) использовались методы математической статистики.

Был принят нормальный закон распределения ошибок.

Методика определения напряженно-деформируемого состояния.

Для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) в данной работе использован метод координатных делительных сеток [132, 156 – 160]. За исходные и конечные направления главных осей принимаются направления, с которыми в плоскости нанесения сетки совпадают материальные волокна, получившие наибольшую и наименьшую степень деформации. Делается допущение, что направления главных осей совпадают с направлениями одних и тех же материальных волокон только на данном этапе. Путь деформирования представляется ломаной линией.

Расчет параметров напряженно-деформированного состояния производился с использованием ЭВМ.

Для расчетной оценки деформируемости, заготовки с делительной сеткой, накатанной на боковую поверхность, подвергали трехстороннему выдавливанию в штампе со сменными вставками, имеющими те же величины геометрических параметров, что и при исследовании методом планирования.

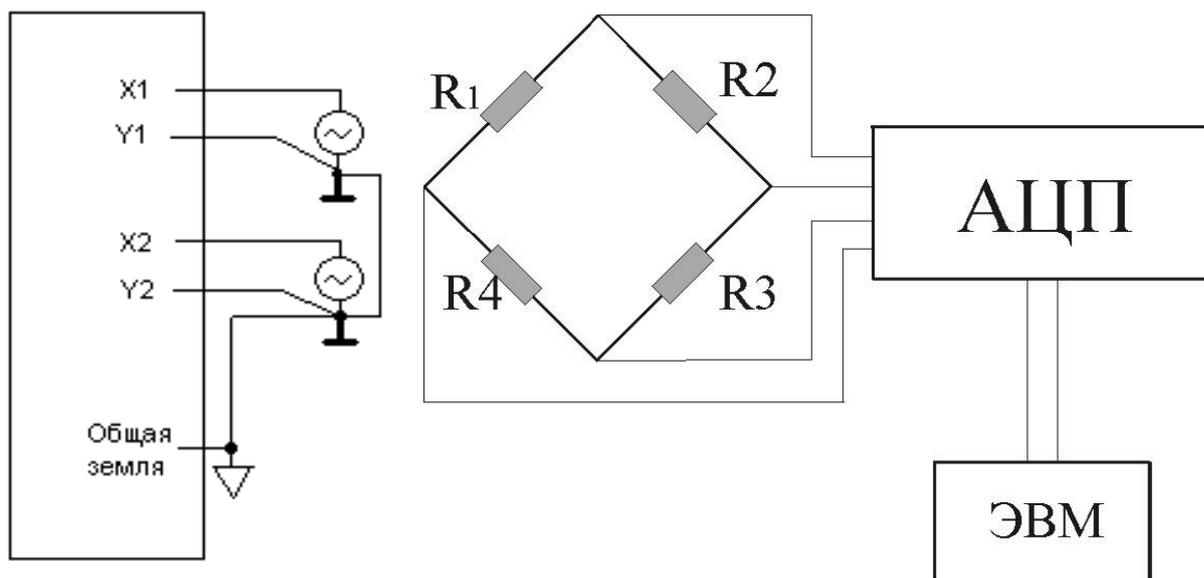


Рисунок 2.12 - Схемы подключения тензорезисторов к АЦП и тензометрической аппаратуры к ПК



Рисунок 2.13 - Схема подключения тензорезисторов АЦП и тензометрической аппаратуры к ПК

Выводы по разделу

1. Схемы комбинированного трехстороннего выдавливания деталей с фланцем и отростком являются перспективными для осуществления процессов штамповки деталей сложной формы. Исследование данных схем деформирования является актуальным.

2. Обоснован выбор энергетического метода баланса мощностей и МКЭ в качестве методов теоретических исследований процесса комбинированного трехстороннего выдавливания, а методов физического моделирования и координатных сеток в качестве методов экспериментальных исследований.

3. Использование в энергетическом методе баланса мощностей кинематических модулей позволит оперативно реагировать на все изменения в расчётной схеме, связанные, как с учётом изменившейся конфигурации детали, так и с учетом изменения поверхности раздела течения металла на различных стадиях процесса деформирования.

4. Метод конечных элементов может позволить провести с помощью компьютерных моделей имитационный математический эксперимент и, в частности, за счет использования специализированных программных пакетов прогнозировать характер формоизменения деталей сложных конфигураций в условиях больших и неоднозначных пластических течений, характерных для процессов комбинированного трехстороннего выдавливания.

5. Разработана универсальная штамповая оснастка, которая позволит в лабораторных условиях провести физический эксперимент с варьированием геометрических параметров. Применение современных автоматизированных устройств позволит точно регистрировать полученные данные.

6. Для экспериментального исследования деформированного состояния заготовок при комбинированном трехстороннем выдавливании выбран метод сеток, позволяющий изучить закономерности формирования зон пластического течения и распределения степени деформации в заготовке.

РАЗДЕЛ 3

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ФЛАНЦЕМ

3.1 Моделирование силового режима процесса комбинированного трехстороннего выдавливания энергетическим методом с прямолинейными блоками

Для анализа силового режима деформирования при комбинированном трехстороннем выдавливании используем энергетический метод [161-163]. Объем металла, который деформируется, условно разбиваем на ряд кинематически-элементарных зон (рис. 3.1). Принимаем, что деформированный материал жестко-пластический и неупрочняемый ($\sigma_i = \sigma_s$).

При комбинированном трехстороннем выдавливании наблюдается наличие двух очагов деформации с жесткой зоной между ними, которая уравнивается показателем, зависящим от геометрических параметров и степени деформации λ [135]. Верхний очаг деформации, сформированный обратным течением материала, а нижний очаг деформации радиально-прямого течения [44]. Особенностью радиально-прямого выдавливания является наличие границы разделения течения материала в двух направлениях, которая описывается варьируемым параметром - радиусом R_k .

Расчет ведем для каждого очага отдельно в конце приводя к общему уравнению баланса мощностей. Для верхнего очага деформации зону 5 принимаем жесткой, а для нижнего очага деформации – как входную зону со скоростью перемещения - W_0 . Согласно методике, приведенной в разделе 2, устанавливаем граничные условия для всех элементарных зон.

Кинематические граничные условий (КГУ) для зон в очагах деформации представлены в табл. 3.1. Кинематически возможные поля скоростей (КВПС) для осесимметричной задачи в общем виде имеют вид (2.1), постоянные C_1, C_2, C_3 находятся из условленных КГУ.

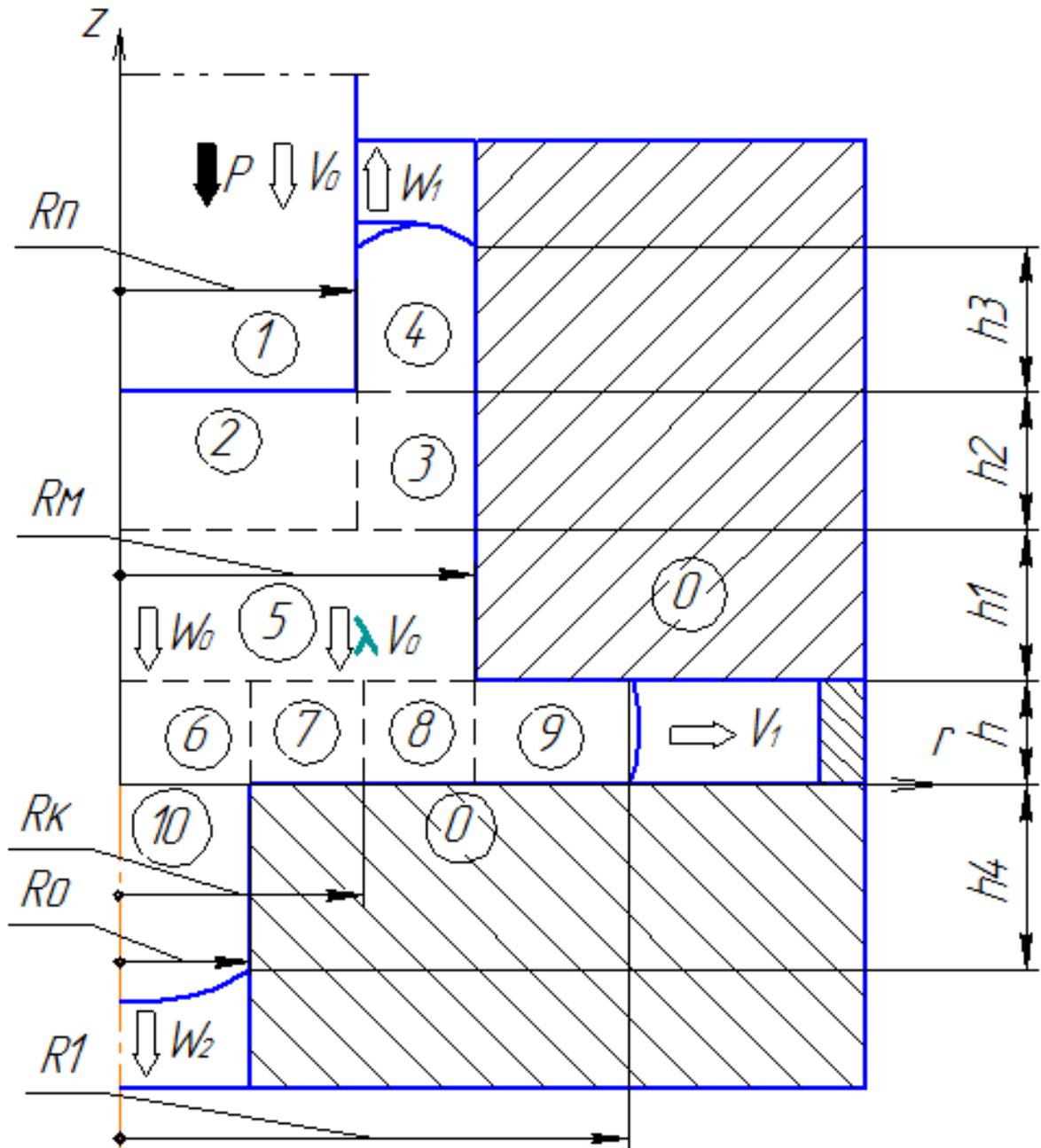


Рисунок 3.1 – Расчетная схема комбинированного трехстороннего выдавливания

Таблица 3.1 – КГУ для очагов деформации

Зона	Координата	Скорость
2	$z = h + h_1$	$v_z = 0$
	$z = h + h_1 + h_2$	$v_z = -V_0$
	$r = R_n$	$v_r = \frac{V_0 \cdot R_n}{2h_2}$
3	$z = h + h_1$	$v_z = 0$
	$z = h + h_1 + h_2$	$v_z = W_1 = \frac{-R_n^2 \cdot V_0}{(R_M^2 - R_n^2)}$
	$r = R_n$	$v_r = \frac{V_0 \cdot R_n}{2h_2}$
	$r = R_M$	$v_r = 0$
6	$z = h$	$v_z = -W_0$
	$z = 0$	$v_z = -W_2 = -\frac{W_0 \cdot R_K^2}{R_0^2}$
	$r = R_0$	$v_r = -\frac{W_0 \cdot (R_K^2 - R_0^2)}{2 \cdot R_0 \cdot h}$
7	$z = h$	$v_z = -W_0$
	$r = R_0$	$v_r = -\frac{W_0 \cdot (R_K^2 - R_0^2)}{2 \cdot R_0 \cdot h}$
	$r = R_K$	$v_r = 0$
8	$z = h$	$v_z = -W_0$
	$r = R_K$	$v_r = 0$
	$r = R_M$	$v_r = -\frac{W_0 \cdot (R_M^2 - R_K^2)}{2 \cdot R_M \cdot h}$
9	$z = h$	$v_z = 0$
	$r = R_M$	$v_r = \frac{W_0 \cdot (R_M^2 - R_K^2)}{2 \cdot R_M \cdot h}$
	$r = R_1$	$v_r = V_1 = \frac{W_0 \cdot (R_M^2 - R_K^2)}{2 \cdot R_1 \cdot h}$

Полученные КВПС для данной схемы представлены в табл. 3.2.

Для расчета компонентов скоростей и интенсивности скоростей деформаций используем уравнение (2.4). Тогда для зон 2, 3, 6, 7, 8, 9 значения компонентов и интенсивности скоростей деформаций имеют вид, представленный в табл. 3.3 – 3.4.

Значение давления деформирования p определяем из уравнения баланса мощностей внешних и внутренних сил на кинематически возможных скоростях перемещений (2.2) Которые в данном случае приобретают вид (3.1) для верхнего очага деформации и (3.2) для нижнего очага:

$$N_a = N_{\partial 2} + N_{\partial 3} + N_{c2-3} + N_{c2-5} + N_{c3-4} + N_{m3-0} + N_{m1-4} + N_{m1-2} + N_{m4-0} \quad (3.1)$$

$$N_a = N_{\partial 6} + N_{\partial 7} + N_{\partial 8} + N_{\partial 9} + N_{c5-6} + N_{c6-10} + N_{c5-8} + N_{c6-7} + N_{c7-8} + N_{c8-9} + N_{m10-0} + N_{m7-0} + N_{m8-0} + N_{m9-0} \quad (3.2)$$

где N_a – мощность активных сил;

$N_{\partial i}$ – мощность сил деформирования;

N_{ci} – мощность сил среза;

N_{mi} – мощность сил трения.

Таблица 3.2 – КВПС для очага деформации

Зона	v_z	v_r
2	$-\frac{V_0}{h_2} \cdot z + \frac{V_0 \cdot (h_1 + h)}{h_2}$	$\frac{V_0}{2 \cdot h_2} \cdot r$
3	$\frac{V_0}{h_2} \cdot \frac{R_n^2}{(R_M^2 - R_n^2)} \cdot (z - h_1 + h)$	$\frac{V_0}{2 \cdot h_2} \cdot \frac{R_n^2}{(R_M^2 - R_n^2)} \cdot \left(\frac{R_M^2}{r} - r \right)$
6	$-\frac{W_0}{h} \cdot z + \frac{W_0 \cdot (R_K^2 - R_0^2)}{R_0^2 \cdot h} \cdot z - W_0$	$\frac{W_0}{2 \cdot h} \cdot r - \frac{W_0 \cdot (R_K^2 - R_0^2)}{2 \cdot R_0^2 \cdot h} \cdot r$
7	$-\frac{W_0}{h} \cdot z$	$\frac{W_0}{2 \cdot h} \cdot r - \frac{W_0 \cdot R_K^2}{2 \cdot h \cdot r}$
8	$-\frac{W_0}{h} \cdot z$	$\frac{W_0}{2 \cdot h} \cdot r - \frac{W_0 \cdot R_K^2}{2 \cdot h \cdot r}$
9	0	$-\frac{W_0 \cdot (R_M^2 - R_K^2)}{2 \cdot h \cdot r}$

Таблица 3.3 – Значения компонентов скоростей деформации

Зона	$\dot{\varepsilon}_z$	$\dot{\varepsilon}_r$	$\dot{\varepsilon}_\theta$
2	$-\frac{V_0}{h_2}$	$\frac{V_0}{2 \cdot h_2}$	$\frac{V_0}{2 \cdot h_2}$
3	$\frac{V_0 \cdot R_n^2}{h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2)}$	$-\frac{V_0 \cdot R_n^2}{2 \cdot h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2)} - \frac{V_0 \cdot R_n^2 \cdot R_M^2}{2 \cdot h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2) \cdot r^2}$	$-\frac{V_0 \cdot R_n^2}{2 \cdot h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2)} + \frac{V_0 \cdot R_n^2 \cdot R_M^2}{2 \cdot h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2) \cdot r^2}$
6	$-\frac{W_0}{h} + \frac{W_0 \cdot (R_K^2 - R_0^2)}{R_0^2 \cdot h}$	$\frac{W_0}{2 \cdot h} - \frac{W_0 \cdot (R_K^2 - R_0^2)}{2 \cdot R_0^2 \cdot h}$	$\frac{W_0}{2 \cdot h} - \frac{W_0 \cdot (R_K^2 - R_0^2)}{2 \cdot R_0^2 \cdot h}$
7, 8	$-\frac{W_0}{h}$	$\frac{W_0}{2 \cdot h} + \frac{W_0 \cdot R_K^2}{2 \cdot h \cdot r^2}$	$\frac{W_0}{2 \cdot h} - \frac{W_0 \cdot R_K^2}{2 \cdot h \cdot r^2}$
9	0	$\frac{W_0 \cdot (R_M^2 - R_K^2)}{2 \cdot h \cdot r^2}$	$-\frac{W_0 \cdot (R_M^2 - R_K^2)}{2 \cdot h \cdot r^2}$

Таблица 3.4 – Значения интенсивности скоростей деформаций

Зона	$\dot{\varepsilon}_i$
2	$\frac{V_0}{h_2}$
3	$-\frac{V_0 \cdot R_n^2}{2 \cdot h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2)} - \frac{V_0 \cdot R_n^2 \cdot R_M^2}{2 \cdot h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2) \cdot r^2}$
6	$-\frac{W_0}{h} + \frac{W_0 \cdot (R_K^2 - R_0^2)}{R_0^2 \cdot h}$
7, 8	$\frac{W_0}{2 \cdot h} + \frac{W_0 \cdot R_K^2}{2 \cdot h \cdot r^2}$
9	$\frac{W_0 \cdot (R_M^2 - R_K^2)}{2 \cdot h \cdot r^2}$

Согласно формулам (2.4, 2.8, 2.9) определены значения мощностей деформирования.

Мощность активных сил деформирования для очага деформации сформированного обратным выдавливанием:

$$N_a = p_1 \cdot [V_0 \cdot \pi \cdot R_n^2]$$

Мощность сил деформирования по зонам:

$$N_{\partial 2} = \int_{h+h_1}^{h+h_1+h_2} \int_0^{R_n} \int_0^{2\pi} \sigma_s \cdot \frac{V_0}{h_2} \cdot r \cdot d\theta dz dr = \sigma_s \cdot V_0 \cdot \pi \cdot R_n^2;$$

$$N_{\partial 3} = \int_{h_1}^{h+h_1+h_2} \int_{R_n}^{R_M} \int_0^{2\pi} \left(\frac{V_0 \cdot R_n^2}{2 \cdot h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2)} + \frac{V_0 \cdot R_n^2 \cdot h_1 \cdot R_M^2}{2 \cdot h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2) \cdot r^2} \right) \cdot \sigma_s \cdot r \cdot d\theta dz dr =$$

$$= \sigma_s \cdot V_0 \cdot \pi \cdot R_n^2 \cdot \left(-\frac{h+h_2}{2 \cdot h_2} - \frac{R_M^2}{(R_M^2 - R_n^2)} \cdot \frac{h+h_2}{h_2} \cdot \ln \left| \frac{R_M}{R_n} \right| \right).$$

Мощность сил среза по зонам:

$$N_{c2-3} = \int_{h+h_1}^{h+h_1+h_2} \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot \left(\frac{V_0 \cdot h_1}{h_2} - \frac{V_0 \cdot z}{h_2} \right) \cdot r \cdot dz d\theta =$$

$$= \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot V_0 \cdot \pi \cdot R_n^2 \times \left(\frac{h_1}{R_n} - \frac{(h_1 + h_2)^2 - h_1^2}{2 \cdot h_2 \cdot R_n} \right);$$

$$N_{c2-5} = \int_0^{R_n} \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot \frac{V_0 \cdot r}{2 \cdot h_2} \cdot r \cdot dr d\theta = \sigma_s \cdot V_0 \cdot \pi \cdot R_n^2 \cdot \frac{R_n}{\sqrt{3} \cdot 3 \cdot h_2};$$

$$N_{c3-4} = N_{c3-5} = 2 \cdot \int_{R_n}^{R_M} \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot \left(\frac{V_0}{2 \cdot h_2} \cdot \frac{R_n^2}{(R_M^2 - R_n^2)} \cdot \left(\frac{R_M^2}{r} - r \right) \right) \cdot r \cdot d\theta dr =$$

$$= \sigma_s \cdot V_0 \cdot \pi \cdot R_n^2 \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(-\frac{(R_M^3 - R_n^3)}{3 \cdot h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2)} + \frac{R_M^2 \cdot (R_M - R_n)}{h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2)} \right).$$

Мощность сил трения по границам:

$$\begin{aligned}
N_{m3-0} &= \int_{h_1}^{h+h_1+h_2} \int_0^{2\pi} \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot \left(\frac{V_0}{h_2} \cdot \frac{R_n^2}{(R_M^2 - R_n^2)} \cdot (z - h_1 + h) \right) \cdot r \cdot d\theta dz = \\
&= \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot V_0 \cdot \pi \cdot R_n^2 \cdot \left[\frac{h_1 \cdot R_M}{(R_M^2 - R_n^2)} - \frac{R_M \cdot [(h_1 + h_2)^2 - h_1^2]}{2 \cdot h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2)} \right]; \\
N_{m1-4} &= \int_{h+h_1+h_2}^{h+h_1+h_2+h_3} \int_0^{2\pi} \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot V_1 \cdot r \cdot d\theta dz = \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot V_0 \cdot \pi \cdot R_n^2 \cdot \frac{R_n \cdot h_3}{(R_M^2 - R_n^2)}; \\
N_{m1-2} &= \int_0^{R_n} \int_0^{2\pi} \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot V_0 \cdot r \cdot d\theta dz = \sigma_s \cdot V_0 \cdot \pi \cdot R_n^2 \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s; \\
N_{m4-0} &= \int_{h+h_1+h_2}^{h+h_1+h_2+h_3} \int_0^{2\pi} \mu_s \cdot \sigma_s \cdot V_1 \cdot r \cdot d\theta dz = \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot V_0 \cdot \pi \cdot R_n^2 \cdot \frac{R_M \cdot h_3}{(R_M^2 - R_n^2)}.
\end{aligned}$$

Мощность активных сил деформирования для очага деформации сформированного радиально-прямым выдавливанием:

$$N_a = p_2 \cdot W_0 \cdot \pi \cdot R_M^2.$$

Мощность сил деформирования по границам:

$$\begin{aligned}
N_{\partial 6} &= \int_0^h \int_0^{R_0} \int_0^{2\pi} \sigma_s \cdot \left(\frac{W_0 \cdot (R_K^2 - R_0^2)}{R_0^2 \cdot h} - \frac{W_0}{h} \right) \cdot r \cdot d\theta dz dr = \frac{R_K^2 - R_0^2}{R_M^2} \cdot \sigma_s \cdot W_0 \cdot \pi \cdot R_M^2; \\
N_{\partial 7} &= \int_0^h \int_{R_0}^{R_K} \int_0^{2\pi} \sigma_s \cdot \left(\frac{W_0}{2 \cdot h} + \frac{W_0 \cdot R_K^2}{2 \cdot h \cdot r^2} \right) \cdot r \cdot d\theta dr dz = \\
&= \left(\frac{(R_K^2 - R_0^2)}{2 \cdot R_M^2} + \frac{R_K^2}{R_M^2} \cdot \ln \left| \frac{R_K}{R_0} \right| \right) \cdot \sigma_s \cdot W_0 \cdot \pi \cdot R_M^2; \\
N_{\partial 8} &= \int_0^h \int_{R_K}^{R_M} \int_0^{2\pi} \sigma_s \cdot \left(\frac{W_0}{2 \cdot h} + \frac{W_0 \cdot R_K^2}{2 \cdot h \cdot r^2} \right) \cdot r \cdot d\theta dr dz = \\
&= \left(\frac{(R_M^2 - R_K^2)}{2 \cdot R_M^2} + \frac{R_K^2}{R_M^2} \cdot \ln \left| \frac{R_M}{R_K} \right| \right) \cdot \sigma_s \cdot W_0 \cdot \pi \cdot R_M^2;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_{\partial 9} &= \int_0^h \int_{R_M}^{R_1} \int_0^{2\pi} \sigma_s \cdot \frac{W_0 \cdot (R_M^2 - R_K^2)}{2 \cdot h \cdot r^2} \cdot r \cdot d\theta dz dr = \\
&= \ln \left| \frac{R_1}{R_M} \right| \cdot \sigma_s \cdot W_0 \cdot \pi \cdot \frac{(R_M^2 - R_K^2)}{R_M^2}.
\end{aligned}$$

Мощность сил среза по границам:

$$\begin{aligned}
N_{c5-6} = N_{c6-10} &= 2 \cdot \int_0^{R_0} \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot \left(\frac{W_0}{2 \cdot h} \cdot r - \frac{W_0 \cdot (R_K^2 - R_0^2)}{2 \cdot R_0^2 \cdot h} \cdot r \right) \cdot r \cdot d\theta dr = \\
&= \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot W_0 \cdot \pi \cdot R_M^2 \times \left(\frac{R_0^3}{3 \cdot h \cdot R_M^2} - \frac{R_0 \cdot (R_K^2 - R_0^2)}{R_M^2 \cdot h} \right);
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_{c5-8} &= \int_{R_K}^{R_M} \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot \left(\frac{W_0}{2 \cdot h} \cdot r - \frac{W_0 \cdot R_K^2}{2 \cdot h \cdot r} \cdot r \right) \cdot r \cdot d\theta dr = \\
&= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot W_0 \cdot \pi \cdot R_M^2 \times \left(\frac{(R_M^3 - R_K^3)}{3 \cdot h \cdot R_M^2} - \frac{R_K^2 \cdot (R_M - R_K)}{R_M^2 \cdot h} \right);
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_{c6-7} &= \int_0^h \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot \left(\frac{W_0 \cdot (R_K^2 - R_0^2)}{R_0^2 \cdot h} - \frac{W_0}{h} \cdot z - W_0 \right) \cdot r \cdot d\theta dz = \\
&= \sigma_s \cdot W_0 \cdot \pi \cdot R_M^2 \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{(R_K^2 - R_0^2) \cdot h}{R_0 \cdot R_M^2} - \frac{3 \cdot R_0 \cdot h}{2 \cdot R_M^2} \right);
\end{aligned}$$

$$N_{c7-8} = \int_0^h \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot \left(-\frac{W_0}{h} \cdot z \right) \cdot r \cdot d\theta dz = \sigma_s \cdot W_0 \cdot \pi \cdot R_M^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(-\frac{R_K \cdot h}{R_M^2} \right);$$

$$N_{c8-9} = \int_0^h \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot \left(-\frac{W_0}{h} \cdot z \right) \cdot r \cdot d\theta dz = \sigma_s \cdot W_0 \cdot \pi \cdot R_M^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{h}{R_M} \right).$$

Мощность сил трения по границам:

$$N_{m10-0} = \int_{-h_4}^0 \int_0^{2\pi} \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot W_2 \cdot r \cdot d\theta dr = \sigma_s \cdot \lambda \cdot V_0 \cdot \pi \cdot R_M^2 \cdot \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{h_4}{R_0};$$

$$\begin{aligned}
N_{m7-0} &= \int_{R_0}^{R_K} \int_0^{2\pi} \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot \left(\frac{W_0}{2 \cdot h} \cdot r - \frac{W_0 \cdot R_K^2}{2 \cdot h \cdot r} \right) \cdot r \cdot d\theta dr = \\
&= \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot W_0 \cdot \pi \cdot R_M^2 \cdot \left(\frac{(R_K^3 - R_M^3)}{3 \cdot h \cdot R_M^2} - \frac{R_K^2 \cdot (R_K - R_0)}{R_M^2 \cdot h} \right);
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_{m8-0} &= \int_{R_k}^{R_M} \int_0^{2\pi} \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot \left(\frac{W_0}{2 \cdot h} \cdot r - \frac{W_0 \cdot R_k^2}{2 \cdot h \cdot r} \right) \cdot r \cdot d\theta dr = \\
&= \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot W_0 \cdot \pi \cdot R_M^2 \cdot \left(\frac{(R_M^3 - R_k^3)}{3 \cdot h \cdot R_M^2} - \frac{(R_M - R_k)}{h} \right); \\
N_{m9-0} &= \int_{R_M}^{R_1} \int_0^{2\pi} \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot \left(-\frac{W_0 \cdot (R_M^2 - R_k^2)}{2 \cdot h \cdot r} \right) \cdot r \cdot d\theta dr = \\
&= \sigma_s \cdot W_0 \cdot \pi \cdot R_M^2 \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{(R_1 - R_M)}{h} \cdot \frac{(R_M^2 - R_k^2)}{R_M^2} \right).
\end{aligned}$$

Уравнения баланса для верхнего очага деформации после сокращения на $(\sigma_s \cdot V_0 \cdot \pi \cdot R_n^2)$ имеют вид:

$$\begin{aligned}
\bar{p}_1 &= 1 + \left(-\frac{h+h_2}{2 \cdot h_2} - \frac{R_M^2}{(R_M^2 - R_n^2)} \cdot \frac{h+h_2}{h_2} \cdot \ln \left| \frac{R_M}{R_n} \right| \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{h_1}{R_n} - \frac{(h_1+h_2)^2 - h_1^2}{2 \cdot h_2 \cdot R_n} \right) + \\
&+ \frac{R_n}{3 \cdot \sqrt{3} \cdot h_2} + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(-\frac{(R_M^3 - R_n^3)}{3 \cdot h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2)} + \frac{R_M^2 \cdot (R_M - R_n)}{h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2)} \right) + \\
&+ \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{R_n \cdot h_3}{(R_M^2 - R_n^2)} + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s + \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{R_M \cdot h_3}{(R_M^2 - R_n^2)} + \\
&+ \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \left[\frac{h_1 \cdot R_M}{(R_M^2 - R_n^2)} - \frac{R_M \cdot [(h_1+h_2)^2 - h_1^2]}{2 \cdot h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2)} \right].
\end{aligned}$$

Уравнения баланса для нижнего очага деформации после сокращения на $(\sigma_s \cdot W_0 \cdot \pi \cdot R_M^2)$ имеют вид:

$$\begin{aligned}
\bar{p}_2 &= \left(\frac{(R_k^2 - 2 \cdot R_0^2)}{R_M^2} \right) + \left(\frac{(R_k^2 - R_0^2)}{2 \cdot R_M^2} + \frac{R_k^2}{R_M^2} \cdot \ln \left| \frac{R_k}{R_0} \right| \right) + \left(\frac{(R_M^2 - R_k^2)}{2 \cdot R_M^2} + \frac{R_k^2}{R_M^2} \cdot \ln \left| \frac{R_M}{R_k} \right| \right) + \\
&+ \ln \left| \frac{R_1}{R_M} \right| \cdot \frac{(R_M^2 - R_k^2)}{R_M^2} + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{R_0^3}{3 \cdot h \cdot R_M^2} - \frac{R_0 \cdot (R_k^2 - R_0^2)}{R_M^2 \cdot h} \right) + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{(R_M^3 - R_k^3)}{3 \cdot h \cdot R_M^2} - \frac{R_k^2 \cdot (R_M - R_k)}{R_M^2 \cdot h} \right) + \\
&+ \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(-\frac{R_k \cdot h}{R_M^2} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{(R_k^2 - R_0^2) \cdot h}{R_0^2 \cdot R_M^2} - \frac{3 \cdot R_0 \cdot h}{R_M^2} \right) + \frac{h}{\sqrt{3} \cdot R_M} + \\
&+ \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{h_4}{R_0} + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \left(\frac{(R_k^3 - R_M^3)}{3 \cdot h \cdot R_M^2} - \frac{R_k^2 \cdot (R_k - R_0)}{R_M^2 \cdot h} \right) + \\
&+ \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \left(\frac{(R_M^3 - R_k^3)}{3 \cdot h \cdot R_M^2} - \frac{(R_M - R_k)}{h} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \left(\frac{(R_1 - R_M)}{h} \cdot \frac{(R_M^2 - R_k^2)}{R_M^2} \right).
\end{aligned} \tag{3.3}$$

При комбинированном течении наряду с балансом мощностей должно выполняться условие равновесия мощностей, действующих с двух сторон от плоскости, разделяющей два самостоятельных очага деформации λ определяется как:

$$\lambda = \frac{\bar{q}_1}{\bar{q}_1 + G + \bar{p}_2}.$$

В комбинированном процессе в направлении от жесткой промежуточной зоны в сторону обратного истечения, действует давление \bar{q}_1 , которое определяется как:

$$\bar{q}_1 = \bar{p}_1 \cdot \frac{R_n}{R_m} - \Delta\bar{q}_m,$$

где $\Delta\bar{q}_m$ - величина определяющая изменение давления \bar{q}_1 с учетом трения при переходе и определяется как:

$$\Delta\bar{q}_m = G \cdot \frac{\lambda}{1 - \lambda},$$

где G - коэффициент, учитывающий величину притормаживания течения материала вдоль стенки стакана;

λ - коэффициент, зависящий от геометрических параметров и степени деформации [135].

$$G = \frac{\mu \cdot (2 \cdot h_3 + h_2)}{R_m}. \quad (3.4)$$

Тогда общий вид уравнения энергетического баланса для трёхстороннего комбинированного выдавливания будет иметь вид [147]:

$$\bar{p} = (1 - \lambda) \cdot \bar{p}_1 - G \cdot \frac{R_m}{R_n} \cdot \lambda + \lambda \cdot \bar{p}_2 \cdot \frac{R_m}{R_n}. \quad (3.5)$$

Уравнения баланса для трехстороннего выдавливания имеет вид:

$$\begin{aligned}
\bar{p} = (1-\lambda) \cdot & \left[1 + \left(-\frac{h+h_2}{2 \cdot h_2} - \frac{R_M^2}{(R_M^2 - R_n^2)} \cdot \frac{h+h_2}{h_2} \cdot \ln \left| \frac{R_M}{R_n} \right| \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{h_1}{R_n} - \frac{(h_1+h_2)^2 - h_1^2}{2 \cdot h_2 \cdot R_n} \right) + \right. \\
& + \frac{R_n}{3 \cdot \sqrt{3} \cdot h_2} + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(-\frac{(R_M^3 - R_n^3)}{3 \cdot h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2)} + \frac{R_M^2 \cdot (R_M - R_n)}{h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2)} \right) + \\
& + \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{R_n \cdot h_3}{(R_M^2 - R_n^2)} + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s + \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{R_M \cdot h_3}{(R_M^2 - R_n^2)} + \\
& \left. + \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \left[\frac{h_1 \cdot R_M}{(R_M^2 - R_n^2)} - \frac{R_M \cdot [(h_1+h_2)^2 - h_1^2]}{2 \cdot h_2 \cdot (R_M^2 - R_n^2)} \right] \right] - G \cdot \frac{R_M}{R_n} \cdot \lambda + \\
+ \lambda \cdot \frac{R_M}{R_n} \cdot & \left[\left(\frac{(R_K^2 - 2 \cdot R_0^2)}{R_M^2} \right) + \left(\frac{(R_K^2 - R_0^2)}{2 \cdot R_M^2} + \frac{R_K^2}{R_M^2} \cdot \ln \left| \frac{R_K}{R_0} \right| \right) + \left(\frac{(R_M^2 - R_K^2)}{2 \cdot R_M^2} + \frac{R_K^2}{R_M^2} \cdot \ln \left| \frac{R_M}{R_K} \right| \right) + \right. \\
& + \ln \left| \frac{R_1}{R_M} \right| \cdot \frac{(R_M^2 - R_K^2)}{R_M^2} + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{R_0^3}{3 \cdot h \cdot R_M^2} - \frac{R_0 \cdot (R_K^2 - R_0^2)}{R_M^2 \cdot h} \right) + \\
& + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{(R_M^3 - R_K^3)}{3 \cdot h \cdot R_M^2} - \frac{R_K^2 \cdot (R_M - R_K)}{R_M^2 \cdot h} \right) + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(-\frac{R_K \cdot h}{R_M^2} \right) + \\
& + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{(R_K^2 - R_0^2) \cdot h}{R_0^2 \cdot R_M^2} - \frac{3 \cdot R_0 \cdot h}{R_M^2} \right) + \frac{h}{\sqrt{3} \cdot R_M} + \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{h_4}{R_0} + \\
& + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \left(\frac{(R_K^3 - R_M^3)}{3 \cdot h \cdot R_M^2} - \frac{R_K^2 \cdot (R_K - R_0)}{R_M^2 \cdot h} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \left(\frac{(R_M^3 - R_K^3)}{3 \cdot h \cdot R_M^2} - \frac{(R_M - R_K)}{h} \right) + \\
& \left. + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \left(\frac{(R_1 - R_M)}{h} \cdot \frac{(R_M^2 - R_K^2)}{R_M^2} \right) \right].
\end{aligned}$$

Параметрический вид приведенного давления:

$$\begin{aligned}
\bar{p} = (1-\lambda) \cdot & \left[1 + \left(-\frac{\bar{h} + \bar{h}_2}{2 \cdot \bar{h}_2} - \frac{1}{(1 - \bar{R}_n^2)} \cdot \frac{\bar{h} + \bar{h}_2}{\bar{h}_2} \cdot \ln \left| \frac{1}{\bar{R}_n} \right| \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{\bar{h}_1}{\bar{R}_n} - \frac{(\bar{h}_1 + \bar{h}_2)^2 - \bar{h}_1^2}{2 \cdot \bar{h}_2 \cdot \bar{R}_n} \right) + \right. \\
& + \frac{\bar{R}_n}{3 \cdot \sqrt{3} \cdot \bar{h}_2} + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(-\frac{(1 - \bar{R}_n^3)}{3 \cdot \bar{h}_2 \cdot (1 - \bar{R}_n^2)} + \frac{(1 - \bar{R}_n)}{\bar{h}_2 \cdot (1 - \bar{R}_n^2)} \right) + \\
& + \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{\bar{R}_n \cdot \bar{h}_3}{(1 - \bar{R}_n^2)} + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s + \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{\bar{h}_3}{(1 - \bar{R}_n^2)} + \\
& \left. + \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \left[\frac{\bar{h}_1}{(1 - \bar{R}_n^2)} - \frac{[(\bar{h}_1 + \bar{h}_2)^2 - \bar{h}_1^2]}{2 \cdot \bar{h}_2 \cdot (1 - \bar{R}_n^2)} \right] \right] - G \cdot \frac{R_M}{R_n} \cdot \lambda +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left[\left(\bar{R}_k^2 - 2 \cdot \bar{R}_0^2 \right) + \left(\frac{\left(\bar{R}_k^2 - \bar{R}_0^2 \right)}{2} + \bar{R}_k^2 \cdot \ln \left| \frac{\bar{R}_k}{\bar{R}_0} \right| \right) + \left(\frac{\left(1 - \bar{R}_k^2 \right)}{2} + \bar{R}_k^2 \cdot \ln \left| \frac{1}{\bar{R}_k} \right| \right) + \right. \\
& + \ln \left| \bar{R}_1 \right| \cdot \left(1 - \bar{R}_k^2 \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{\bar{R}_0^3}{3 \cdot \bar{h}} \cdot \bar{R}_M^2 - \frac{\bar{R}_0 \cdot \left(\bar{R}_k^2 - \bar{R}_0^2 \right)}{\bar{h}} \right) + \\
& + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{\left(1 - \bar{R}_k^3 \right)}{3 \cdot \bar{h}} - \frac{\bar{R}_k^2 \cdot \left(1 - \bar{R}_k \right)}{\bar{h}} \right) + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(-\bar{R}_k \cdot \bar{h} \right) + \\
& + \lambda \cdot \frac{R_M}{R_n} \cdot \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{\left(\bar{R}_k^2 - \bar{R}_0^2 \right) \cdot \bar{h}}{\bar{R}_0^2} - 3 \cdot \bar{R}_0 \cdot \bar{h} \right) + \frac{\bar{h}}{\sqrt{3}} + \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{\bar{h}_4}{\bar{R}_0} + \right. \\
& + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \left(\frac{\left(\bar{R}_k^3 - 1 \right)}{3 \cdot \bar{h}} - \frac{\bar{R}_k^2 \cdot \left(\bar{R}_k - \bar{R}_0 \right)}{\bar{h}} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \left(\frac{\left(1 - \bar{R}_k^3 \right)}{3 \cdot \bar{h}} - \frac{\left(1 - \bar{R}_k \right)}{\bar{h}} \right) + \\
& \left. + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \left(\frac{\left(\bar{R}_1 - 1 \right)}{\bar{h}} \cdot \left(1 - \bar{R}_k^2 \right) \right) \right],
\end{aligned}$$

$$\text{где } \bar{R}_M = \frac{R_M}{R_M} = 1; \quad \bar{R}_k = \frac{R_k}{R_M}; \quad \bar{R}_n = \frac{R_n}{R_M}; \quad \bar{R}_0 = \frac{R_0}{R_M}; \quad \bar{R}_1 = \frac{R_1}{R_M}; \quad \bar{h} = \frac{h}{R_M};$$

$$\bar{h}_1 = \frac{h_1}{R_M}; \quad h_1 = H_3 - h - h_2 - S; \quad H_3 - \text{высота заготовки}; \quad S - \text{ход пуансона}; \quad \bar{h}_2 = \frac{h_2}{R_M};$$

$$h_2 = R_n \cdot \text{tg} 45^\circ; \quad \bar{h}_3 = \frac{h_3}{R_M}; \quad \bar{h}_4 = \frac{h_4}{R_M}.$$

Для схемы установлено оптимальные значения границы разделения течения металла $R_k = R_0 + t \cdot (R_M - R_0)$ с учетом параметра $t \in [R_0; R_M]$, где $t = 0,23$ в нижнем очаге деформации, при котором приведенное давление процесса минимально (рис. 3.2) (приложение А).

По результатам расчетов и с применением оптимального значения критического радиуса были получены графические зависимости энергосиловых параметров трехстороннего комбинированного выдавливания (рис. 3.3).

График зависимости приведенного давления от относительной высоты фланца (рис. 3.3, а) показывает, что при увеличении относительной высоты фланца значения приведенного давления падают. Это связано с тем, что при таких условиях металлу проще заполнять увеличенную полость за счет

уменьшения степени деформации в зоне фланца, уменьшение контактной поверхности трения между фланцем и матрицами (искажение формы фланца, дефект в виде «сапога»).

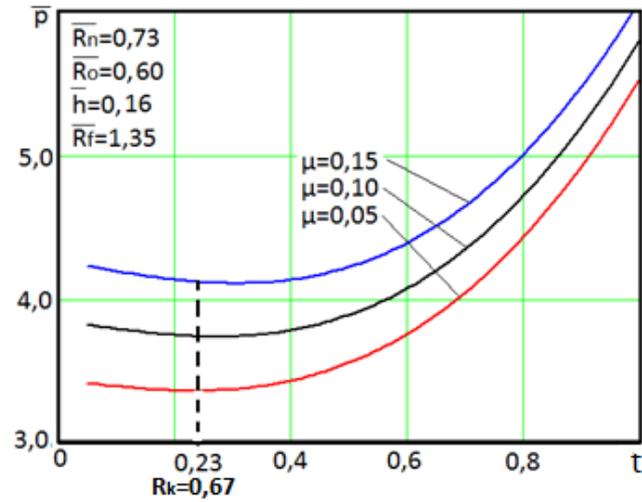
Графики зависимости приведенного давления от относительного радиуса фланца показывают увеличение значений приведенного давления при увеличении относительного радиуса фланца (рис. 3.3, б). Это связано с увеличением окружной степени деформации, растягивающих напряжений и увеличением контактной поверхности трения.

При изменении относительного радиуса пуансона (рис. 3.3, в) значения приведенного давления возрастают. Это объясняется увеличением поверхности трения и увеличением степени деформации в обратном течении материала. Так же, за счет достижения более тонкой стенки стакана, возрастает напряженно-деформированное состояние при обратном течении материала, и происходит более интенсивный сдвиг компонентов.

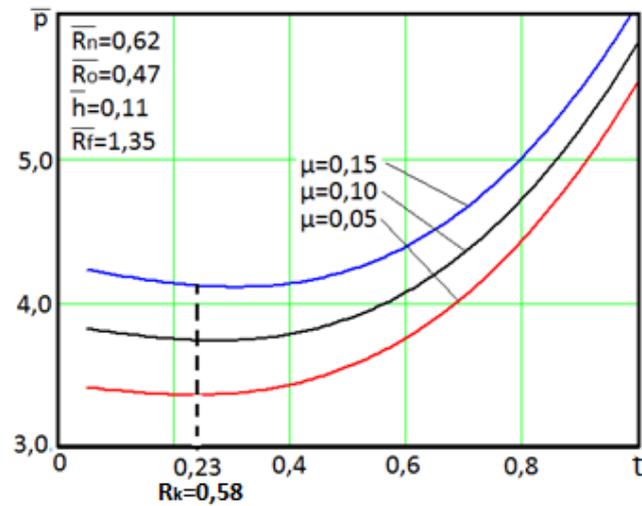
На рис. 3.3, г показан снижающийся характер изменения приведенного давления при разных значениях относительного радиуса отростка. Снижение связано с изменением поверхности среза при прямом выдавливании отростка.

3.2 Моделирование силового режима процесса комбинированного трехстороннего выдавливания энергетическим методом с криволинейными блоками

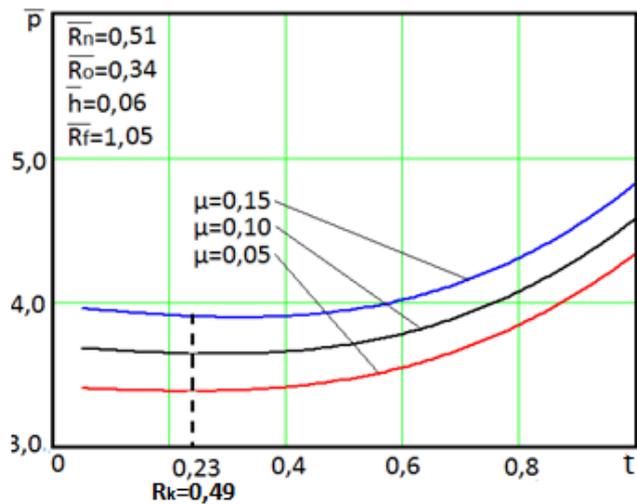
Рассмотрена задача комбинированного трехстороннего выдавливания в два этапа. Верхний очаг деформации представляет собой обратное выдавливание стакана (рис. 3.4).



а

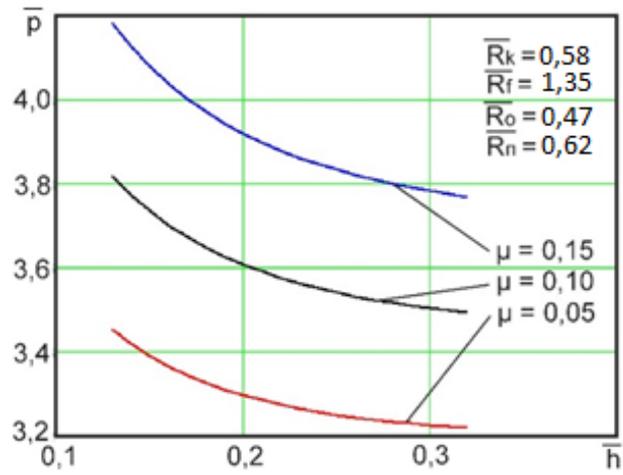


б

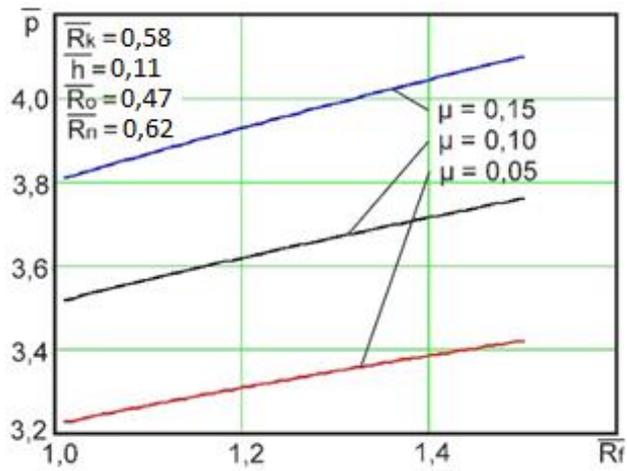


в

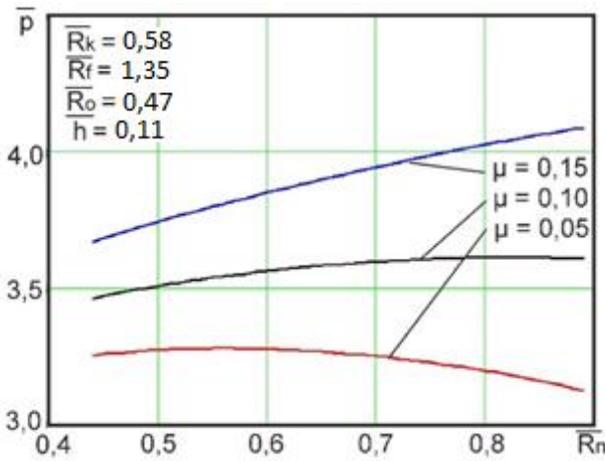
Рисунок 3.2 – Графики зависимости приведенного давления от относительного критического радиуса при разных значениях трения μ и относительных геометрических параметров



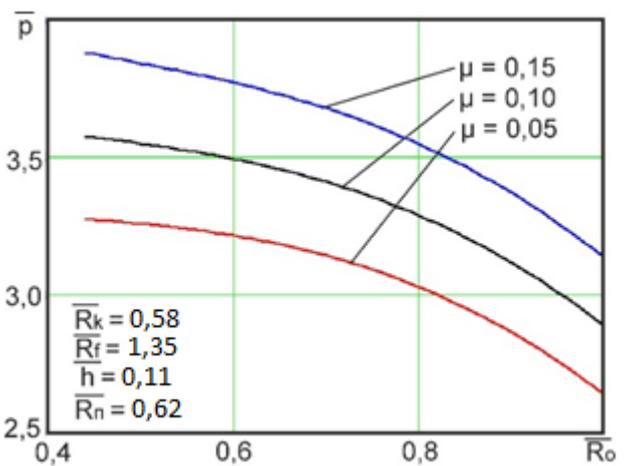
а



б



в



г

Рисунок 3.3 – Графики зависимости приведенного давления от относительной высоты фланца (а), от относительного радиуса фланца (б), от относительного радиуса пуансона (в) и от относительного радиуса отростка (г) при разных значениях трения μ

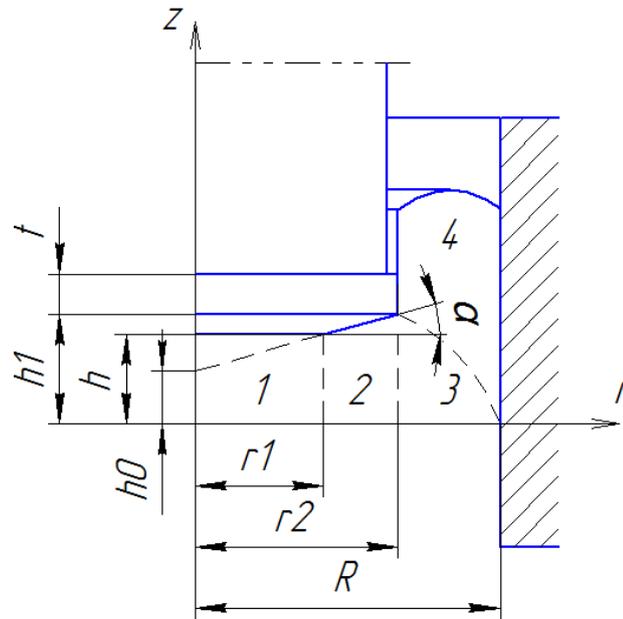


Рисунок 3.4 – Расчетная схема обратного выдавливания по Чудакову П. Д.

Согласно расчётам Чудакова П.Д. [164] приведенное давления выдавливания, с учетом фаски на пуансоне имеет вид:

$$\bar{P}_{обр.в.} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\frac{\mu \cdot r_2}{12 \cdot h} + \frac{h}{r_2} + \frac{R - r_2}{a} + 3 \cdot \mu + 0,226 + \frac{b}{r_2^2} \cdot \left(b \cdot \ln \frac{a}{h} - 0,5 \cdot r_2 \right) \cdot (8 \cdot \mu - 1,57) + \right. \\ \left. + \frac{2}{R^2 - r_2^2} \cdot \left[R^2 \cdot \ln \frac{R}{r_2} + 2 \cdot \mu \cdot t \cdot (R + r_2) + 2 \cdot a \cdot \left(\mu \cdot R + \frac{1}{3} \cdot \frac{R^3 - r_2^3}{R^2 - r_2^2} \right) \right] \right],$$

где $a = h + 0,134 \cdot r_2$; $b = 3,73 \cdot h - 0,5 \cdot r_2$.

Нижний очаг деформации включает в себя приведенное давление p_2 (3.3) нижнего очага деформации со схемы с прямолинейными блоками с добавлением двух новых кинематических модулей, которые представлены ниже.

Фаску на верхней матрице можно описать модулем, представленным на рисунке (рис. 3.5).

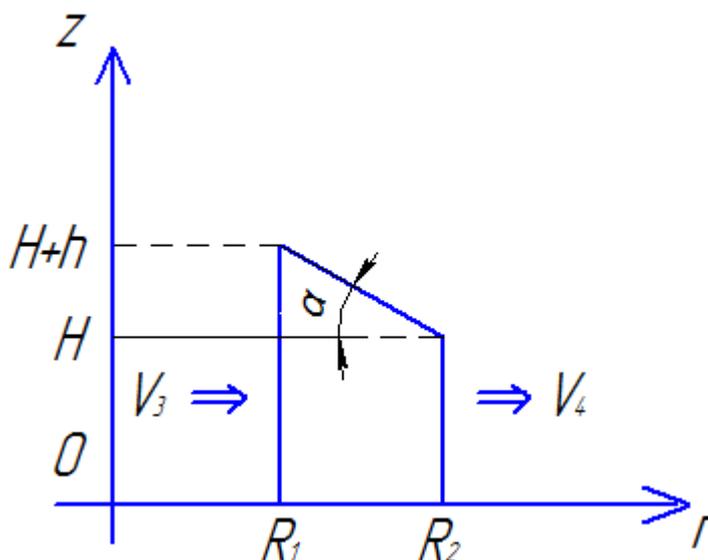


Рисунок 3.5 – Новый кинематический модуль для расчета радиального течения металла

Аналитически наклонная прямая описывается зависимостью:

$$z(r) = -\frac{h}{R_2 - R_1} \cdot (r - R_1) + H + h,$$

где $\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{h}{R_2 - R_1}$.

Тогда $z(r) = -\operatorname{tg}(\alpha) \cdot (r - R_1) + H + h$.

Кинематические граничные условия для данного блока:

$$V_z \Big|_{z=0} = 0;$$

$$V_r \Big|_{r=R_1} = V_3;$$

$$V_r \Big|_{r=R_2} = \frac{V_3 \cdot R_1 \cdot (H + h)}{R_2 \cdot z(r)}.$$

Кинематические возможные поля скоростей имеют вид:

$$V_z = \frac{-V_3 \cdot R_1 \cdot (H+h) \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{r \cdot z^2(r)} \cdot z;$$

$$V_r = \frac{V_3 \cdot R_1 \cdot (H+h)}{r \cdot z(r)}.$$

Значения компонентов скоростей деформации:

$$\dot{\varepsilon}_z = \frac{-V_3 \cdot R_1 (H+h) \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{r \cdot z^2(r)};$$

$$\dot{\varepsilon}_\theta = \frac{V_3 \cdot R_1 \cdot (H+h)}{r^2 \cdot z(r)};$$

$$\dot{\varepsilon}_r = \frac{-V_3 \cdot R_1 \cdot (H+h) \cdot [z(r) + r \cdot \operatorname{tg}(\alpha)]}{r^2 \cdot z^2(r)};$$

$$\dot{\gamma}_{rz} = \frac{-V_3 \cdot R_1 \cdot (H+h) \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot z \cdot [z(r) + 2 \cdot r \cdot \operatorname{tg}(\alpha)]}{r^2 \cdot z^3(r)}.$$

Тогда интенсивность деформации имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_i^2 &= \frac{2}{9} \left[\left(\dot{\varepsilon}_z - \dot{\varepsilon}_r \right)^2 + \left(\dot{\varepsilon}_z - \dot{\varepsilon}_\theta \right)^2 + \left(\dot{\varepsilon}_r - \dot{\varepsilon}_\theta \right)^2 + 1,5 \cdot \dot{\gamma}_{rz}^2 \right] = \frac{2}{9} \left[V_3 \cdot R_1 \cdot (H+h) \right]^2 \times \\ &\times \left[\frac{6}{z^2(r) \cdot r^4} + \frac{2 \cdot \operatorname{tg}^2(\alpha)}{r^2 \cdot z^4(r)} + \frac{6 \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{r^3 \cdot z^3(r)} + 1,5 \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \frac{(z(r) + 2 \cdot r \cdot \operatorname{tg}(\alpha))^2}{z^6(r) \cdot r^4} \right]. \end{aligned}$$

Запишем мощности сил среза:

$$N_{с.вход} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_1 \int_0^{H+h} V_r \Big|_{r=R_1} dz = \frac{\pi \cdot \sigma_s \cdot V_3 \cdot R_1 \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot (H+h)}{\sqrt{3}};$$

$$N_{с.выход} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_1 \int_0^H V_r \Big|_{r=R_2} dz = \frac{\pi \cdot \sigma_s \cdot V_3 \cdot R_1 \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot (H+h)}{\sqrt{3}}.$$

Мощности сил трения:

$$\begin{aligned}
 N_{t_{\text{прямая}}} &= \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot 2 \cdot \mu_s \int_0^{2\pi} d\theta \int_{R_1}^{R_2} \frac{V_3 \cdot R_1 \cdot (H+h)}{r \cdot z(r)} r dr = \\
 &= \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot 4 \cdot \pi \cdot \mu_s \cdot V_3 \cdot R_1 \cdot (H+h) \cdot \frac{1}{\operatorname{tg}(\alpha)} \cdot \ln \left| \frac{H+h}{H} \right|; \\
 N_{t_{\text{наклон}}} &= \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot 2 \cdot \mu_s \cdot 2 \cdot \pi \cdot (1 + \operatorname{tg}^2(\alpha)) \int_{R_1}^{R_2} \frac{V_3 \cdot R_1 \cdot (H+h)}{r \cdot z(r)} r dr = \\
 &= \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot 4 \cdot \pi \cdot \mu_s \cdot V_3 \cdot (1 + \operatorname{tg}^2(\alpha)) \cdot R_1 \cdot (H+h) \cdot \frac{1}{\operatorname{tg}(\alpha)} \cdot \ln \left| \frac{N - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot R_1}{N - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot R_2} \right|.
 \end{aligned}$$

Мощность сил деформирования:

$$\begin{aligned}
 N_{\partial} &= 2\pi \cdot \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sigma_s \cdot V_3 \cdot R_1 \cdot (H+h) \times \\
 &\times \left[\left(N \cdot \frac{R_2^2 - R_1^2}{2} - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \frac{R_2^3 - R_1^3}{3} \right) \cdot \left(\frac{6 + 0.5 \operatorname{tg}^2(\alpha)}{2 \cdot N} \cdot \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) + \right. \right. \\
 &\left. \left. + \frac{\operatorname{tg}(\alpha) \cdot (2.5 \operatorname{tg}^2(\alpha) + 12)}{N^2} \cdot \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \cdot \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha) \cdot (20 + 6.5 \operatorname{tg}^2(\alpha))}{N^3} \right) \times \right. \\
 &\left. \times \ln \left| \frac{R_2}{R_1} \right| + \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha) \cdot (1 + \operatorname{tg}^2(\alpha))}{N} \cdot \left(\frac{1}{(N - \operatorname{tg} \alpha \cdot R_2)^2} - \frac{1}{(N - \operatorname{tg} \alpha \cdot R_1)^2} \right) + \right. \\
 &\left. \left. + \frac{4 \cdot \operatorname{tg}^2(\alpha) \cdot (2 + \operatorname{tg}^2(\alpha))}{N^2} \cdot \left(\frac{1}{(N - \operatorname{tg} \alpha \cdot R_2)} - \frac{1}{(N - \operatorname{tg} \alpha \cdot R_1)} \right) + \right. \right. \\
 &\left. \left. + \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha) \cdot (20 + 6.5 \cdot \operatorname{tg}^2(\alpha))}{N^3} \cdot \ln \left| \frac{N - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot R_1}{N - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot R_2} \right| \right],
 \end{aligned}$$

где $N = H + h + \operatorname{tg}(\alpha) \cdot R_1$.

Приведенное давление, после сокращения на $[\sigma_s \cdot V_3 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot (H+h)]$, для данного блока имеет вид:

$$\bar{p}_{2.1} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \cdot \left(\begin{aligned} & \left(N \cdot \frac{R_2^2 - R_1^2}{2} - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \frac{R_2^3 - R_1^3}{3} \right) \cdot \left(\frac{6 + 0.5 \operatorname{tg}^2(\alpha)}{2 \cdot N} \cdot \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{\operatorname{tg}(\alpha) \cdot (2.5 \operatorname{tg}^2(\alpha) + 12)}{N^2} \cdot \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \cdot \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha) \cdot (20 + 6.5 \operatorname{tg}^2(\alpha))}{N^3} \right) \times \\ & \times \ln \left| \frac{R_2}{R_1} \right| + \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha) \cdot (1 + \operatorname{tg}^2(\alpha))}{N} \cdot \left(\frac{1}{(N - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot R_2)^2} - \frac{1}{(N - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot R_1)^2} \right) + \\ & \left. + \frac{4 \cdot \operatorname{tg}^2(\alpha) \cdot (2 + \operatorname{tg}^2(\alpha))}{N^2} \cdot \left(\frac{1}{(N - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot R_2)} - \frac{1}{(N - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot R_1)} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha) \cdot (20 + 6.5 \cdot \operatorname{tg}^2(\alpha))}{N^3} \cdot \ln \left| \frac{N - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot R_1}{N - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot R_2} \right| \right) + \\ & + \frac{2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{\sqrt{3}} + \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{1}{\operatorname{tg}(\alpha)} \cdot \ln \left| \frac{H + h}{H} \right| + \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{(1 + \operatorname{tg}^2(\alpha))}{\operatorname{tg}(\alpha)} \cdot \ln \left| \frac{N - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot R_1}{N - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot R_2} \right|. \end{aligned} \right)$$

Фаску на нижней матрице описываем модулем представленным на рисунке (рис. 3.6).

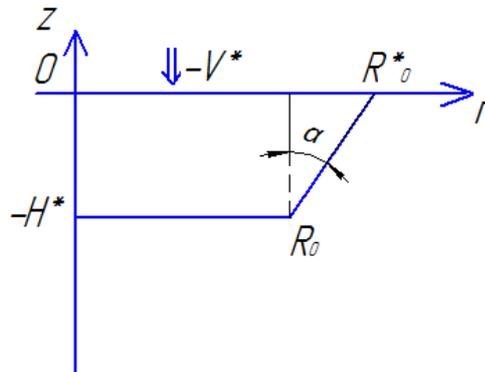


Рисунок 3.6 – Новый кинематический модуль для расчета прямого течения металла

Наклонная прямая описывается математическим выражением:

$$T(z) = -\frac{(R_0 - R_0^*)}{H^*} \cdot z + R_0^*,$$

или $T(z) = k \cdot z + R_0^*$, где $k = -\frac{(R_0 - R_0^*)}{H^*} = T'(z)$.

КГУ имеет вид:

$$V_z \Big|_{z=0} = -V^* ;$$

$$V_z \Big|_{z=-H^*} = \frac{-V^* \cdot (R_0^*)^2}{(R_0)^2} ;$$

$$V_r \Big|_{r=0} = 0 .$$

КВПС данного блока:

$$V_z = \frac{-V^* \cdot (R_0^*)^2}{T^2(z)} ;$$

$$V_r = \frac{r \cdot k}{T^3(z)} \cdot \left(-V^* \cdot (R_0^*)^2 \right) .$$

Компоненты скоростей деформаций:

$$\dot{\varepsilon}_z = -V^* \cdot (R_0^*)^2 \cdot (-2) \cdot T^{-3}(z) \cdot T'(z) = \frac{2 \cdot V^* \cdot (R_0^*)^2 \cdot k}{T^3(z)} ;$$

$$\dot{\varepsilon}_r = \frac{-V^* \cdot (R_0^*)^2 \cdot k}{T^3(z)} ;$$

$$\dot{\varepsilon}_\theta = \frac{-V^* \cdot (R_0^*)^2 \cdot k}{T^3(z)} .$$

Интенсивность деформаций определим, как:

$$\dot{\varepsilon}_i = 1,08 \cdot |\dot{\varepsilon}_{\max}|,$$

Тогда $\dot{\varepsilon}_i = 1,08 \cdot \left(\frac{2 \cdot V^* \cdot (R_0^*)^2 \cdot k}{T^3(z)} \right)$.

Мощность сил деформирования:

$$\begin{aligned} N_{\partial} &= \int_{-H^*}^0 \int_0^{T(z)} \int_0^{2\pi} \left(\frac{2 \cdot V^* \cdot (R_0^*)^2 \cdot k}{T^3(z)} \right) \cdot 1,08 \cdot \sigma_s \cdot r \cdot d\theta dz dr = \\ &= 1,08 \cdot \sigma_s \cdot V^* \cdot \pi \cdot R_0^{*2} \cdot \frac{2 \cdot H^* \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{T(z)}; \end{aligned}$$

Мощность сил среза:

$$\begin{aligned} N_{с.верх} &= \int_0^{R_0^*} \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot \left(-\frac{V^* \cdot (R_0^*)^2 \cdot r \cdot K}{T^3(z)} \right) \cdot r \cdot d\theta dr = \\ &= \sigma_s \cdot V^* \cdot \pi \cdot R_0^{*2} \cdot \frac{2}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{(R_0^*)^3 \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{T^3(z)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{с.низ} &= \int_0^{R_0^*} \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s \cdot \left(-\frac{V^* \cdot (R_0^*)^2 \cdot r \cdot K}{T^3(z)} \right) \cdot r \cdot d\theta dr = \\ &= \sigma_s \cdot V^* \cdot \pi \cdot R_0^{*2} \cdot \frac{2}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{(R_0^*)^3 \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{T^3(z)}. \end{aligned}$$

Мощность сил трения:

$$N_{m.накл} = \int_{R_0}^{R_0^*} \int_0^{2\pi} \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \sigma_s \cdot \left| \frac{V^* \cdot (R_0^*)^2 \cdot r \cdot K}{T^2(z)} \right| \cdot r \cdot d\theta dr =$$

$$= \sigma_s \cdot V^* \cdot \pi \cdot R_0^{*2} \cdot \frac{4}{3\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{(R_0^{*3} - R_0^3) \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{T^3(z)}.$$

Приведенное давление, после сокращения на $[\sigma_s \cdot V^* \cdot \pi \cdot R_0^{*2}]$, для данного блока имеет вид:

$$\bar{p}_{2.2} = 1,08 \cdot \frac{2 \cdot H^* \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{T(z)} + \frac{2}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{(R_0^*)^3 \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{T^3(z)} + \frac{2}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{(R_0)^3 \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{T^3(z)} +$$

$$+ \frac{4}{3\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{(R_0^{*3} - R_0^3) \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{T^3(z)}.$$

Общая схема разбиения очагов деформации комбинированного трехстороннего выдавливания с применением трапецидальных модулей показана на рис. 3.7.

Общий вид уравнения энергетического баланса мощностей для трёхстороннего комбинированного выдавливания с трапецидальными модулями будет иметь вид:

$$\bar{p} = (1 - \lambda) \cdot \bar{p}_{обр.в.} - G \cdot \frac{R_m}{R_n} \cdot \lambda + \lambda \cdot \frac{R_m}{R_n} \cdot (\bar{p}_2 + \bar{p}_{2.1} + \bar{p}_{2.2}), \quad (3.6)$$

$$\text{где } \lambda = \frac{\bar{q}_1}{\bar{q}_1 + G + (\bar{p}_2 + \bar{p}_{2.1} + \bar{p}_{2.2})};$$

G – см. зависимость (3.4).

Для схемы с фасками на инструменте установлено оптимальное значения границы разделения течения металла $R_k = R_o \cdot (1 + \operatorname{tg}\gamma) + t \cdot (R_m - R_o \cdot (1 + \operatorname{tg}\gamma))$ с учетом параметра $t \in [R_o \cdot (1 + \operatorname{tg}\gamma); R_m]$, где $t = 0,25$ в нижнем очаге деформации, при котором приведенное давление процесса минимально (рис. 3.8) (приложение Б).

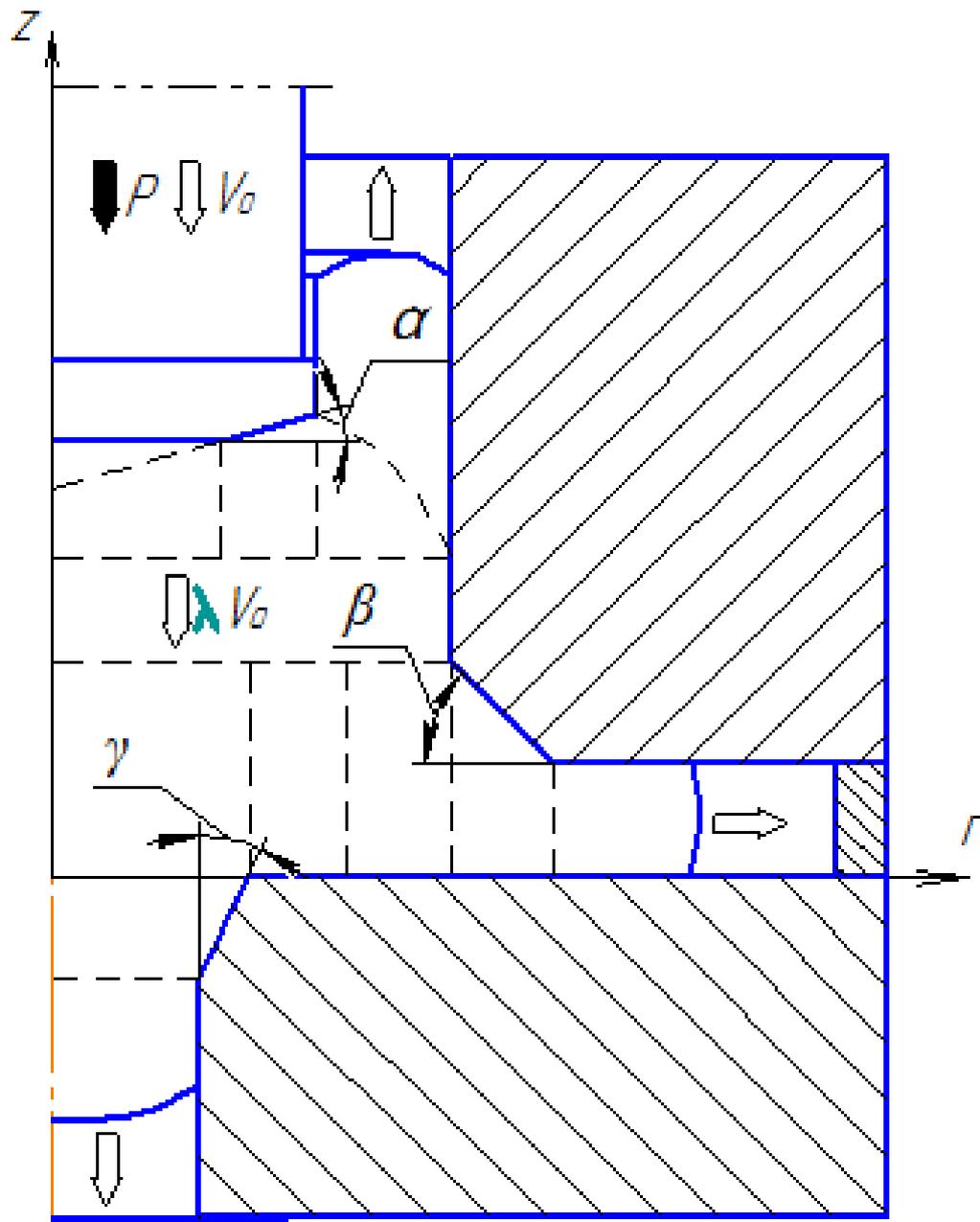


Рисунок 3.7 – Расчетная схема комбинированного трехстороннего выдавливания энергетическим методом с трапецидальными модулями

Графики зависимости приведенного давления от различных геометрических параметров для схемы с трапецеидальными модулями показанные на рис. 3.9 имеют схожий характер с графиками зависимости для прямолинейных блоков.

В связи с уменьшением степени деформации в зоне фланца и уменьшением трения между фланцем и матрицей значения приведенного давления в зависимости от увеличения высоты фланца уменьшаются, что показано на рис. 3.9, а.

А с увеличением окружной степени деформации и увеличением контактной поверхности трения значения приведенного давления возрастают в зависимости от относительного радиуса фланца (рис. 3.9, б).

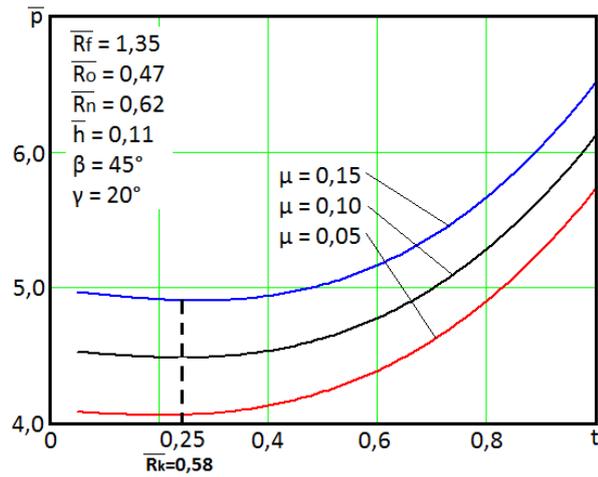
При изменении относительного радиуса пуансона (рис. 3.9, в) значения приведенного давления возрастают. Это объясняется увеличением поверхности трения и увеличением степени деформации в обратном течении материала.

Снижающийся характер изменения приведенного давления при разных значениях относительного радиуса отрезка (рис. 3.3, г) объясняется изменением поверхности среза при прямом выдавливании отрезка.

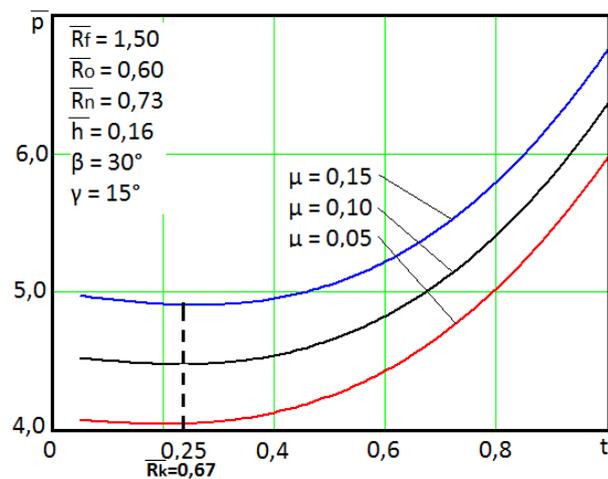
Для схем с кинематическими трапецеидальными модулями, которые учитывают наличие фасок на переходных кромках инструмента, анализ теоретических данных показал аналогичный характер распределения показателей приведенного давления с отклонением 7-10% в большую сторону, что связано с увеличением объемов очагов деформации и зон срезов на границах модулей.

3.3 Моделирование процесса комбинированного выдавливания методом конечных элементов

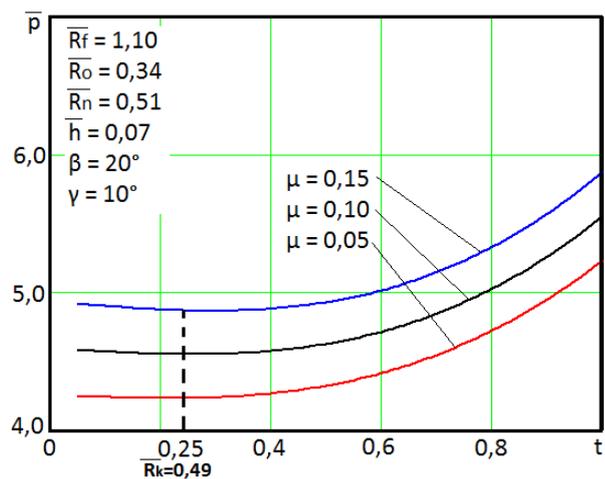
Для моделирования напряженно-деформированного состояния, силового режима и формоизменения в настоящее время широко используют метод конечных элементов [134, 143, 165-176].



а

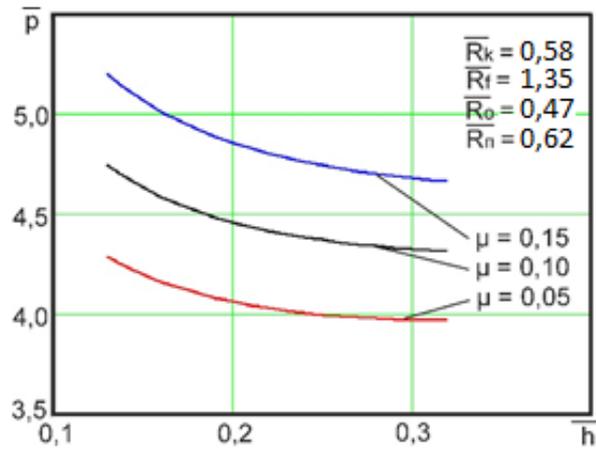


б

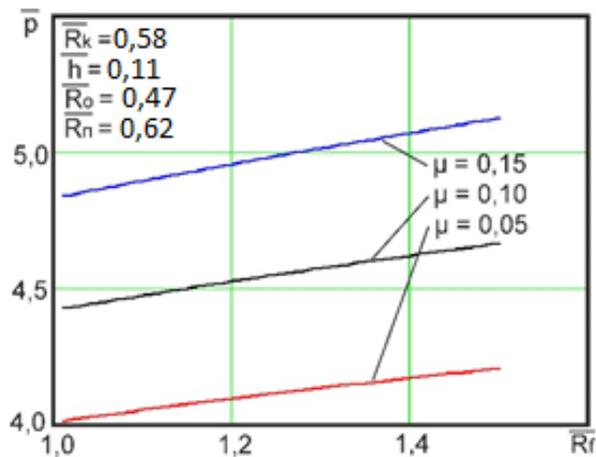


в

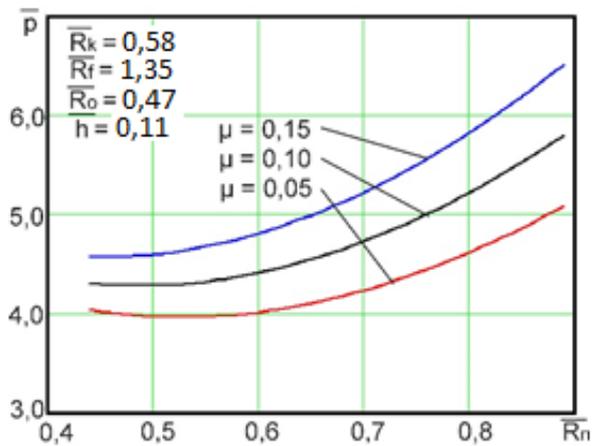
Рисунок 3.8 – Графики зависимости приведенного давления от относительного критического радиуса при разных значениях трения μ и относительных геометрических параметрах для комбинированного выдавливания схемы с фасками на инструменте



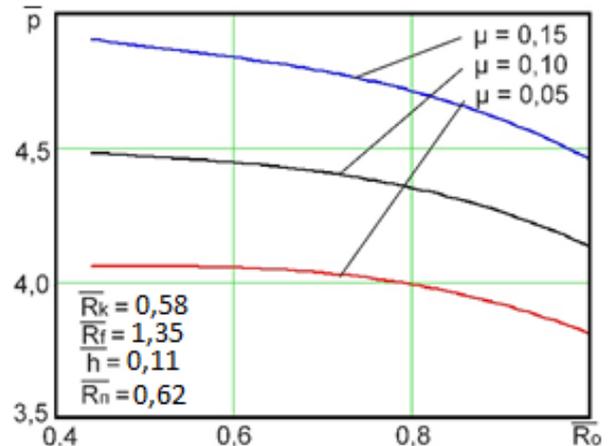
а



б



в



г

Рисунок 3.9 – Графики зависимости приведенного давления от относительной высоты фланца (а), от относительного радиуса фланца (б), от относительного радиуса пуансона (в) и от относительного радиуса отрезка (г) при разных значениях трения μ схемы с трапецидальными модулями

Моделирование процесса комбинированного выдавливания проводилось в программном продукте QForm 2D. Граничные условия для осесимметричной задачи были заданы в следующем виде: упрочнение алюминиевого материала АД1 описано кривой упрочнения $\sigma_s = 141,9 \cdot e^{0,26} \text{МПа}$, свинцового сплава С1 - $\sigma_s = 25 \cdot e^{0,19} \text{МПа}$ при скорости деформирования $0,25 \text{с}^{-1}$, плотность материала АД1 = $2800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, С1 = $11340 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; коэффициент трения по Леванову $\mu_s = 0,16$; скорость перемещения инструмента 1мм/с ; инструмент абсолютно жесткий.

Поэтапное изменение деформированного состояния при выдавливании полых деталей с фланцем и осевым отростком в пакете QForm приведены на рис. 3.10. Из рисунка видно, что наибольшая деформация возникает у кромки нижней полуматрицы при получении отростка.

На рис. 3.11 показана зависимость усилия деформирования в зависимости от хода пуансона. Снижение усилия связано с уменьшением поверхности трения при течении металла в радиальном направлении, а также с расслоением металла на периферийных участках фланца. На рис. 3.12 показано уменьшение поверхности трения. Можно отметить, что по мере движения пуансона, поверхность контакта между выдавливаемой заготовкой и нижней полуматрицей уменьшается.

В результате математического моделирования в пакете QForm также получены графики зависимости приведенного давления, давления и усилия деформирования в зависимости от геометрических параметров детали при коэффициентах трения по Леванову 0,14; 0,2 и 0,4, которые приведены на рис. 3.11 – 3.15.

На рис 3.13 показана зависимость усилия деформирования от радиуса скругления кромки отверстия нижней полуматрицы при различных коэффициентах трения. Из графика можно увидеть, что при увеличении радиуса скругления, усилие деформирования увеличивается. Так как больший объем металла оказывается вовлеченным в пластичную зону.

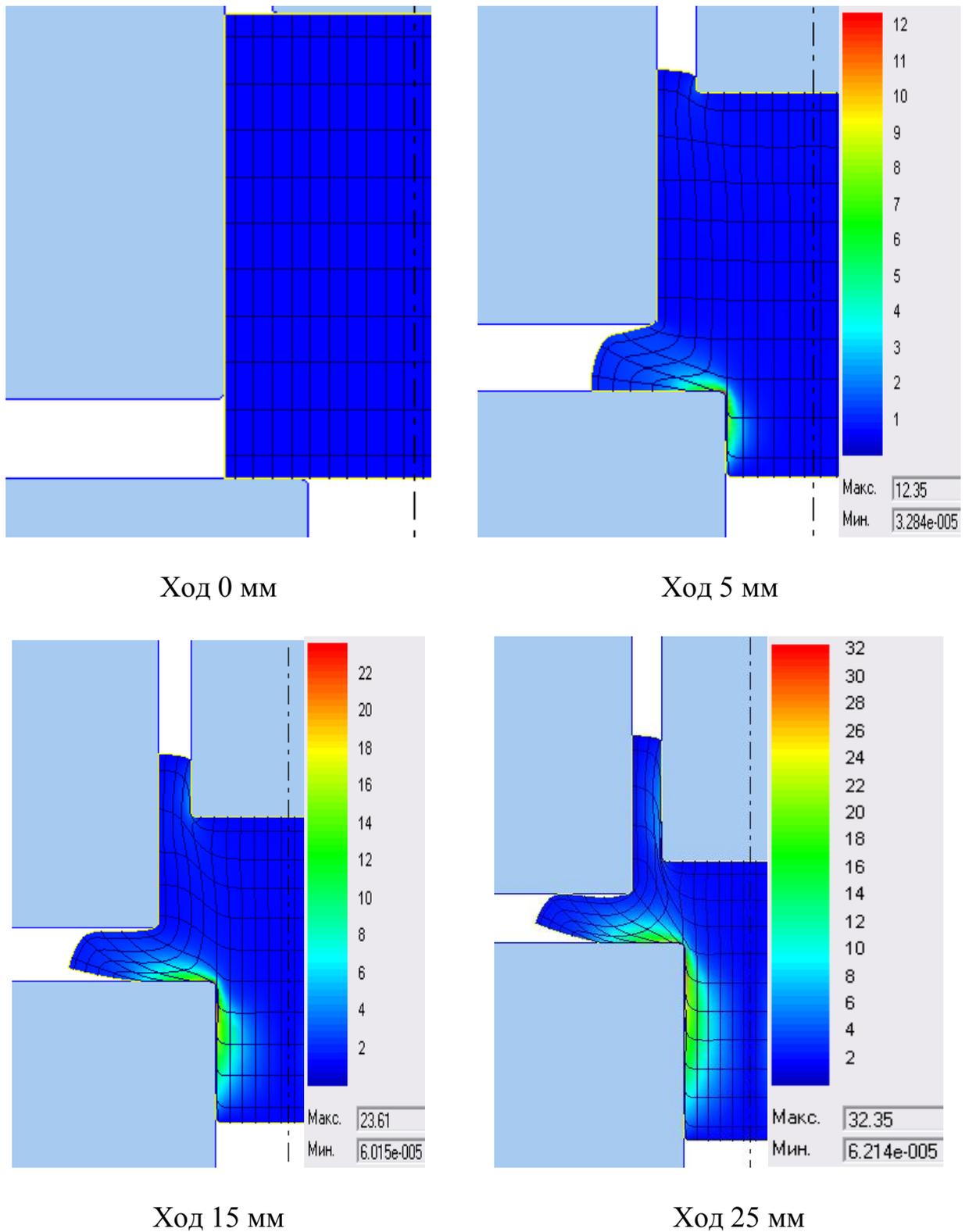


Рисунок 3.10 – Поэтапное изменение деформированного состояния при комбинированном трехстороннем выдавливании деталей с фланцем и осевым отростком в пакете QForm

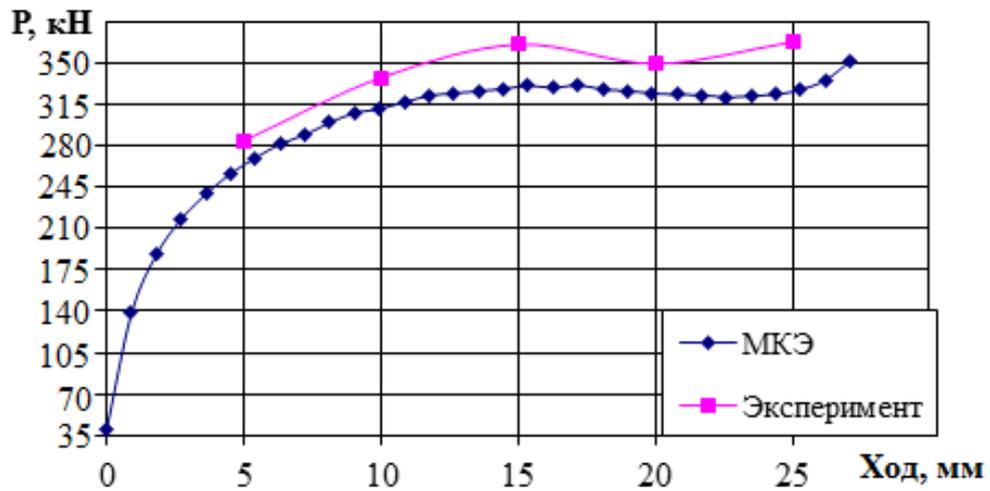
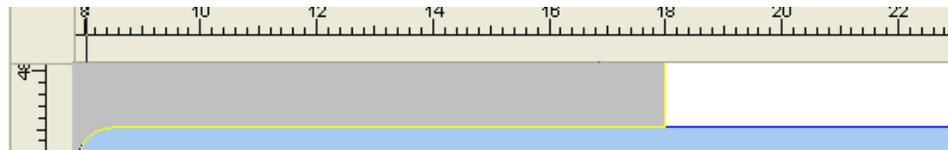
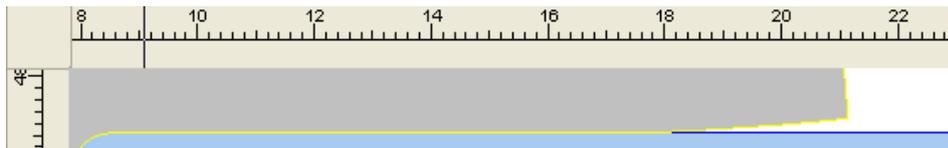


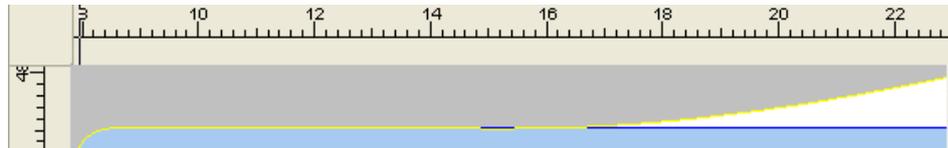
Рисунок 3.11 – График зависимости усилия деформирования от хода пуансона



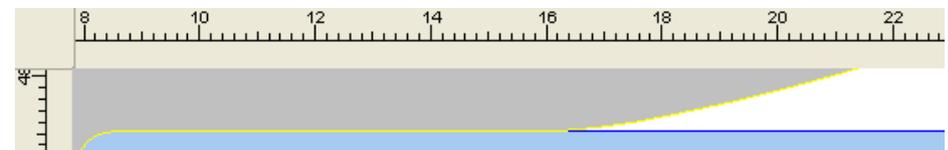
Ход = 5 мм; Усилие = 270 кН



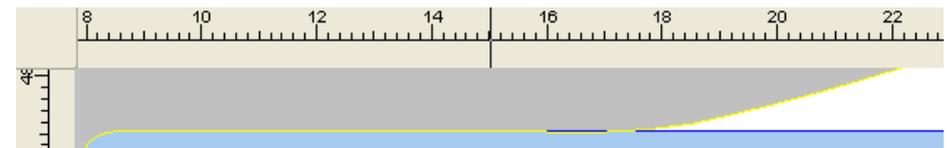
Ход = 10 мм; Усилие = 313 кН



Ход = 15 мм; Усилие = 334 кН



Ход = 20 мм; Усилие = 326 кН



Ход = 25 мм; Усилие = 319 кН

Рисунок 3.12 – Отклонение формы фланца по ходу деформирования

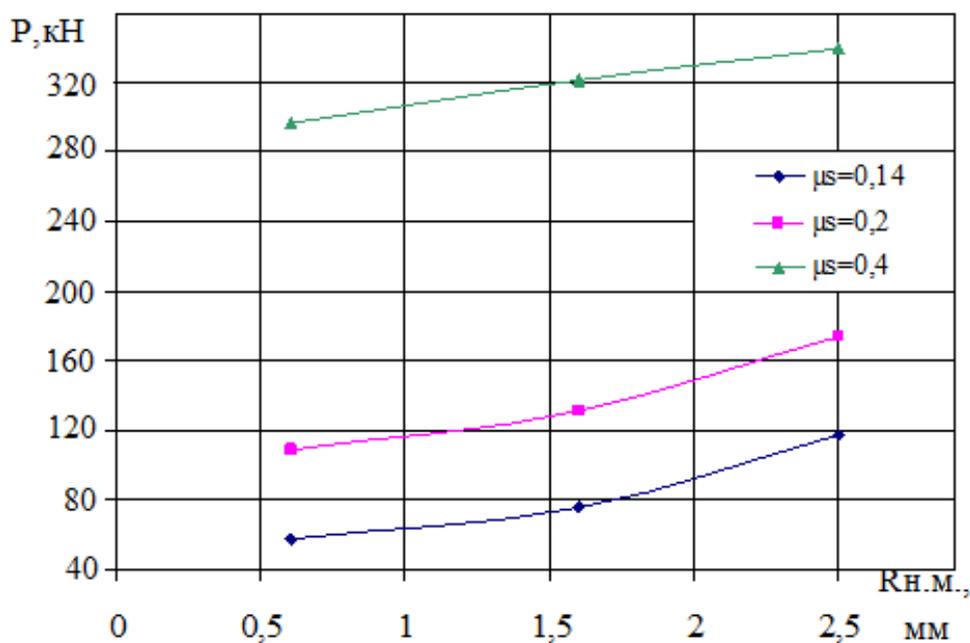


Рисунок 3.13 – График зависимости усилия деформирования от радиуса скругления кромки отверстия нижней полуматрицы при различных коэффициентах трения

График зависимости усилия деформирования от радиуса скругления верхней полуматрицы при переходе к фланцу (рис. 3.14) показывает, что с увеличением радиуса скругления кромки верхней полуматрицы усилие деформирования уменьшается в начальной стадии, т.к. при этом выдавливается как бы более «толстый» фланец, то есть с меньшей степенью деформации.

График зависимости усилия деформирования от радиуса скругления пуансона (рис. 3.15) показывает увеличение усилия с увеличением радиуса скругления пуансона. Так как более закругленный фланец легче внедряется в заготовку и большее количество металла вовлечено в пластическую деформацию.

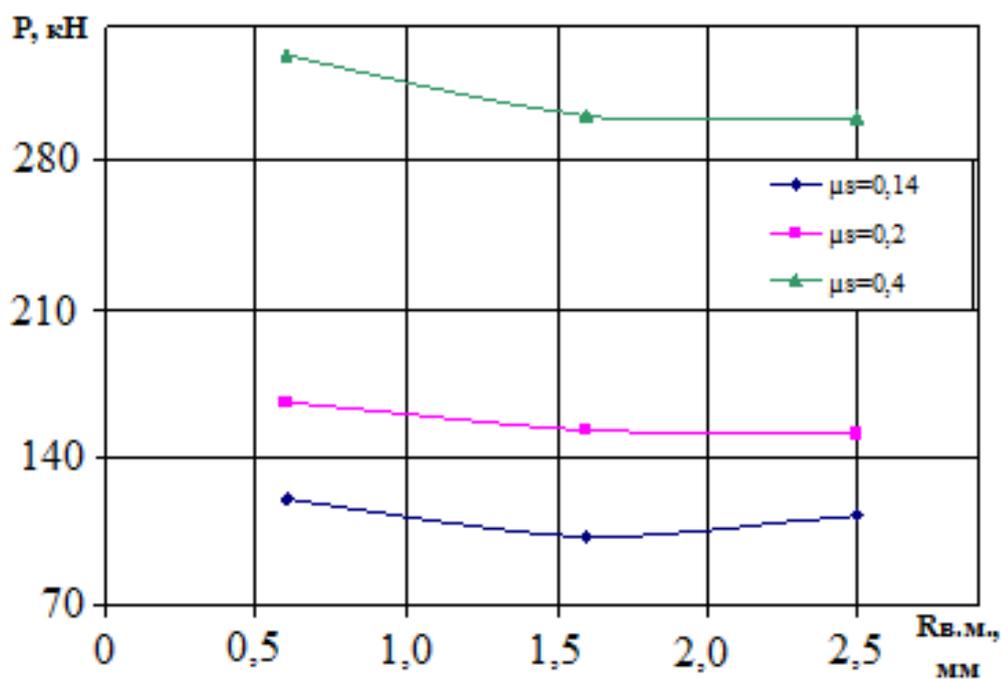


Рисунок 3.14 – График зависимости усилия деформирования от радиуса скругления кромки отверстия верхней полуматрицы при различных коэффициентах трения

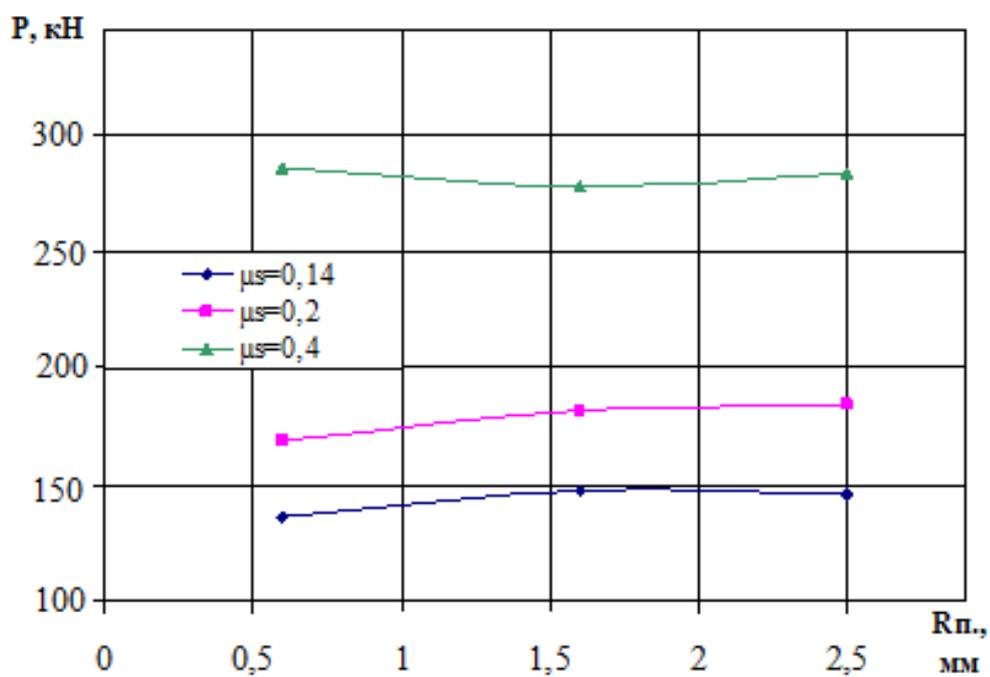


Рисунок 3.15 – График зависимости усилия деформирования от радиуса скругления пуансона при различных коэффициентах трения

На рис. 3.16 – 3.17 показано распределение сопротивления деформированию на различных этапах процесса по мере движения пуансона для материалов С1 и АД1. Из рисунков можно увидеть, что наибольшее сопротивление деформации возникает у кромки отверстия нижней полуматрицы и при ходе 5 мм составляет 36 МПа для С1 и 220 МПа для АД1. По ходу процесса сопротивление деформации увеличивается и в конце процесса составляет для С1 - 44 МПа, для АД1 – 300 МПа. Наименьшее сопротивление деформации в конечной стадии наблюдается вдоль оси деформирования и на торцах при прямом и обратном выдавливании.

Моделирование силового режима при комбинированном трехстороннем выдавливании методом планирования эксперимента в DeForm3D.

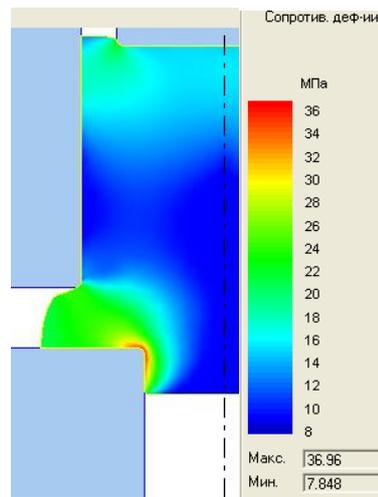
Для определения зависимости силы выдавливания и силы раскрытия матрицы от разных параметров процесса использовался метод планирования эксперимента (полный факторный эксперимент 3^3 второго порядка с доработкой конструкции плана) [63, 136, 177]. Варьировались следующие параметры: относительная высота фланца $\bar{h} = \frac{h_f}{d_m}$, относительный радиус

пуансона $\bar{D}_n = \frac{d_n}{d_m}$ и относительный радиус отверстия отростка $\bar{D}_0 = \frac{d_0}{d_m}$,

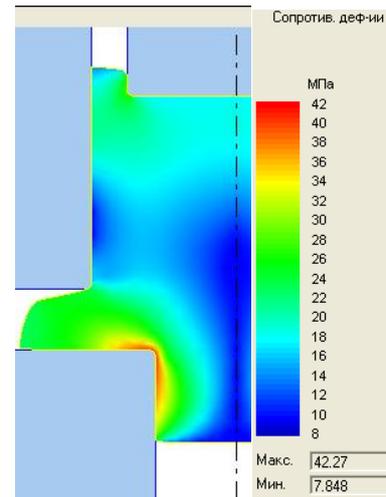
где: d_m – диаметр матрицы (заготовки); d_0 – диаметр отверстия для формирования отростка; d_n – диаметр пуансона. Интервалы варьирования факторов и их значения в натуральном масштабе на основном, верхнем и нижнем уровнях указаны в таблице уровней факторов (табл. 3.5).

Таблица 3.5 – Уровни факторов

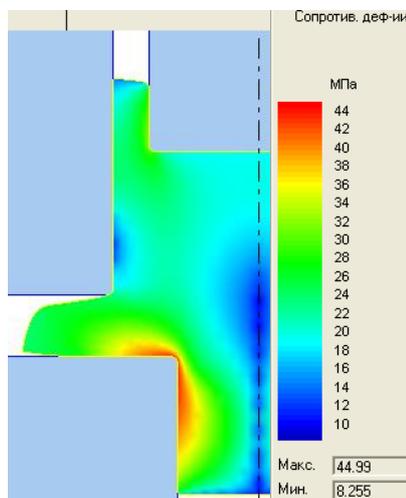
Факторы	$x_1 (\bar{h})$	$x_2 (\bar{D}_0)$	$X_3 (\bar{D}_n)$
Основной уровень (X_{i_0})	0,111	0,471	0,626
Интервал варьирования (ΔX_i)	0,044	0,133	0,111
Верхний уровень ($x_i = 1$)	0,155	0,604	0,737
Нижний уровень ($x_i = -1$)	0,067	0,338	0,515



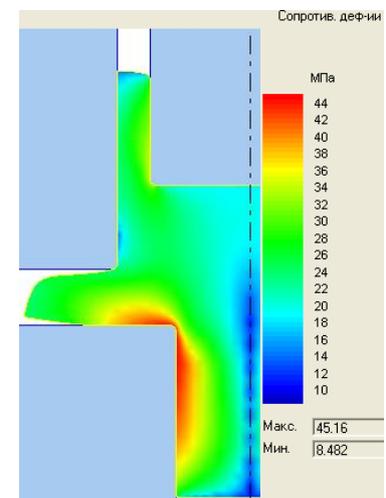
ход 5 мм



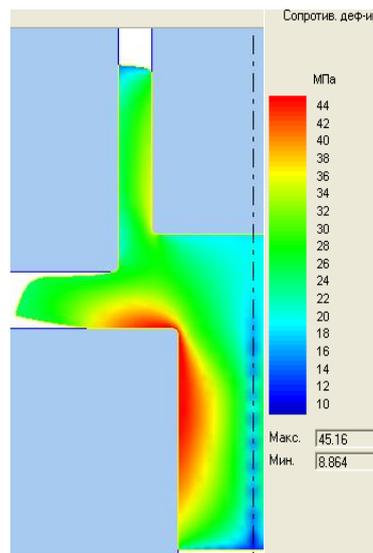
ход 10 мм



ход 15 мм

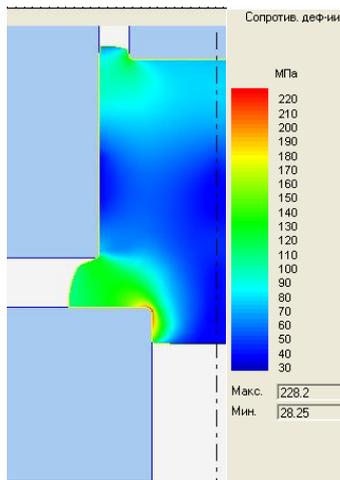


ход 20 мм

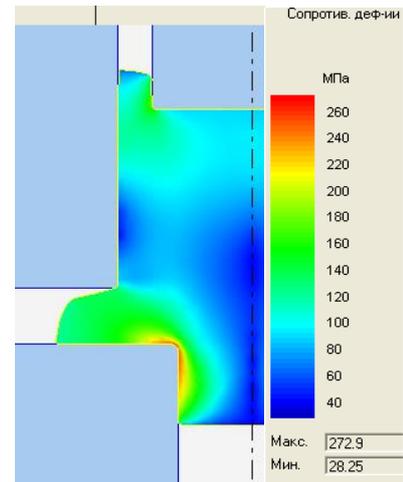


ход 25 мм

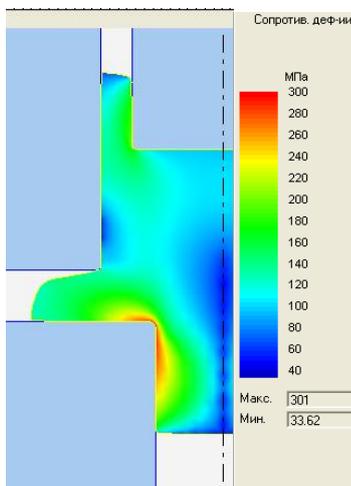
Рисунок 3.16 – Распределение сопротивления деформации на различных этапах процесса для свинца С1



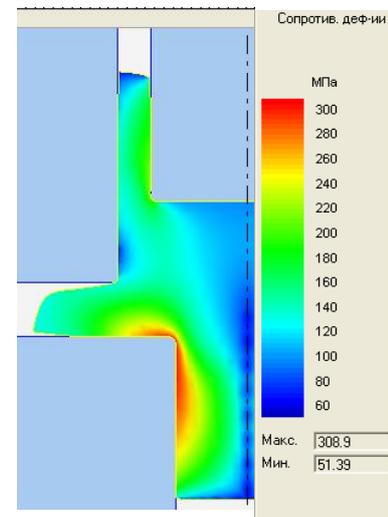
ход 5 мм



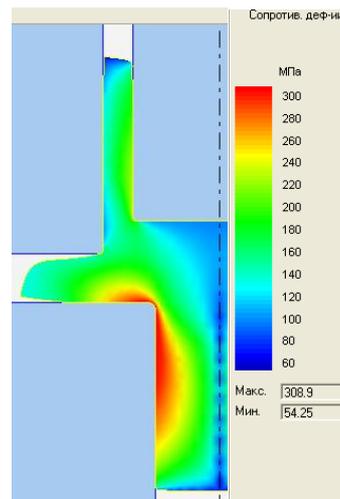
ход 10 мм



ход 15 мм



ход 20 мм



ход 25 мм

Рисунок 3.17 – Распределение сопротивления деформации на различных этапах процесса для алюминиевого сплава АД1

С использованием методики, описанной в разделе 2, методом планирования эксперимента были получены зависимости приведенного давления выдавливания и приведенного давления раскрытия матрицы (3.4) от варьируемых факторов (приложение В).

На рис. 3.18–3.23 представлены зависимости приведенного давления выдавливания и приведенного давления раскрытия матрицы от относительной высоты фланца, диаметра пуансона и диаметра отростка при различных параметрах процесса.

$$Y(\bar{p}; \bar{q}) = b_0 + b_1 \cdot \bar{d}_n + b_2 \cdot \bar{h} + b_3 \cdot \bar{d}_o + b_4 \cdot \bar{d}_n \cdot \bar{h} + b_5 \cdot \bar{d}_n \cdot \bar{d}_o + b_6 \cdot \bar{h} \cdot \bar{d}_o + b_7 \cdot \bar{d}_n^2 + b_8 \cdot \bar{h}^2 + b_9 \cdot \bar{d}_o^2, \quad (3.4)$$

где b_i – постоянные коэффициенты уравнения регрессии (табл. 3.6)

Таблица 3.6 – Коэффициенты уравнения регрессии

b_i	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9
\bar{p}	9,026	-4,25	-32,9	-2,87	-13,4	0,43	-22,3	4,05	174,4	3,49
\bar{q}	17,5	-72	-46,6	52,36	-26,1	-3,49	0,96	59,1	140,6	-56,2

Из рис. 3.18 видно, что при увеличении относительного диаметра пуансона, значения приведенного давления падает, как при изменении относительного диаметра отростка, так и высоты фланца. Это связано с уменьшением очага деформации при обратном выдавливании

Аналогичный характер изменения энергосиловых параметров выдавливания наблюдается и при изменении относительного диаметра отростка (рис. 3.19). Такое снижение приведенного давления наблюдается за счет уменьшения границ среза при деформировании.

На рис. 3.20 показано падение приведенного давления при увеличении относительной высоты фланца. Причиной такого распределения параметров связано с увеличением очага деформации в радиальном истечении металла и наличии дополнительных растягивающих напряжений, которые благоприятно влияют на снижение приведенного давления.

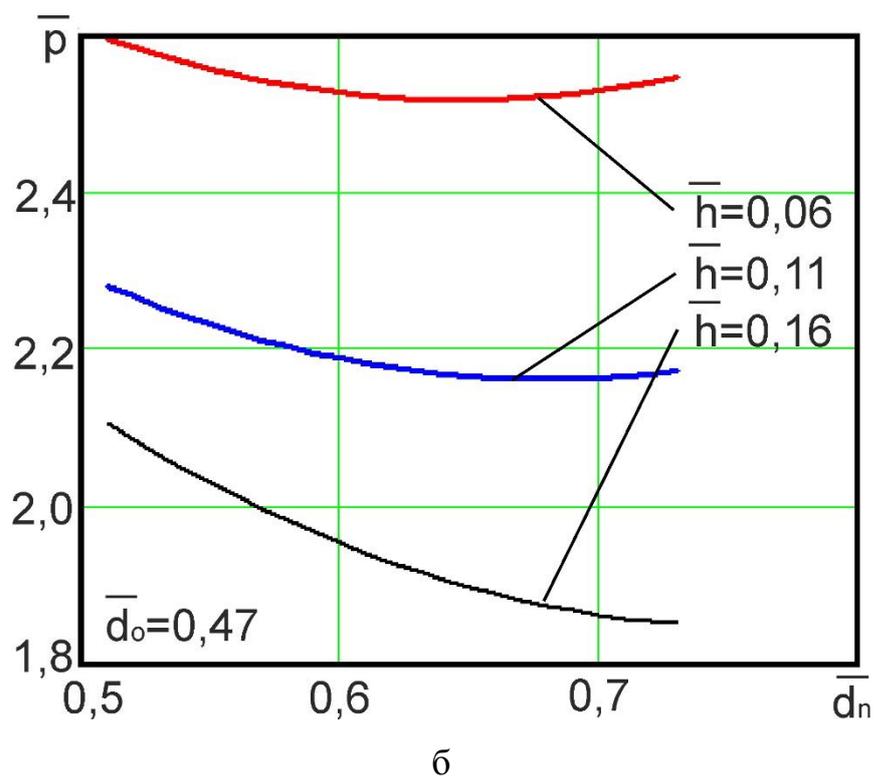
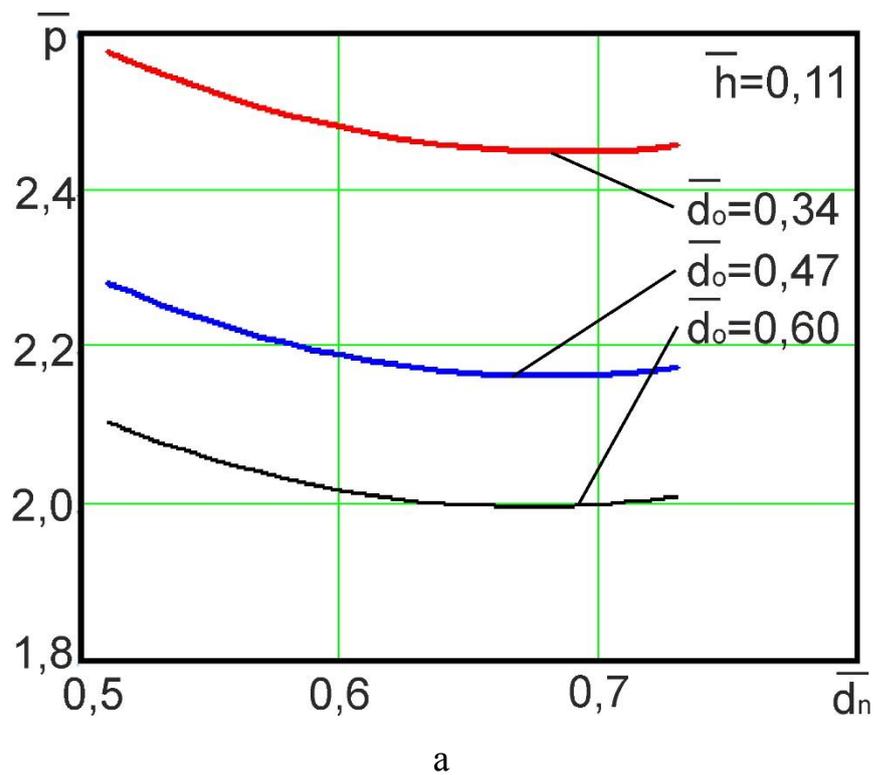


Рисунок 3.18 – График зависимости приведенного давления от диаметра пунсона при различных значениях диаметра отростка (а) и высоты фланца (б)

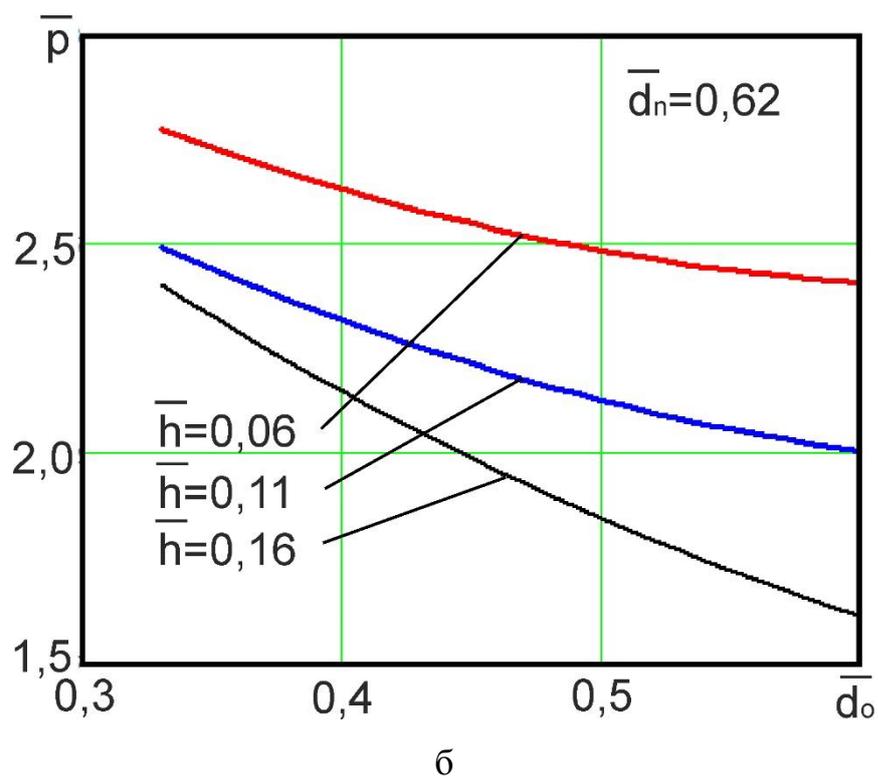
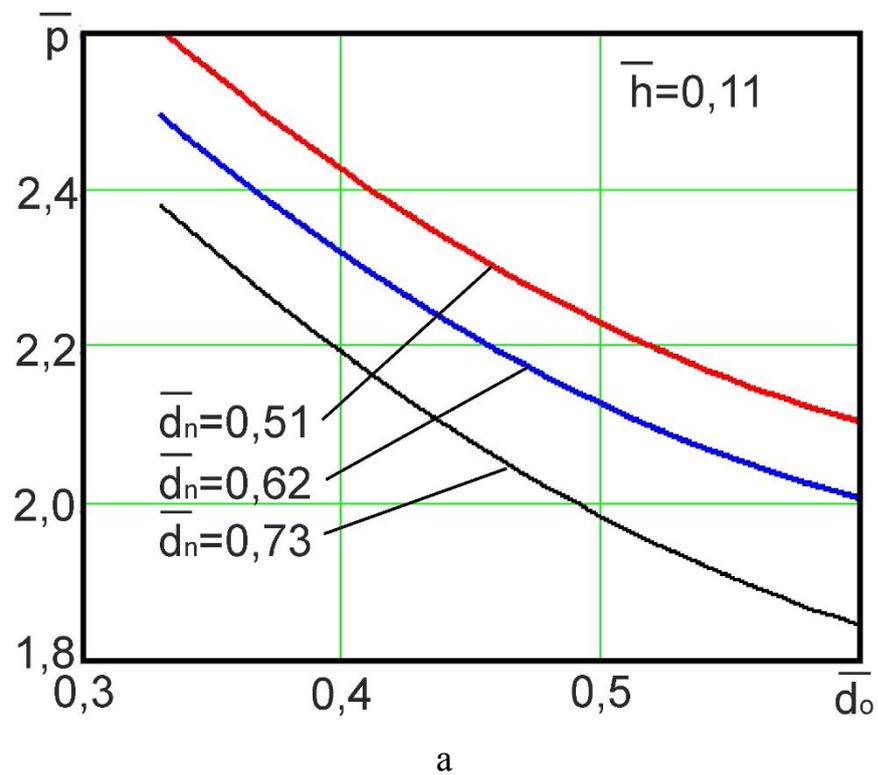


Рисунок 3.19 – График зависимости приведенного давления от диаметра отростка при различных значениях диаметра пуансона (а) и высоты фланца (б)

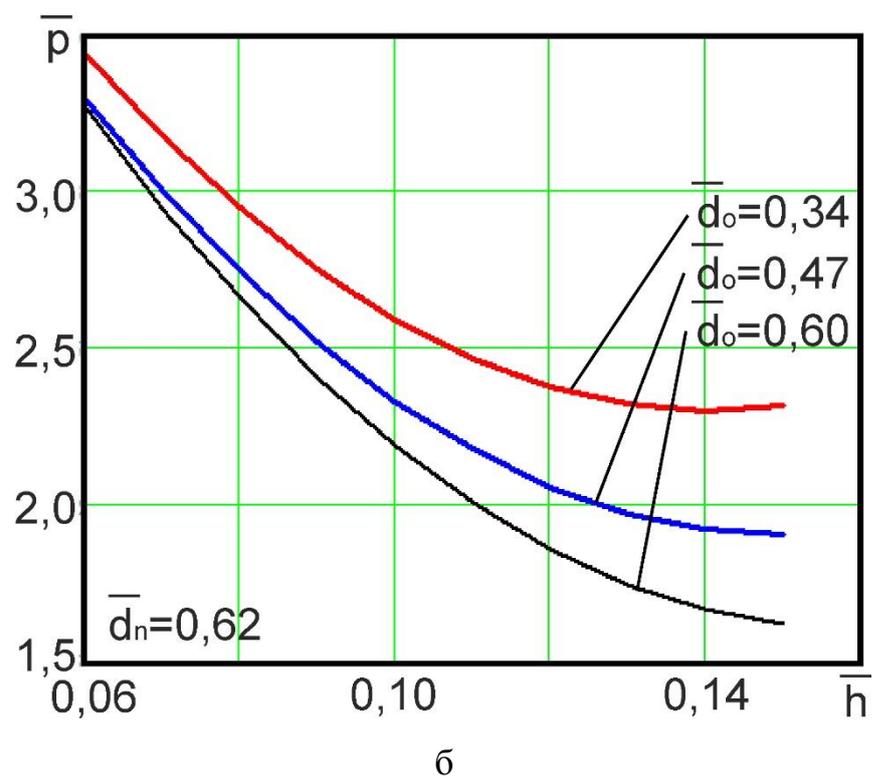
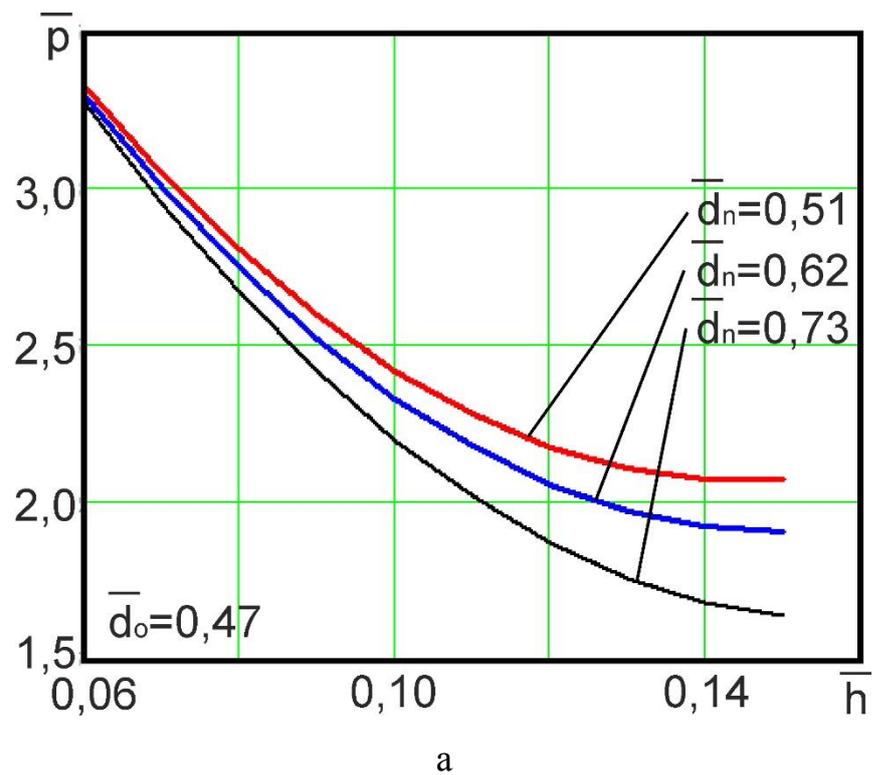


Рисунок 3.20 – График зависимости приведенного давления от высоты фланца при различных значениях диаметра пуансона (а) и диаметра отростка (б)

На рис. 3.21 показаны графики изменения приведенного давления раскрытия матрицы от относительного диаметра пуансона. На графике видно, что при значениях относительного диаметра пуансона меньше 0,65, приведенное давления уменьшается, а при значениях больше 0,65, приведенное давление начинает расти. Рост можно объяснить тем, что при увеличении относительного диаметра пуансона, увеличивается степень деформации в зоне стакана, что влечет за собой активное формирование стакана, стенки которого силой трения тянут матрицу вверх, увеличивая тем самым раскрытие матрицы.

График зависимости приведенного давления от относительного диаметра отрезка (рис. 3.22) показывает рост приведенного давления при значениях относительного диаметра отрезка меньше 0,45, а при значениях больше 0,45, приведенное давление уменьшается. Это объясняется тем, что когда диаметр отрезка больше или равен половине диаметра заготовки, то происходит активное течение металла в зону отрезка, что влечет за собой опускание матриц за счет сил трения и соответственно уменьшение приведенного давления раскрытия матриц.

Из рис. 3.23 видно, что с увеличением относительной высоты фланца приведенное давление раскрытия матриц падает. В некоторых случаях приведенное давление раскрытия может достигать значения меньше 0, это можно объяснить тем, что с увеличением относительной высоты фланца, металл не контактирует с верхней матрицей в зоне фланца, а за счет контакта заготовки с верхней матрицей опускает ее вниз.

Оценка ресурса исчерпания пластичности при комбинированном трехстороннем выдавливании.

Цель работы – исследование напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при комбинированном трехстороннем выдавливании [178, 179].

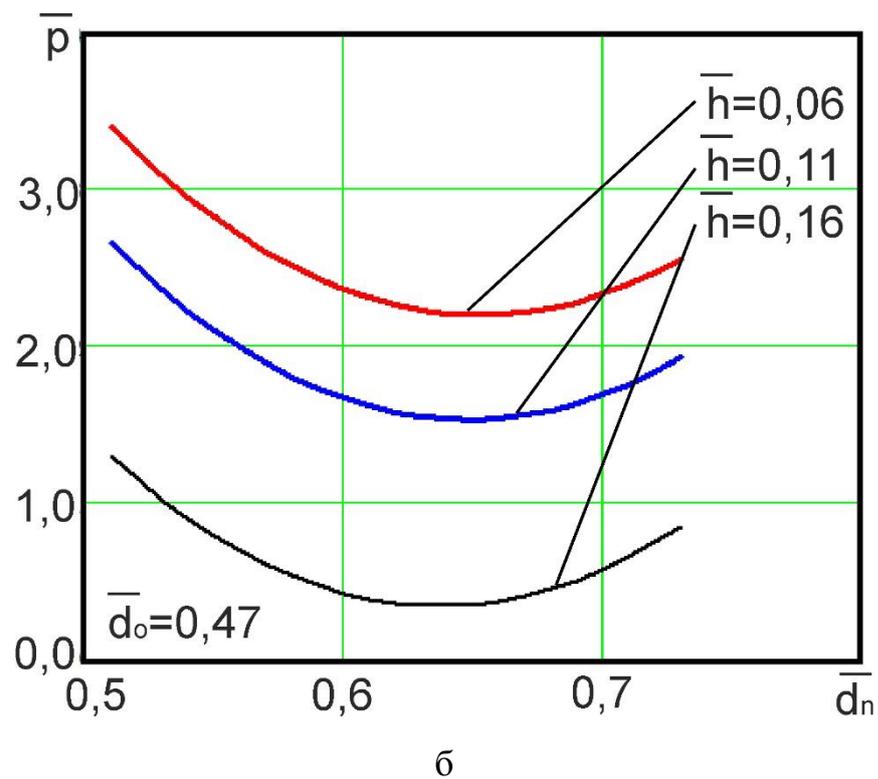
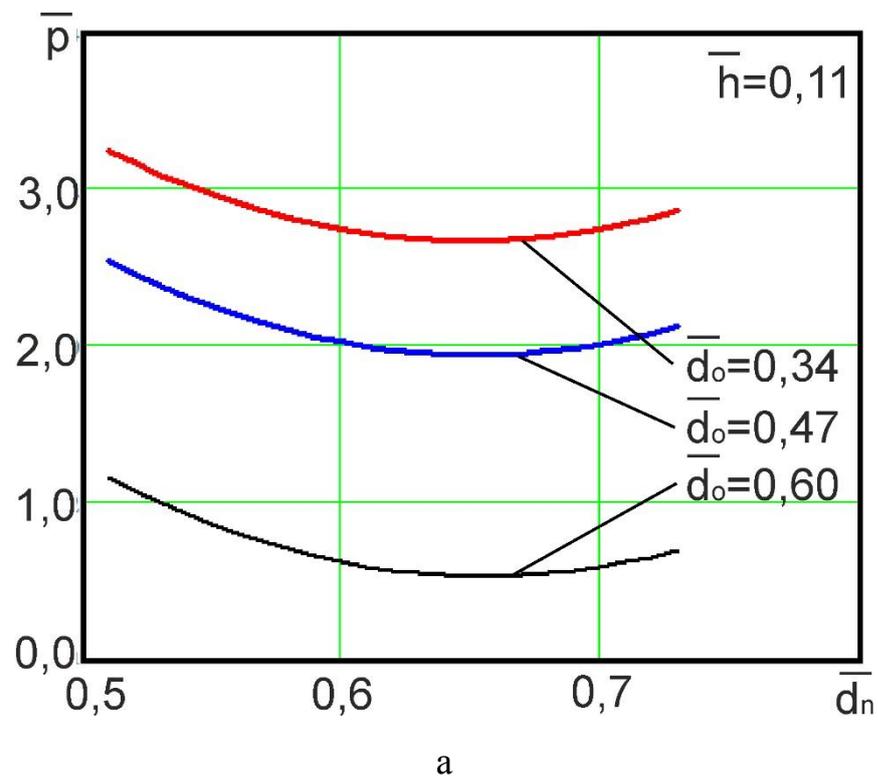


Рисунок 3.21 – График зависимости приведенного давления раскрытия матрицы от диаметра пунсона при различных значениях диаметра отростка (а) и высоты фланца (б)

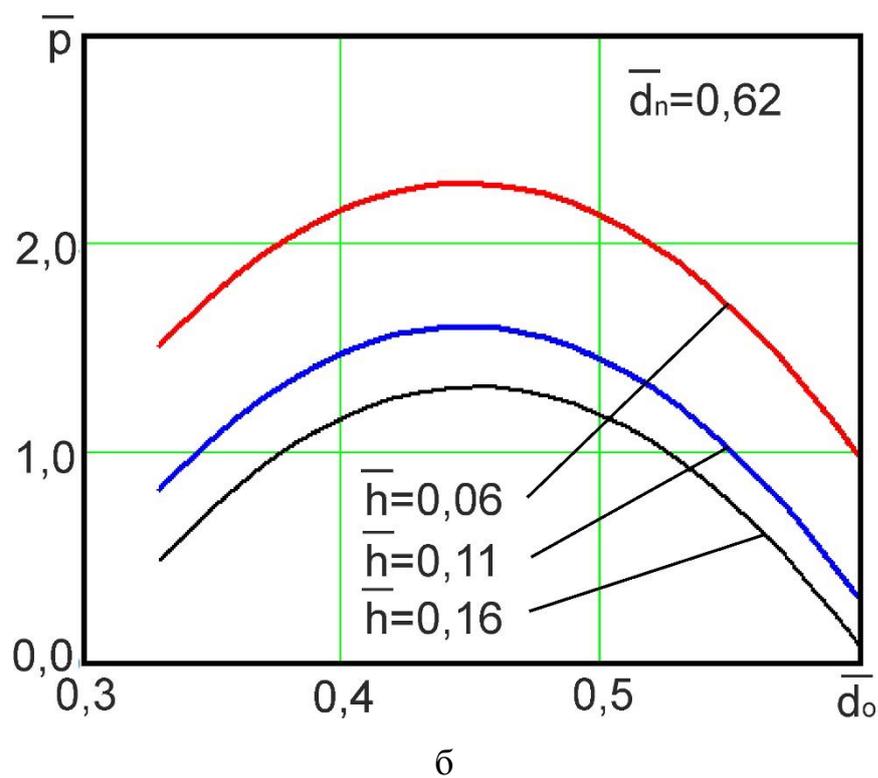
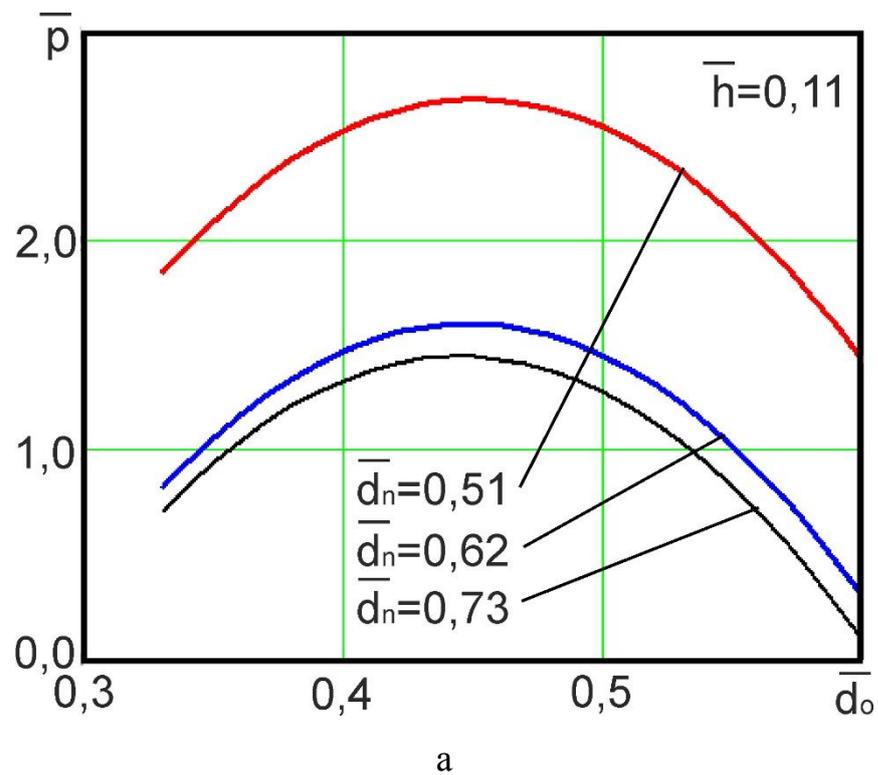


Рисунок 3.22 – График зависимости приведенного давления раскрытия матрицы от диаметра отрезка при различных значениях диаметра пуансона (а) и высоты фланца (б)

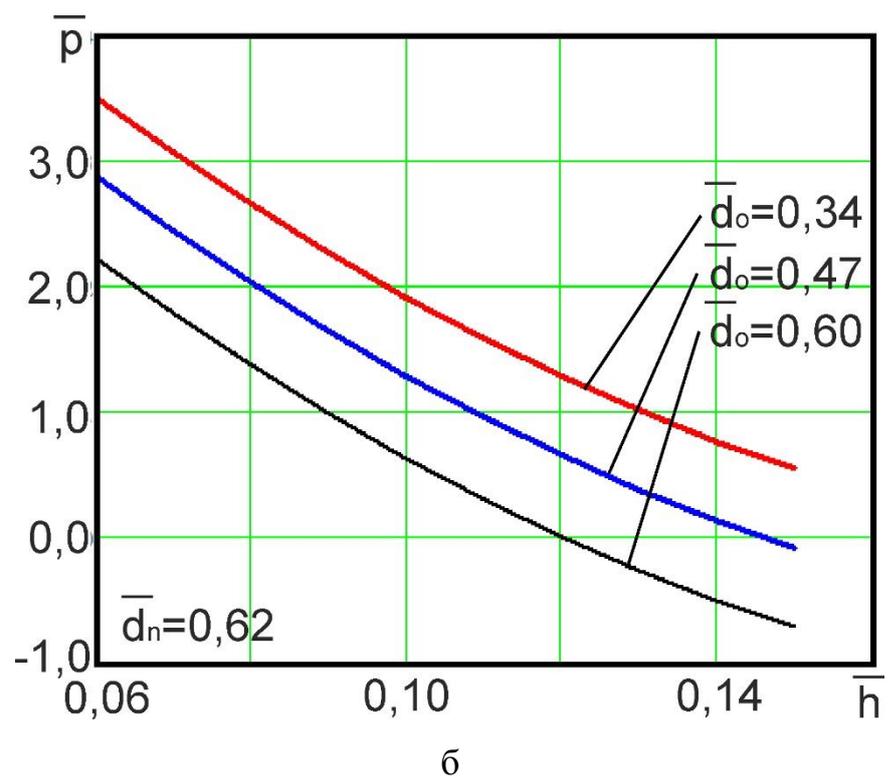
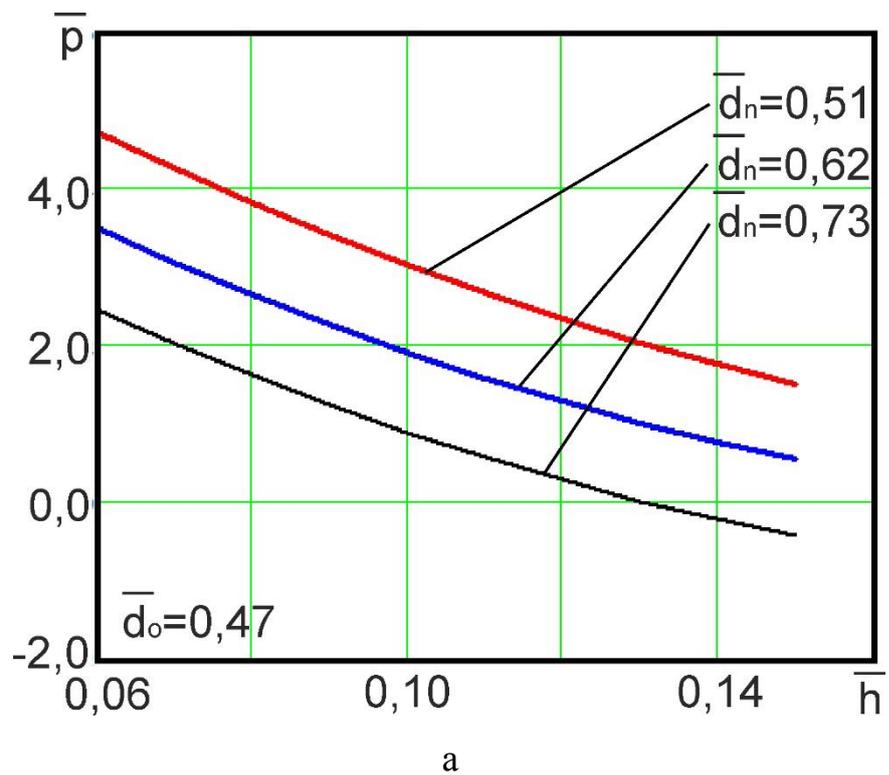


Рисунок 3.23 – График зависимости приведенного давления раскрытия матрицы от высоты фланца при различных значениях диаметра пуансона (а) и диаметра отростка (б)

Оценка значений использованного ресурса пластичности проводилась по методике, описанной во втором разделе по критерию В. А. Огородникова (2.30) [153, 154].

Для расчета, использованного ресурса пластичности в конечной элементной модели, задавалось поле трассируемых точек (по высоте 20 точек, по диаметру 50 точек) на заготовке. Рассматривались кривые построенные по трассируемым точкам N (рис. 3.24), расположенные по контуру наружного фланца (линия I), и по границам среза при радиально-прямом (линия II) и обратном (линия III) течении материала. Компоненты тензора главных напряжений, полученные решением характеристического уравнения, использовались для расчета параметров Надаи-Лоде и показателя напряженно-деформированного состояния Г.А. Смирнова-Аляева. Поверхность граничных деформаций для материала АД1 задавалась в виде $e_p(\eta, \mu_\sigma) = 1,1 \cdot e^{(0,42 \cdot \mu_\sigma - 0,51 \cdot \eta)}$ [153, 154] (приложение Г).

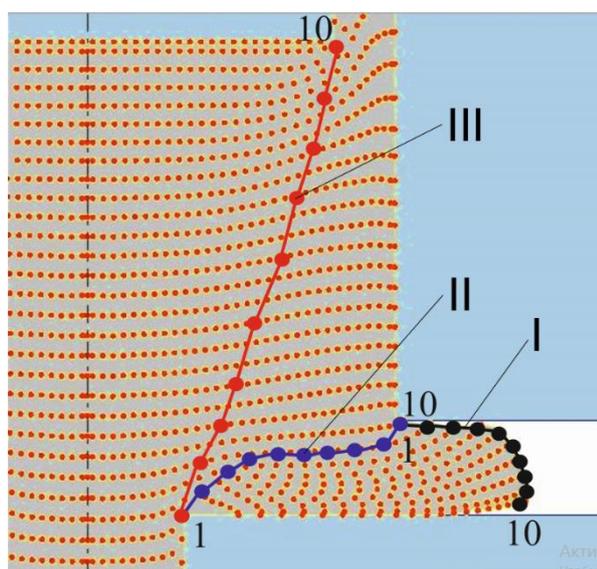


Рисунок 3.24 – Схема с принятыми кривыми для исследования истощения ресурса пластичности

Интенсивность деформации на линиях, расположенных в нижнем очаге деформации, монотонно убывает (линия I, II), а для линии III, расположенной от кромки нижней матрицы до кромки пуансона наблюдается скачек деформаций в зоне верхнего очага деформации (рис. 3.25).

Распределение значений сопротивления деформирования (рис. 3.26) соответствует распределению значений интенсивности деформаций.

Значения среднего (гидростатического) напряжения (рис. 3.27) увеличиваются. Для линии I расположенной на периферии фланца изменение напряжения выражено слабо, порядка 5 %. Рост значения напряжения, на линиях I и II, можно объяснить влиянием контактного давления у кромок инструмента.

Из решения характеристического уравнения (2.31) получены распределения главных напряжений.

Максимальные значения параметра Надаи-Лоде наблюдаются на линии II, которая расположена между кромок двух полуматриц, минимальные в зоне периферии фланца (рис. 3.28).

Показатель жесткости напряженного состояния имеет максимальные значения на наружной поверхности фланца (рис. 3.29). Наличие больших, по модулю, отрицательных значений показателя говорит о благоприятном напряженном состоянии, но при этом расчет использованного ресурса пластичности приходится производить в экстраполированной области поверхности предельных деформаций (границы построения поверхности предельных деформаций по $\eta \in -6..1$, по $\mu_\sigma \in -1..1$).

Проведенная оценка исчерпания ресурса пластичности показала, что наиболее опасной зоной является периферия фланца. Согласно анализу наиболее опасной с точки зрения разрушения является точка 1 расположенная на линии I, которая соответствует фланцу (рис. 3.30).

Дальнейший анализ показал, что при достижении в процессе деформирования значения максимальной интенсивности деформации $\epsilon_{\max}=0,75$ наступает развитие трещин (рис. 3.31).

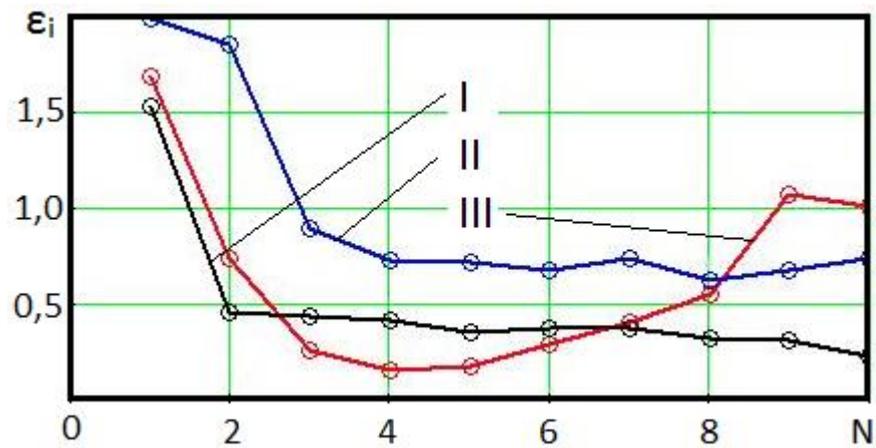


Рисунок 3.25 – График распределения интенсивности деформации в зависимости от номера трассируемой точки по сечению заготовки

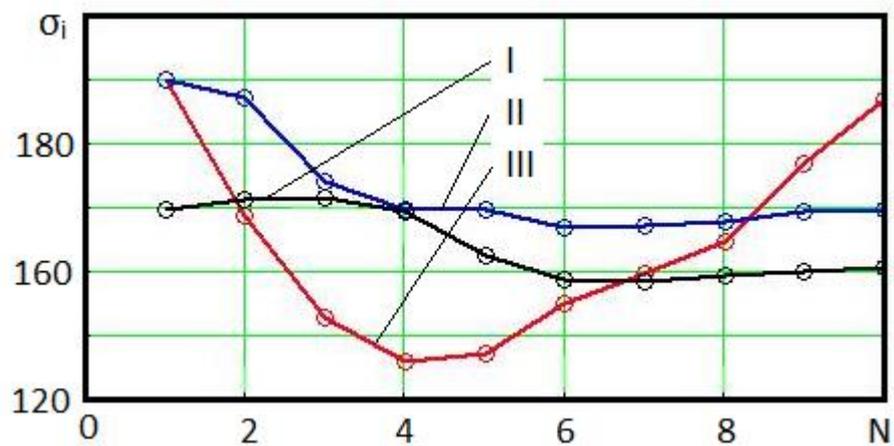


Рисунок 3.26 – График распределения сопротивления деформирования в зависимости от номера трассируемой точки по сечению заготовки

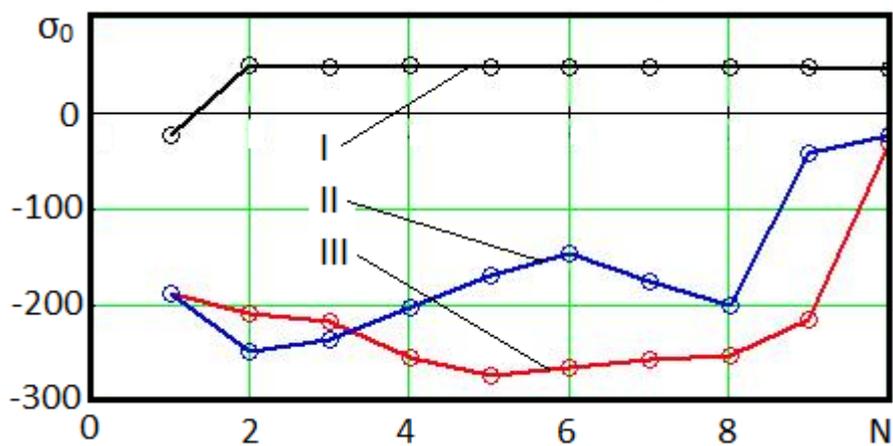


Рисунок 3.27 – График распределения гидростатического давления в зависимости от номера трассируемой точки по сечению заготовки

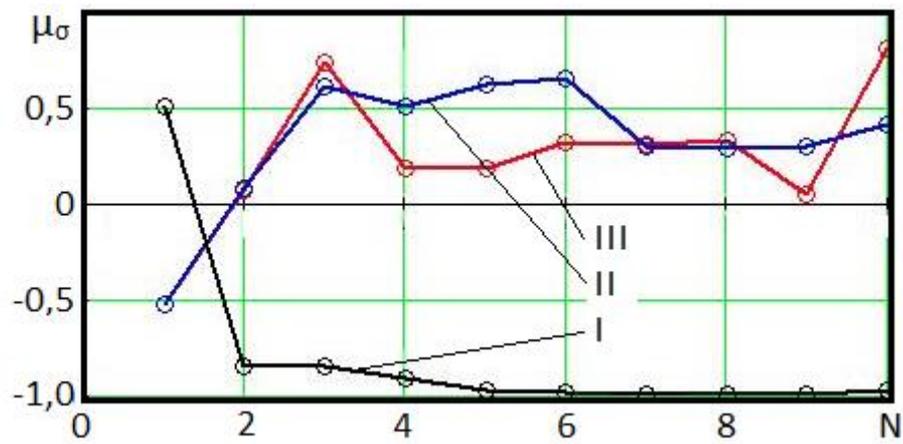


Рисунок 3.28 – График распределения параметра Надаи-Лоде в зависимости от номера трассируемой точки по сечению заготовки

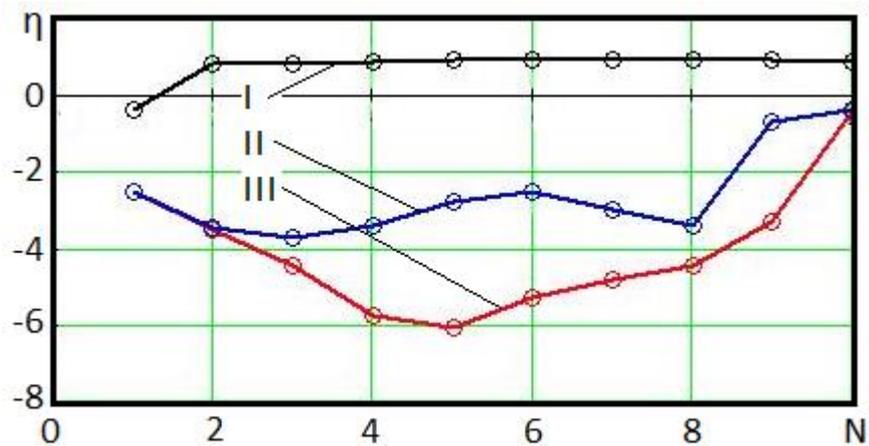


Рисунок 3.29 – График распределения показателя жесткости напряженного состояния в зависимости от номера трассируемой точки по сечению заготовки

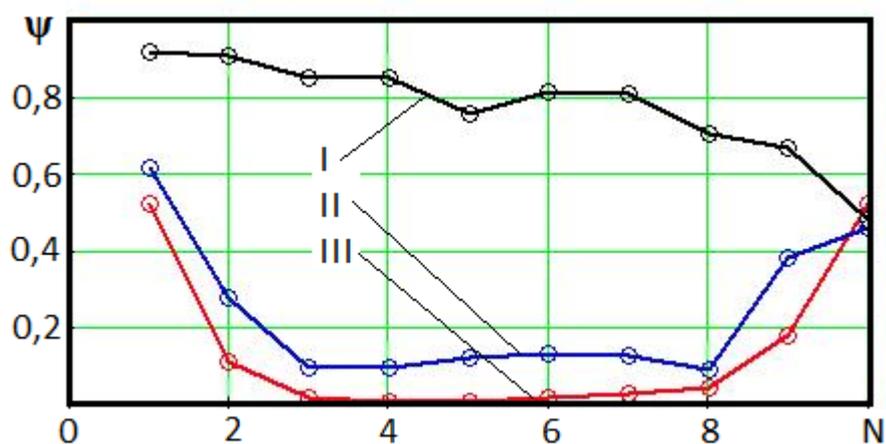


Рисунок 3.30 – График распределения ресурса пластичности в зависимости от номера трассируемой точки по сечению заготовки

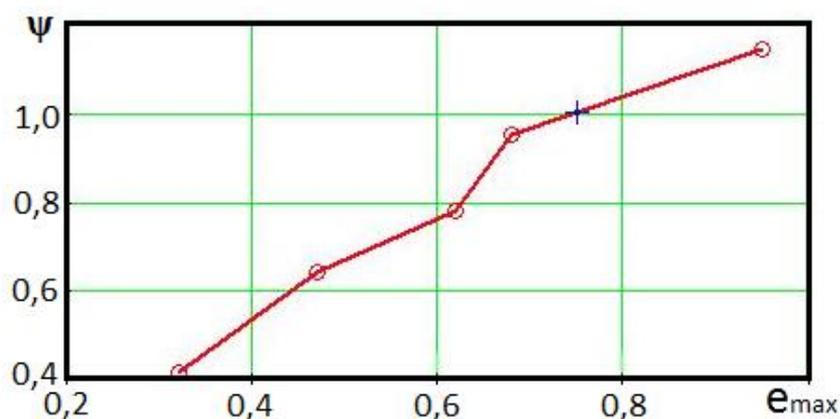


Рисунок 3.31 – График распределения ресурса пластичности в зависимости от номера трассируемой точки по сечению заготовки

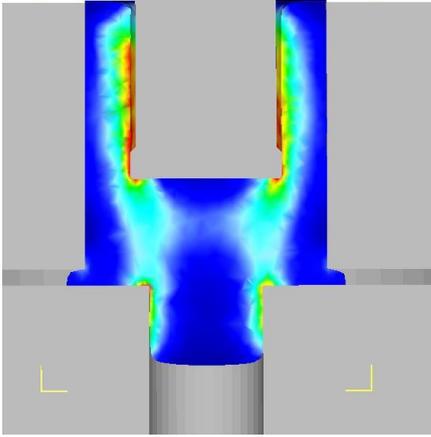
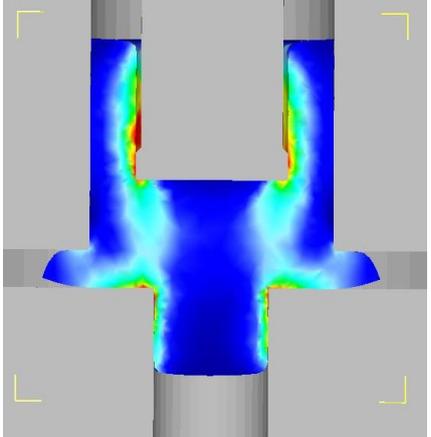
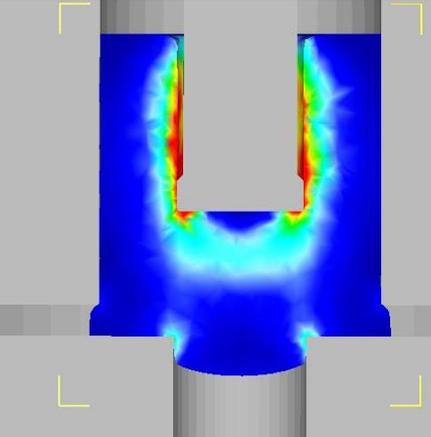
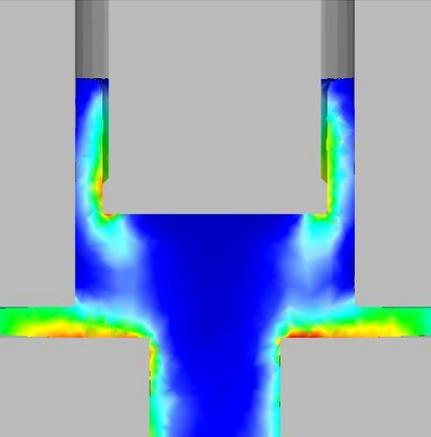
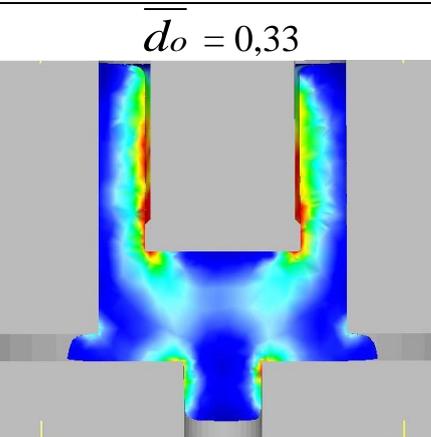
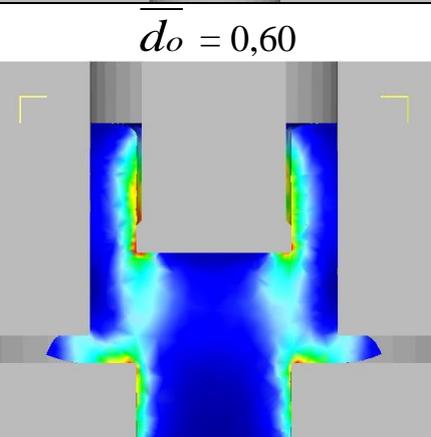
Исследование формоизменения при комбинированном трехстороннем выдавливании в DeForm3D.

На основании набора данных в программе DeForm3D можно проследить формоизменение в процессе трехстороннего комбинированного выдавливания при различных геометрических параметрах (табл. 3.7).

Из табл. 3.7 видно, что при изменении относительной высоты фланца от $h=0,06$ до $h=0,16$ длина отростка не изменяется. А вот количество металла вытекаемого в зону фланца и зону стакана изменилась. С увеличением относительной высоты фланца диаметр сформировавшего фланца увеличился, а высота стакана уменьшилась. Это можно объяснить тем, что с увеличением высоты фланца, увеличилась и степень деформации в этой зоне, что повлекло за собой возможность более свободного течения металла в зону фланца.

При увеличении относительного диаметра пуансона с $d_n=0,51$ до $d_n=0,73$ объем металла вытекаемого в зону стакана значительно уменьшился, вместе с высотой стакана. А объем металла в зоне отростка и фланца резко увеличился. Это связано с тем, что с увеличением относительного диаметра пуансона очаг деформации в зоне стакана уменьшился, что повлекло за собой затрудненное течение металла в эту зону и распределение не вытесненного объема металла в зону фланца и отростка.

Таблица 3.7 – Формоизменение в процессе комбинированного
 ВЫДАВЛИВАНИЯ

	$\bar{h} = 0,06$	$\bar{h} = 0,16$
$\bar{d}_n =$ $= 0,62$ $\bar{d}_o =$ $= 0,47$		
	$\bar{d}_n = 0,51$	$\bar{d}_n = 0,73$
$\bar{h}_\phi =$ $= 0,11$ $\bar{d}_o =$ $= 0,47$		
	$\bar{d}_o = 0,33$	$\bar{d}_o = 0,60$
$\bar{h}_\phi =$ $= 0,11$ $\bar{d}_n =$ $= 0,62$		

Увеличение относительного диаметра отростка с $d_o=0,33$ до $d_o=0,60$ способствовало увеличению объема металла в зоне отростка и незначительное увеличение объема металла в зоне фланца, а также уменьшение объема в зоне стакана.

Для исследования формоизменения по ходу процесса комбинированного трехстороннего выдавливания была выбрана схема с относительной высотой фланца $h=0,11$, с относительным диаметром отростка $d_o=0,47$ и относительным диаметром пуансона $d_o=0,73$ (рис. 3.32). Проведено исследование формоизменения при трехстороннем выдавливании по ходу процесса (рис. 3.33–3.34).

Из рис. 3.33 видно, что до величины хода пуансона 15 мм, наиболее быстро происходит увеличение размера фланца, а менее активно формируется стакан. При достижении хода пуансона 16 мм, более активно начинает формироваться отросток и стакан, а формирование фланца приостанавливается. В конце процесса видно, что наибольший размер набрал отросток, а наименьший фланец.

Однако на рис. 3.34 показано, что наибольший объем металла был вытеснен в зону фланца, а наименьший в зону отростка.

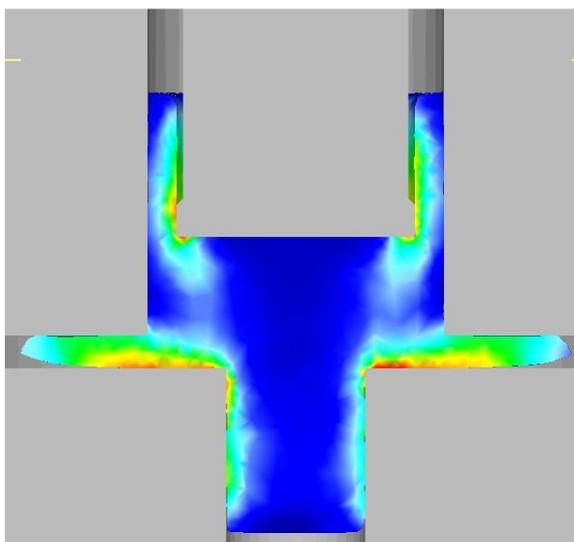


Рисунок 3.32 – Схема для исследования формоизменения при комбинированном трехстороннем выдавливании

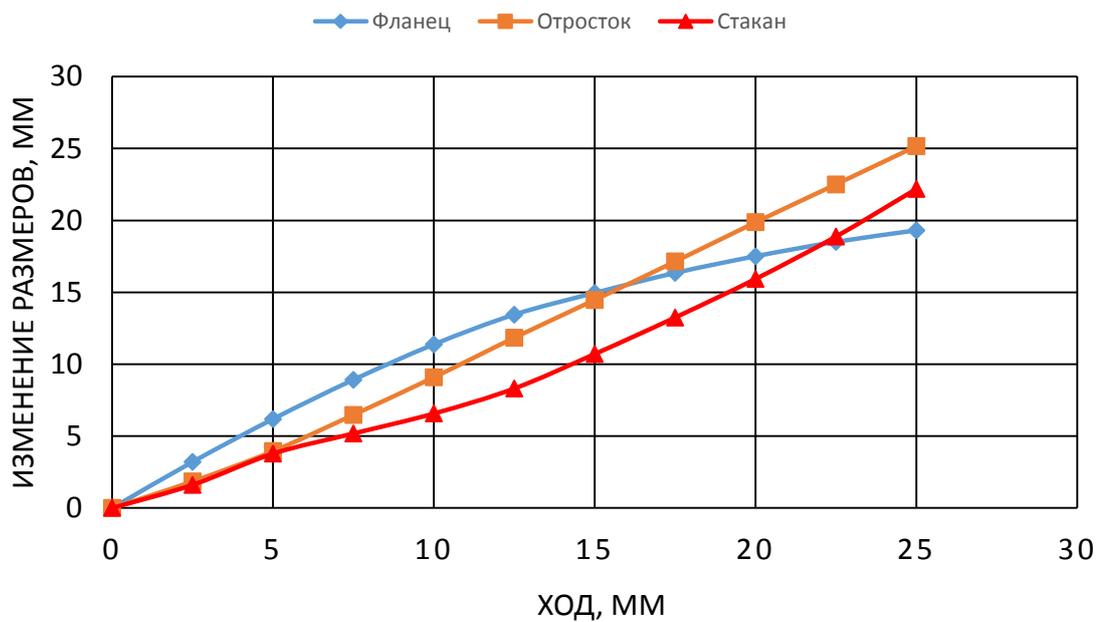


Рисунок 3.33 – Формоизменение в процессе трехстороннего выдавливания по ходу процесса

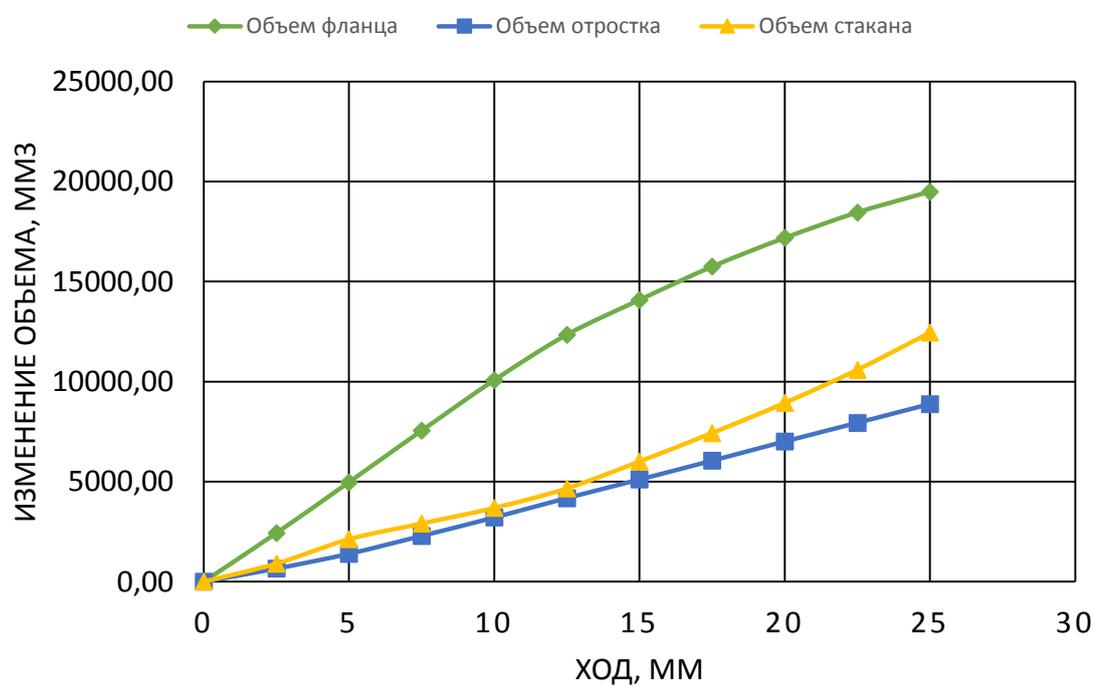


Рисунок 3.34 – Изменение объема вытесняемого металла в зависимости от хода пуансона

Теоретический анализ данных позволил оценить формоизменение полуфабриката при комбинированном трехстороннем выдавливании. В результате чего, получена диаграмма прироста линейных размеров по трем направлениям, при различных соотношениях размеров инструмента (рис. 3.35).

В ходе исследований напряженно-деформированного состояния в процессе комбинированного трехстороннего выдавливания было определено, что наибольшие деформации расположены у кромки нижней матрицы и у кромки пуансона. В схемах, которые имеют хорошую заполняемость в зоне фланца, также наблюдаются высокие деформации.

Проведя ряд моделирований, было выявлено, что зоной с наименьшей деформацией является зона торца отрезка, которая во всех схемах моделирования, не подвергается деформации (см. табл. 3.7).

Для решения этой проблемы было применено деформирование с возвратно-поступательным течением материала в зону отрезка.

Для подтверждения, был проведен анализ методом конечных элементов, который качественно подтвердил предположение (рис. 3.36).

Был проведен сравнительный анализ процессов комбинированного двухстороннего и трехстороннего выдавливания. Для исследования использовалось программное обеспечение DeForm 3D. Были рассмотрены следующие схемы двухстороннего выдавливания – обратно–прямое, обратно-радиальное, радиально-прямое и схема трехстороннего выдавливания (рис. 3.37). Исходные размеры заготовок принимались: диаметр 45 мм, высота 45 мм. Геометрические размеры инструмента для всех схем деформирования принимались равными: диаметр отрезка 21 мм, высота фланца 5 мм и толщина стенки стакана 4,5 мм.

В исследовании проводился сравнительный анализ усилия процесса разных схем комбинированного выдавливания с использованием материала АД31, коэффициент трения по Зибелю принимался равный 0,08.

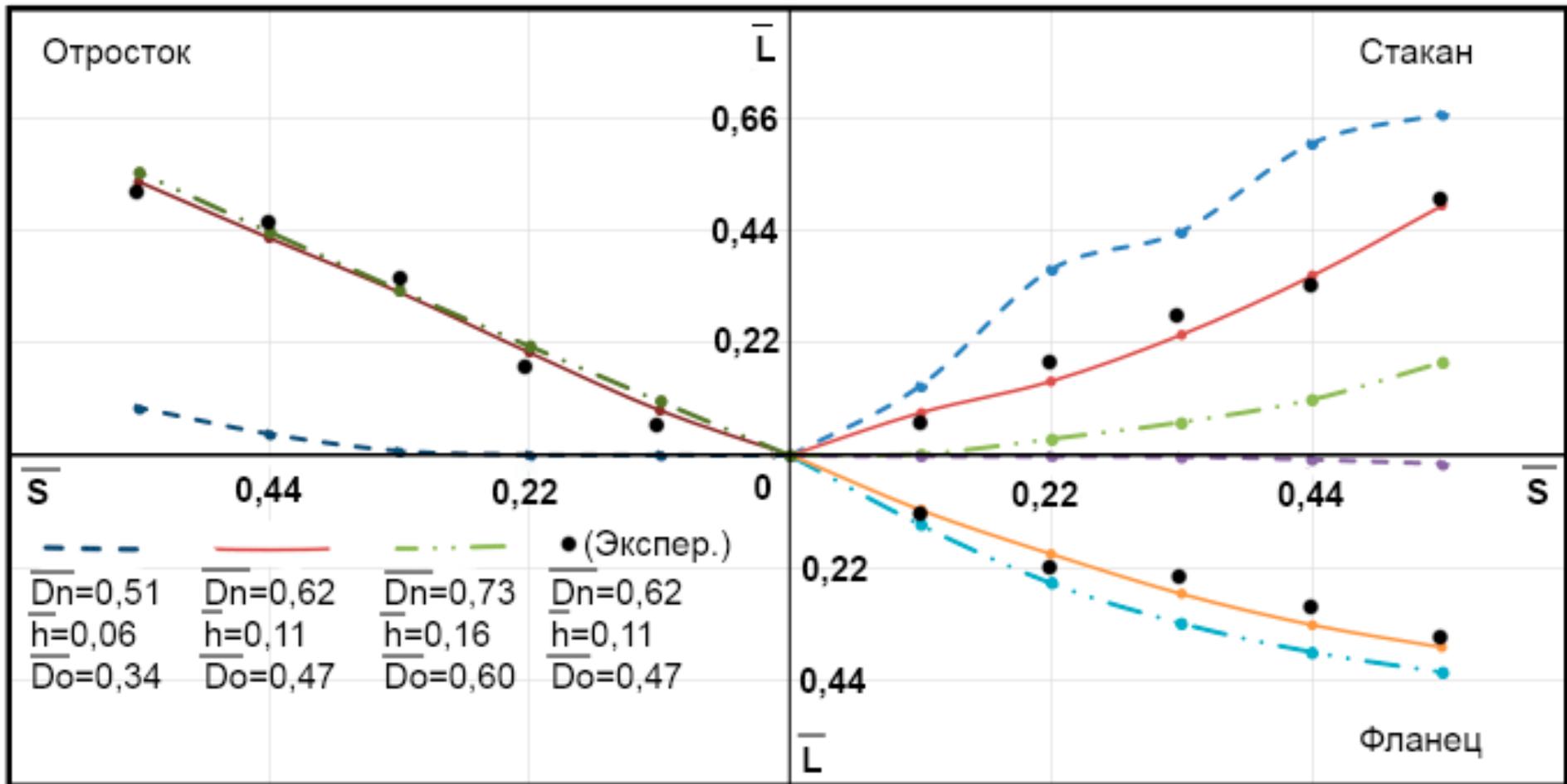
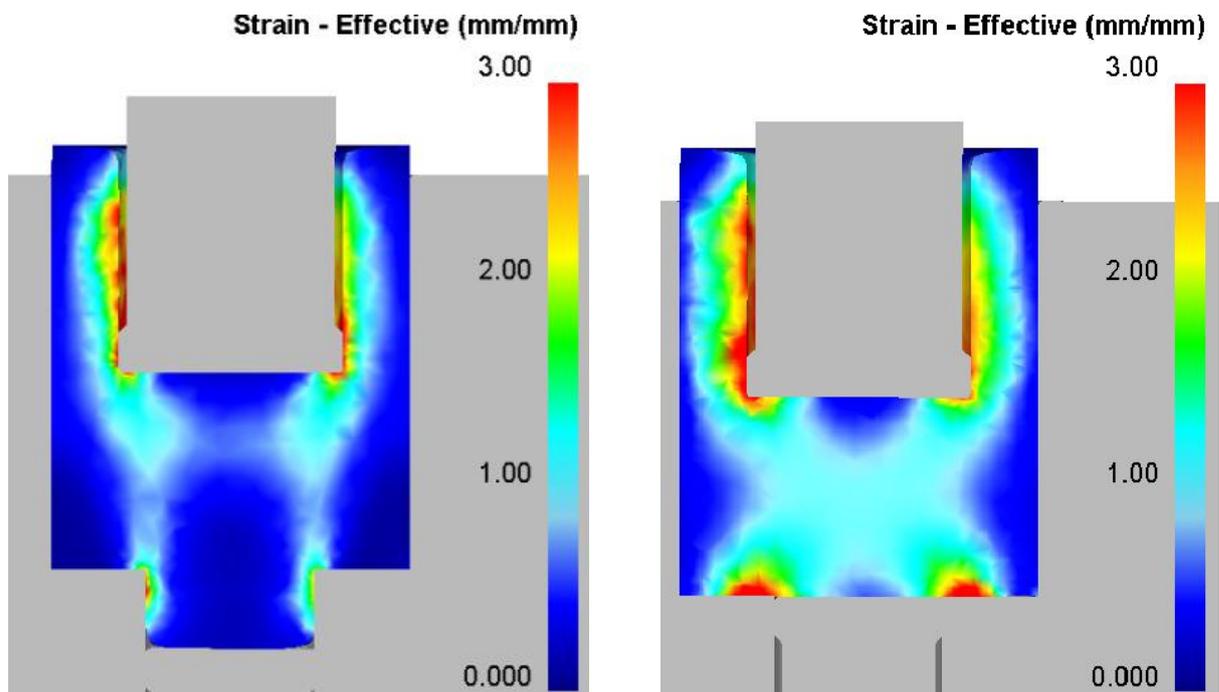
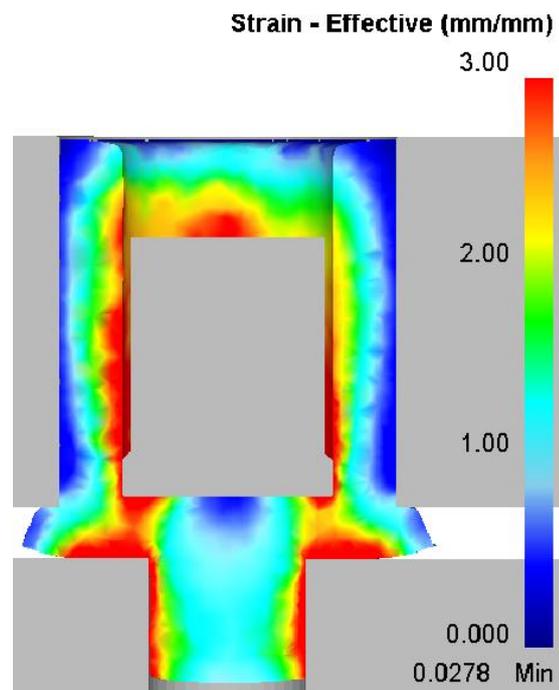


Рисунок 3.35 – Анализ формоизменения заготовки при комбинированном трехстороннем выдавливании ($\bar{L} = L/d_m$ – относительный линейный прирост размеров; $\bar{S} = S/d_m$ – относительный ход пуансона)



а

б



в

Рисунок 3.36 – Качественная проработка структуры на основе предложенного способа (а – первый этап; б – второй этап; в – трехстороннее выдавливание)

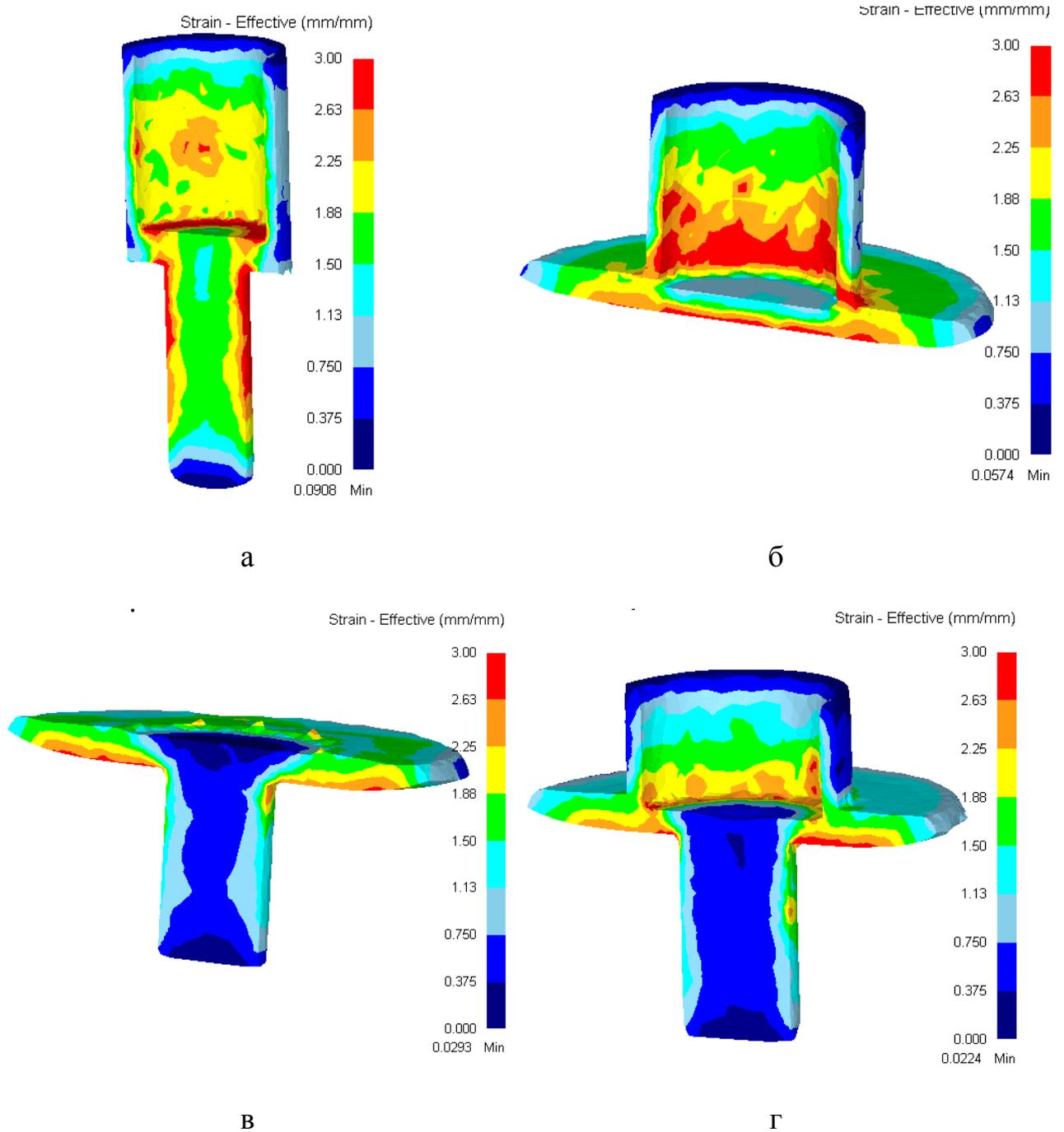


Рисунок 3.37 – Степень деформации при комбинированном выдавливании: а – обратное-прямое выдавливание; б – обратное-радиальное выдавливание; в – радиально-прямое выдавливание; г – трехстороннее выдавливание

На рис. 3.37 показано распределение степени деформации по сечению полуфабриката. Более однородная проработка материала наблюдается при протекании обратно–прямого и радиально–обратного выдавливания. При применении комбинированного трёхстороннего способа деформирования наблюдается более качественная проработка фланцевой части заготовки.

На рис. 3.38 представлен совмещенный график усилий комбинированного выдавливания. Изменение усилий для радиально-прямого и трехстороннего выдавливания на первом этапе (основное формирование фланца и стакана) имеет похожий характер. На втором этапе, когда металл при трехстороннем выдавливании начинает интенсивно течь в отросток, усилие снижается. Это можно объяснить большим количеством степеней свободы течения материала. А рост усилия при радиально–прямом деформировании на втором этапе связано со значительным уменьшением очага деформации, а соответственно уменьшением степени деформации.

Таким образом, можно отметить целесообразность использования трехстороннего комбинированного выдавливания и преимущество данного вида над процессами с двумя степенями течения материала.

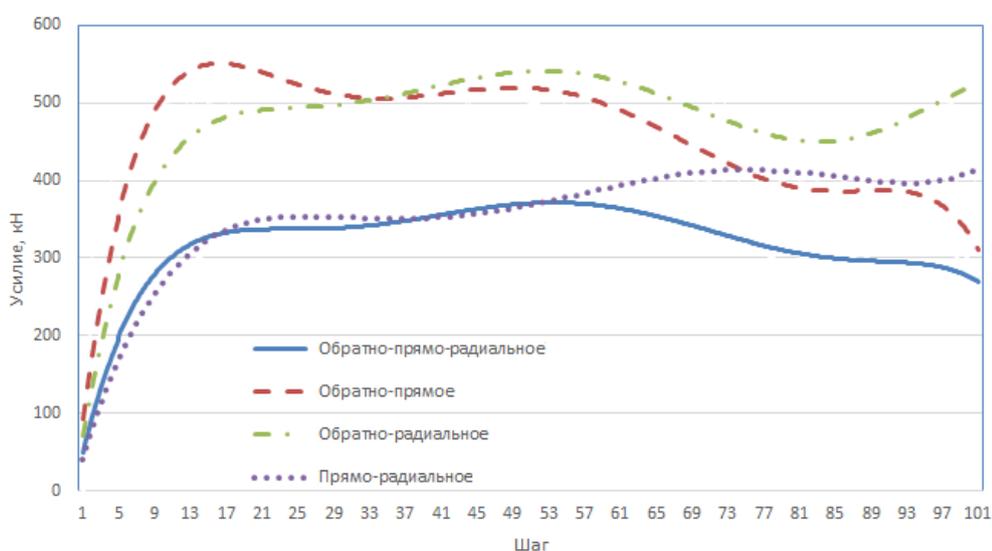


Рисунок 3.38 – Совмещенный график усилия комбинированного выдавливания

Сравнение процессов комбинированного трехстороннего выдавливания с фасками и без фасок на инструменте.

В качестве метода для сравнения схемы комбинированного трехстороннего выдавливания учитывающую фаски на инструменте и схемы не учитывающей фаски на инструменте был выбран метод конечных элементов.

Проведен сравнительный анализ энергосиловых параметров при трехстороннем выдавливании заготовки по схеме с фасками и без (рис. 3.39). Установлено, что максимальное усилие при деформировании по двум схемам имеет незначительное отклонение (до 5%), но установлено, что в начале процесса сила выдавливания по схеме с фасками ниже, что объясняется большей свободой истечения металла. При достижении хода пуансона 15 мм, меньшим становится усилие выдавливания для схемы без фасок, что можно объяснить уменьшением поверхности трения.

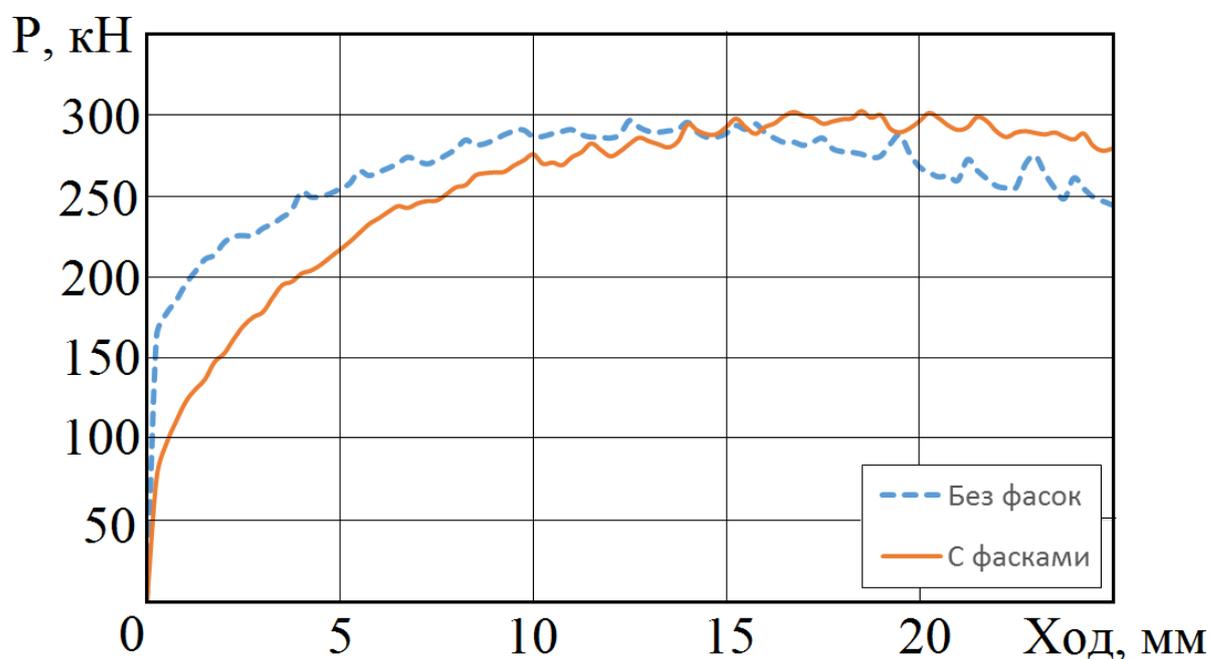


Рисунок 3.39 – График зависимости усилия от хода процесса для разных схем деформирования

Анализ формоизменения заготовки показал, что наличие фасок на всех инструментах способствует течению металла в зону фланца и отростка и уменьшает течение металла в стенку стакана (рис. 3.40), таким образом, что радиус фланца увеличивается на 2,15%, длина отростка на 4,06%, а высота стакана уменьшается на 14,48%. Однако, наличие фасок только на пуансоне или нижней матрице не значительно влияет на формоизменение детали, а наличие фаски на верхней матрице, при отсутствии фасок на других инструментах, способствует течению металла в зону фланца и отростка и уменьшению линейного размера зоны стакана.

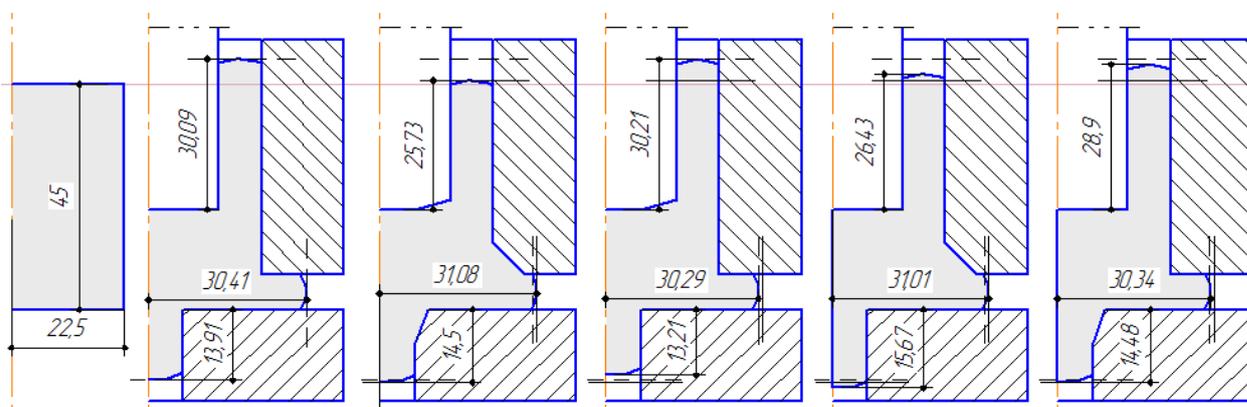
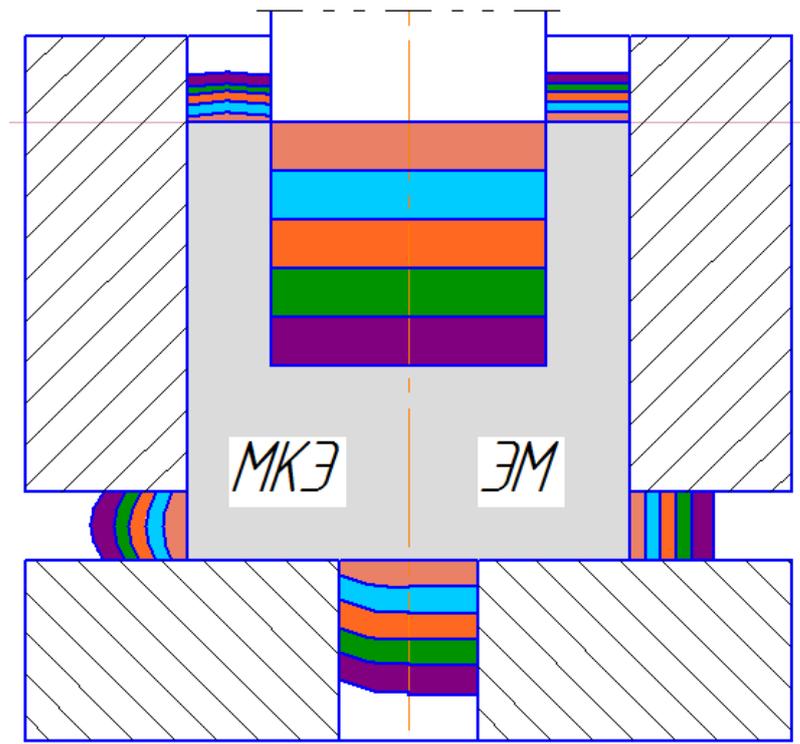


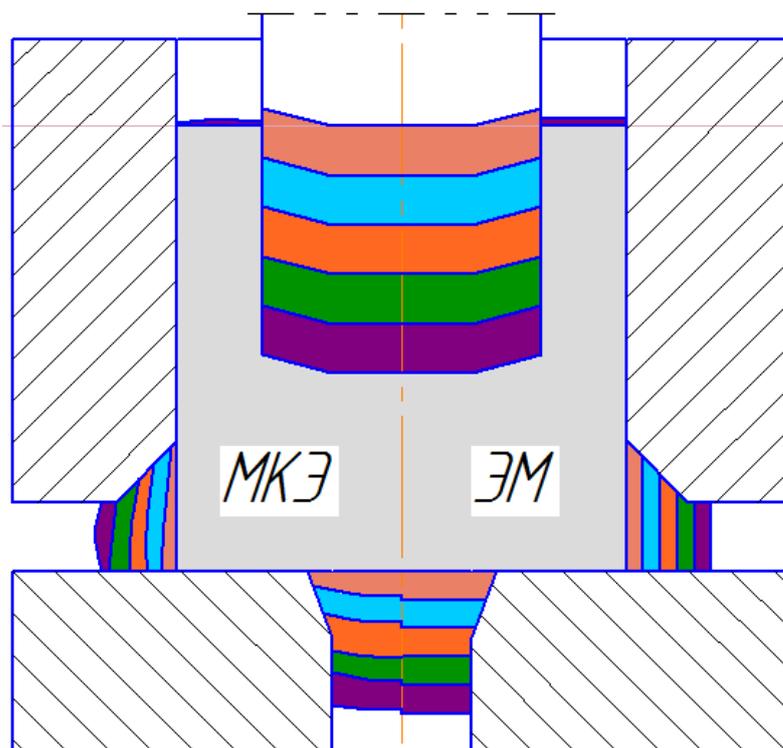
Рисунок 3.40 – Влияния фасок инструмента на формоизменение заготовки

Проведено сравнение конечного формоизменения заготовки по ходу процесса, полученные методом конечных элементов и энергетическим методом баланса мощностей (рис. 3.41). Сравнение проведено для схемы не учитывающей фаски на инструменте (см. рис. 3.41, а) и для схемы с учетом фасок на инструменте (см. рис. 3.41, б).

Сопоставление полученных результатов показывает расхождение приращений детали не более 7%. Более завышенные результаты получены энергетическим методом баланса мощностей, что связано с большим количеством допущений при расчете.



а



б

Рисунок 3.41 – Приращение линейных размеров заготовки по ходу деформирования (а – схема не учитывающая фаски на инструменте; б – схема учитывающая фаски на инструменте)

Выводы по разделу

1. Энергетическим методом разработана уточненная математическая модель процесса комбинированного трехстороннего выдавливания, позволяющая определить силовые параметры процесса с учетом кинематики выдавливания и реальной формы очага деформации. Установлено, что поля скоростей учитывающие фаски на инструменте более точно отображают реальность протекания процесса.

2. Впервые энергетическим методом баланса мощностей получены аналитические зависимости приведенного давления деформирования от геометрических параметров процесса $\bar{p} = f(\bar{R}_1, \bar{R}_n, \bar{R}_k, \bar{R}_o, \bar{R}_m, \bar{h}_i, \alpha, \beta, \gamma)$ для схемы с прямоугольными модулями и схемы учитывающей наличие фасок на инструменте (с трапецидальными модулями). Установлено, что значения приведенного давления деформирования и раскрытия матриц при деформировании в инструменте с фасками выше на 7-10% по сравнению с применением инструмента без фасок.

3. Разработаны на основе установленных экспериментально полях деформаций расчетные модели процесса комбинированного радиально-обратно-прямого выдавливания деталей типа «стакан с фланцем и отростком» с разъединенным очагом деформации с наличием промежуточной недеформируемой зоны, с верхним очагом деформации обратного выдавливания и нижним присоединенным очагом радиально-прямого выдавливания, который в свою очередь характеризуется наличием границы раздела течения материала в радиальном и прямом направлении. На основе минимума энергетических затрат установлены значения параметра t , определяющего положение границы раздела течения металла в нижнем очаге деформации радиально-прямого выдавливания, который равен $t=0,23$ для схемы не учитывающей наличие фасок на инструменте и $t=0,25$ для выдавливания в инструменте с фасками.

4. На основе МКЭ получен массив данных для определения энергосиловых параметров процесса комбинированного трехстороннего выдавливания. Методом планирования эксперимента получены зависимости и построены графики приведенного давления выдавливания и приведенного давления раскрытия матриц от геометрии инструмента, которые показали характер изменения показателей процесса схожий с результатами, полученными энергетическим методом баланса мощностей. Данные, полученные МКЭ, в среднем на 12% меньше результатов по энергетическому методу.

5. На основе МКЭ и ЭМ установлены закономерности приращения геометрических размеров и объемов конфигурационных частей полуфабриката на основе разработанной расчетной схемы осесимметричного деформирования в качестве оценки возможностей данного способа изготовления деталей с фланцем и отростком. При наличии фасок на инструменте приращение радиуса фланца увеличивается на 2,15%, длины отростка - на 4,06%, а высота стакана уменьшается на 14,48%. При наличии фаски только на пуансоне линейный размер высоты стакана увеличивается, а фланца уменьшается не более чем на 0,5%. Длина отростка при этом уменьшается на 5%. Наличие фаски только на нижней матрице в зоне отростка способствует увеличению длины отростка на 4% и уменьшению высоты стакана и линейного размера фланца на 3,95% и 0,3% соответственно. С учетом фаски только на верхней матрице и в зоне радиального выдавливания линейный размер фланца увеличивается на 2%, также увеличивается и длина отростка на 11,2%, а высота стенки стакана уменьшается на 12,1%.

6. С использованием МКЭ проведена оценка исчерпания ресурса пластичности заготовок. Определены опасные зоны с точки зрения разрушения, которые находятся между переходными кромками инструмента и на периферии фланца. Установлено, что наиболее опасной с точки зрения разрушения является периферия фланца и при достижении степени

деформации $\epsilon_{\max}=0,75$ наступает разрушение фланца.

7. Методом конечных элементов получены имитационные модели, подтверждающие результаты оценки формообразования, а также возможность управления процессом приращения линейных и объёмных частей детали за счет использования фасок на инструментах.

8. По результатам моделирования определена зона, которая не подвергается деформации при выдавливании – осевая часть отростка детали. С использованием возвратно-поступательного течения материала в отросток обеспечена равномерная проработка всех структурных частей детали.

9. Проведен сравнительный анализ способов комбинированного выдавливания с двумя и тремя степенями свободы истечения материала. Доказана целесообразность использования трехстороннего комбинированного выдавливания и преимущество данного вида над процессами с двумя степенями течения материала.

РАЗДЕЛ 4

ЭСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ФЛАНЦЕМ

В данной главе целью экспериментальных исследований является оценка адекватности построенных математических моделей в результате теоретических исследований, выведение экспериментальных закономерностей по формоизменению которые не поддаются математическому решению.

Определение особенностей формоизменения, анализ силового режима радиально-прямого выдавливания — это сведения, необходимые для прогнозирования качества изготавливаемых данным способом деталей.

Для проведения экспериментов и для проверки приемлемости полученных расчетных выражений была разработана универсально-переналаживаемая оснастка (рис. 2.6), которая устанавливается на гидравлические пресса (см. рис. 2.4).

4.1 Исследование напряженно-деформированного состояния при комбинированном трехстороннем выдавливании деталей с фланцем и отростком

Важным элементом для определения энергосилового режима процесса деформирования, оценки деформируемости и степени использования запаса пластичности материала, является определение формоизменения и анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) при комбинированном выдавливании. В ряде работ отображено исследование напряженно-деформированного состояния для комбинированного двухстороннего выдавливания. Однако, применительно к комбинированному трехстороннему

выдавливанию полученные ранее данные требуют дополнительного более полного исследования.

Для полного анализа НДС при трехстороннем выдавливании могут быть использованы методы экспериментального исследования и математического моделирования, а также их комбинация. Экспериментальные методики вычисления деформированного состояния основаны на соотношениях теории конечных деформаций. Сопоставление конечной формы и размеров ячейки делительной сетки с её исходной формой и исходными размерами позволяют оценить деформированное состояние заготовки после деформации. В процессе расчета принимаются допущения о монотонном протекании процесса формоизменения материальной точки, как условие связи между напряжённым и деформированным состояниями.

Экспериментальные исследования позволяют проводить анализ конечного и предельного формоизменения на основе определения напряженно-деформированного состояния, проверку расчетных зависимостей, выведенных в результате теоретического анализа, и разработку эмпирических моделей процесса радиального выдавливания, отображающих геометрические параметры процесса и механические свойства деформируемых материалов.

Важные сведения, необходимые для прогнозирования качества штамповок, оценки деформируемости и степени использования запаса пластичности материала, а также для расчетов энергосилового режима процессов деформирования позволяет получить оценка особенностей формоизменения и анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) выдавливаемого образца [180].

Исследования деформированного состояния проведено с помощью метода координатных сеток. Для экспериментального анализа были использованы образцы диаметрами 28,2 мм, 36 мм и 45 мм изготавливались из материалов: свинцового сплава $C1 + 2\%Sb$, алюминиевых сплавов АД1 и АД31 при $H_3 = D_3$, $D_{II} = 21,2; 28,2; 36,2$ мм, $H_{\Phi} = 3; 5; 7$ мм, $D_o = 14; 21; 28$ мм.

В качестве смазки для алюминиевого сплава использовался бараний жир, для свинца минеральное масло И-20А. Результаты комбинированного выдавливания С1 (рис. 4.1) и АД1 (рис. 4.2) для детали с фланцем и отростком.



Рисунок 4.1 – Поэтапное формоизменение заготовки из свинца С1



Рисунок 4.2 – Поэтапное формоизменение заготовки из алюминиевого сплава АД1

Для исследования напряженно-деформированного состояния использовались составные заготовки из свинца С1 (с нанесенной сеткой с шагом 2,1 мм) и материала АД1 и АД31 (с нанесенной сеткой с шагом 1 мм).

Исходя из картины деформирования координатной сетки (рис. 4.3, 4.4), можно сделать предположение о наличии промежуточной жёсткой зоны, материал в которой практически не деформируется. Истечение металла в зазор между пуансоном и верхней матрицей и в зону фланца и отростка осуществляется из двух очагов деформации, разделённых зоной (что подтверждает принятые допущения при теоретическом расчете

энергетическим методом баланса мощностей). Характерной особенностью данного процесса является то, что высоты данных очагов деформации практически не меняются по ходу процесса, что достигается за счёт расходования металла промежуточной жёсткой зоны. При дальнейшем деформировании наступает момент полного вырождения промежуточной зоны и объединения верхнего и нижнего очагов деформации. Такое явление хорошо можно проследить на картине деформирования, показанной на рис. 4.5. Вырождение зоны приводит к появлению больших сдвиговых деформаций, которые проходят между кромками верхней и нижней матрицы.

Анализ картины искажения делительной сетки позволил четко определить расположение и форму очагов деформации: один из которых расположен между пуансоном и верхней матрицей в формируемой стенке стакана и второй, которой формируется при радиально-прямом истечении материала, Элементы сетки, примыкающие к стенке матрицы, претерпевают сжатие в радиальном направлении, т.е. вытягиваются вверх. Искажения сетки в промежуточной зоне практически не происходит (по ходу процесса высота данной зоны уменьшается).

Моделирование полученное в результате конечноэлементного анализа и эксперимента дало качественное совпадение деформированного состояния.

После сканирования деформированной сетки и обработки изображения, были определены координаты узлов ячеек сетки. Вычисление значений главных компонент деформаций в плоскости меридионального сечения e_z и e_r , тангенциальной компоненты деформации e_θ , сдвиговой деформации γ_{rz} , интенсивности логарифмической деформации e_i производилось по формулам, приведенным разделе 2. Вычисление компонент деформаций производилось в пакете EXCEL, а обработка полученных данных производилась в пакете MathCAD. Полученные результаты позволяют сделать расчёты приращения компонент деформации по методике И. П. Ренне и получить количественную оценку поэтапного изменения деформированного

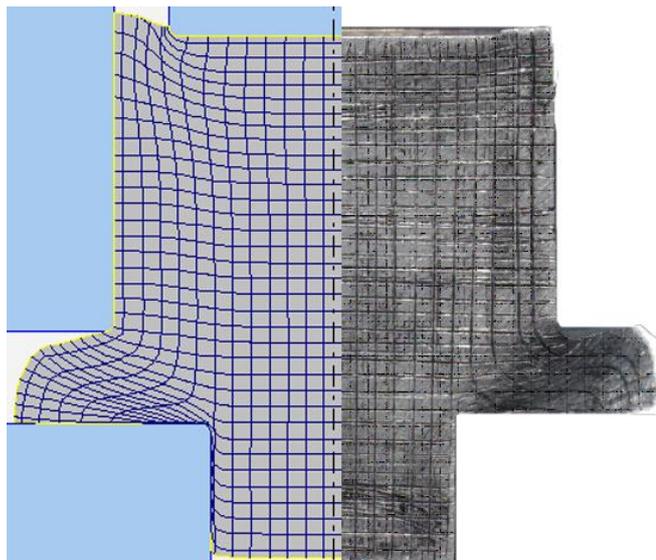
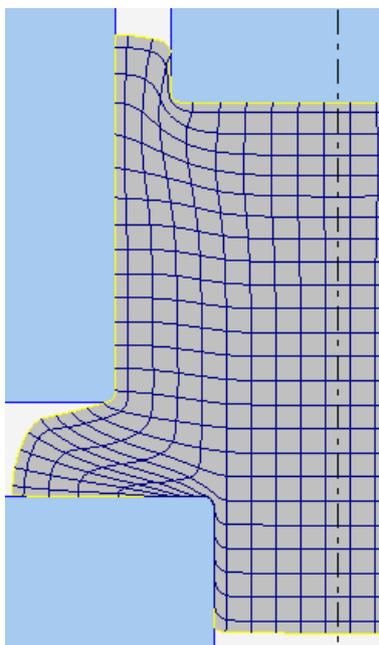
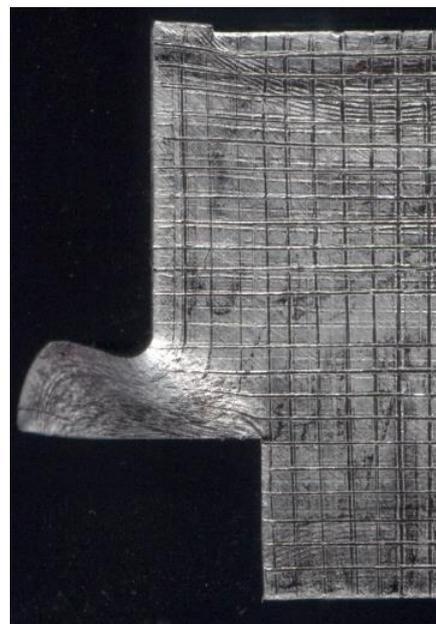


Рисунок 4.3 – Сравнение координатных сеток (шаг сетки 1 мм), полученных в пакете QForm и в ходе эксперимента (материал АД1)



а



б

Рисунок 4.4 – Сравнение координатных сеток (шаг сетки 1 мм) полученных в пакете Q-Form (а) и в ходе эксперимента (б) (материал АД31)

состояния на каждом из этапов (рис. 4.6). Данные о картине распределения деформаций подтверждают факт наличия промежуточной жёсткой зоны и разъединенного ОД в ходе данного процесса деформирования (приложение Д).

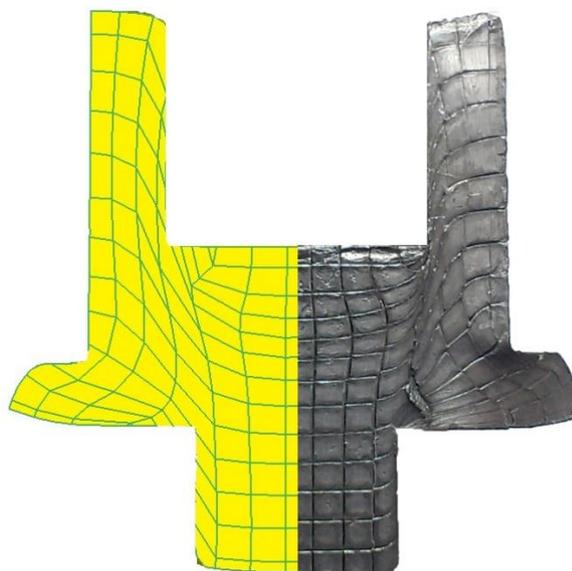


Рисунок 4.5 – Сравнение координатных сеток для свинца С1 (шаг сетки 2,1 мм)

По распределению логарифмических деформаций по объему деформируемой заготовки детали видно, что очаги деформации находится у кромок нижней матрицы и пуансона. Эти два очага деформации образуют зону, где происходит разделение течения материала в зону отростка и в зону фланца. Наибольшие значения деформации находятся на кромке матрицы там интенсивность деформаций достигает 4,5 единицы.

При изучении распределения логарифмических деформаций видно, что максимальная степень деформации сосредотачивается на линии между кромками пуансона и матрицы заготовки. Также можно заметить, что существуют небольшие застойные зоны, которые сосредоточены по наружной поверхности стакана, на по внутренней поверхности торца и по наружной поверхности фланца.

На рис. 4.7 показано сравнение результатов расчета. При сравнении экспериментальных и теоретических результатов по распределению логарифмических деформаций в заготовке видно, что общий характер распределения деформаций по заготовке и форма очага деформаций совпадают.

Экспериментальная оценка ресурса исчерпания пластичности показала, что наиболее опасной зоной является наружная поверхность фланца. Сопоставление значений использованного ресурса пластичности в соответствующей точке на наружной поверхности фланца при выдавливании показывает, что МКЭ дает на 6,8 % заниженную оценку.

При ограничении течения в зону фланца, фланец с развитием процесса превращается в застойную зону, что приводило к образованию трещин по границе очага деформации соединяющий переходные кромки верхней и нижней полуматрицы. Другой опасной зоной является зона вдоль границы, разделяющей очаги деформации радиального и прямого истечения.

По результатам исследования НДС в процессах комбинированного трехстороннего выдавливания для достаточно высоких заготовок выделяются три характерные стадии процесса:

- 1) начальная (стационарная) стадия процесса – с разъединенным очагом деформации;
- 2) промежуточная (нестационарная) стадия – с присоединенным очагом деформации;
- 3) конечная стадия процесса.

Как уже отмечалось ранее, для разъединенного очага деформации характерно, что высоты верхнего и нижнего очагов деформации практически не меняются по ходу процесса, что достигается за счёт расходования металла промежуточной жёсткой зоны. При дальнейшем деформировании в момент полного вырождения промежуточной зоны и присоединения верхнего и нижнего очагов деформации наступает вторая (промежуточная) стадия процесса.

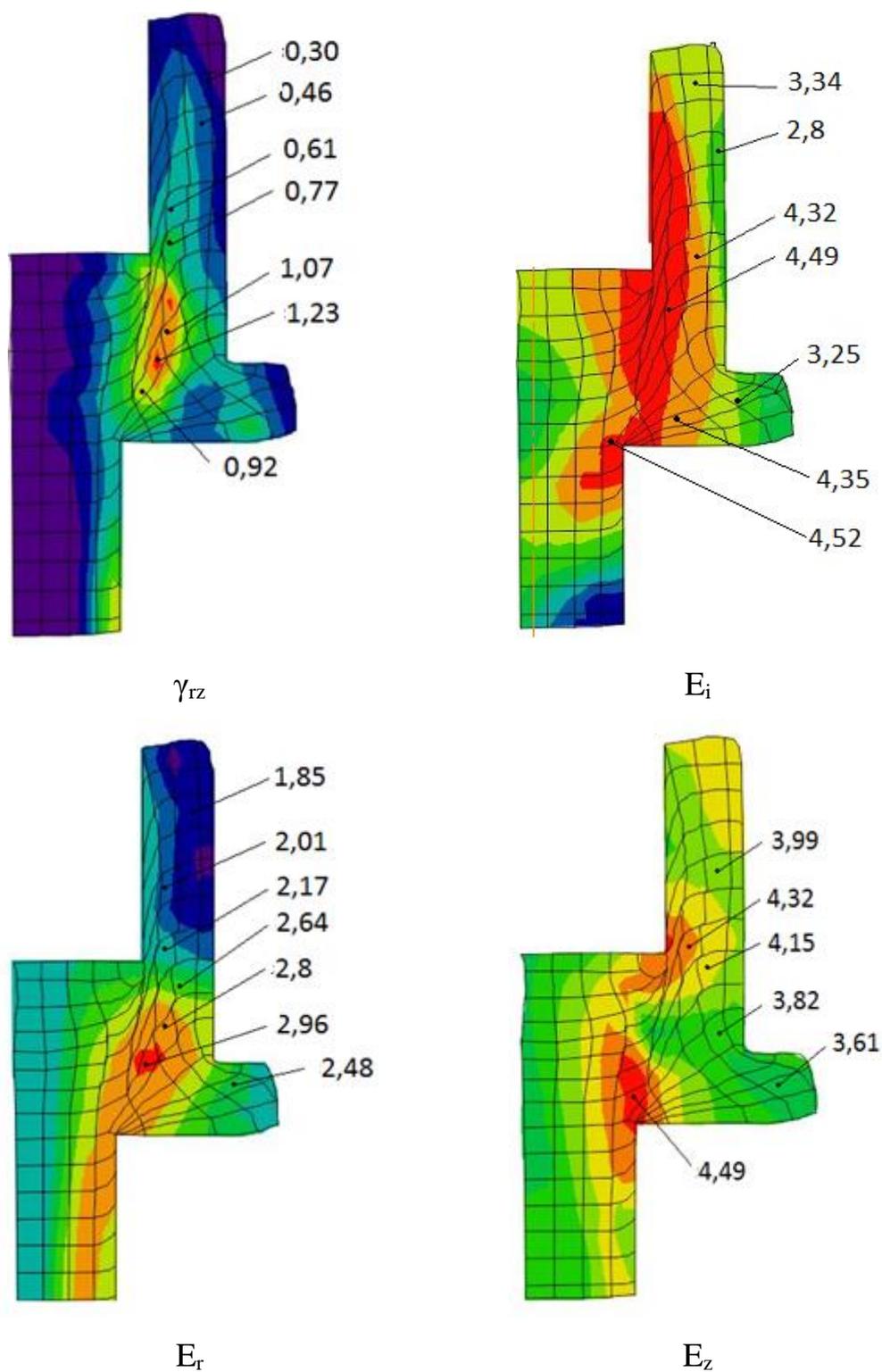


Рисунок 4.6 – Поля распределения компонентов деформаций, МПа при комбинированном трехстороннем выдавливании ($\bar{d}_n = 0,62$; $\bar{d}_o = 0,47$; $\bar{h} = 0,16$; $\text{Ход } \bar{s} = 0,55$)

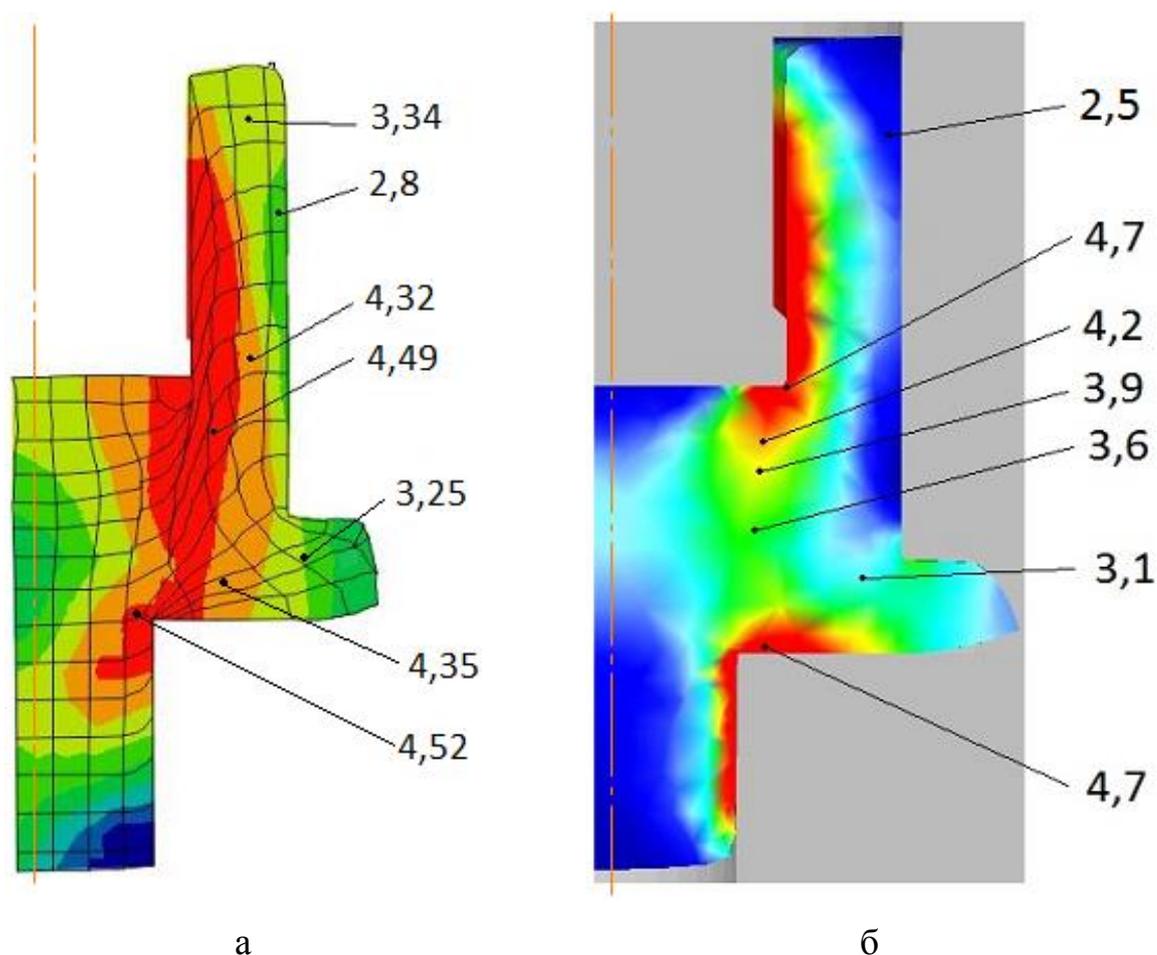


Рисунок 4.7 – Поля распределения интенсивности деформаций методом делительных сеток (а) и методом конечных элементов (б) ($\bar{d}_n = 0,62$; $\bar{d}_o = 0,47$; $\bar{h} = 0,16$; $\text{Ход } \bar{s} = 0,55$)

На протяжении этой стадии процесса потоки металла зарождаются в едином очаге деформации, преимущественное разделение на радиально-прямое и обратное течение происходит в зависимости от высоты фланца и толщины стенки стакана. При заключительной стадии процесса, при достижении положения пуансона, соответствующего высоте фланца, происходит резкое увеличение силы выдавливания за счет преимущественного протекания процесса по схеме «осадка + выдавливание». На этой стадии образуется затягивание металла в зону фланца и отростка с образованием дефектов в виде утяжин и прострелов.

Анализ экспериментальных данных позволил сделать выводы, которые учитывались при теоретических исследованиях процесса комбинированного выдавливания деталей с фланцем и отростком:

- размеры очагов деформации, разьединенных промежуточной жесткой зоной, на начальной стадии процесса остаются практически неизменными до полного их смыкания и зависят только от геометрических параметров процесса;

- наиболее интенсивной деформации подвергается участок, находящийся непосредственно под пуансоном и захватывающий зазор между ним и верхней матрицей, а также участок, который образуется течением материала во фланец и отросток;

- элементы сетки, примыкающие к стенке верхней матрицы, претерпевают сжатие в радиальном направлении, также наблюдается появление компонентов сдвиговой деформации между кромками рабочих инструментов;

- наибольшие положительные значения сдвиговых деформаций наблюдаются во фланцевой зоне (на внешней поверхности).

При этом следует отметить ряд факторов, оказывающих влияние на картину течения металла в процессе деформирования. К конструкционным управляющим факторам, определяющим форму получаемого изделия, можно отнести наличие фасок на инструменте. Технологическим фактором, оказывающим влияние (незначительное, но немаловажное) на величину кинематических параметров процесса (скорости истечения металла в вертикальном и радиальном направлениях), могут служить условия трения на поверхности инструмента.

Приведенный выше анализ экспериментальных исследований позволил подтвердить картины поэтапного формоизменения [157, 111, 124, 126], соотношения скоростей истечения металла, направление преимущественного течения, спрогнозированные на основе представленных ранее математических моделей. Отметим, что разработанные расчетные схемы процесса комбинированного выдавливания деталей с фланцем позволяют

анализировать начальную и промежуточные стадии процесса деформирования с наличием разьединенного или объединенного очагов деформации.

4.2 Исследование силового режима комбинированного трехстороннего выдавливания

К одним из важнейших показателей, характеризующих процесс холодной объемной штамповки, и в частности, процессы комбинированного трехстороннего выдавливания, относят силу выдавливания. Именно этот показатель является определяющим при конструировании деформирующего инструмента и выборе оборудования, на котором будет осуществляться процесс выдавливания.

Для проверки приемлемости полученных расчетных выражений было осуществлено комбинированное радиально-обратное-прямое выдавливание опытной партии деталей (табл. 4.1).

По результатам экспериментов построены графики отображающее влияние геометрических параметров выдавливания на усилие процесса для различных исследуемых материалов (рис. 4.8-4.10).

Экспериментальные исследования влияния диаметра отростка показали, что с увеличением диаметра отростка от 14,2 мм до 21,2 мм, усилие выдавливания уменьшилось в среднем на 5%. При изменении высоты фланца с 3 мм до 7 мм энергосиловые параметры уменьшились на 13%. Увеличение диаметра пуансона с 21,2 мм до 36 мм (соответственно уменьшение толщины стенки стакана) привело к увеличению силы выдавливания на 17%.

Было проведено сравнении результатов, полученных в ходе эксперимента с данными теоретических расчетов для схем комбинированного трехстороннего выдавливания.

На рис. 4.11, 4.12 показаны сравнительные графики зависимости усилия деформирования для детали из материала АД1 и С1.

Таблица 4.1 – Сопоставление результатов экспериментального и теоретического анализа сил комбинированного выдавливания

<i>Материал</i>	$H_3=D_3$, мм	D_o , мм	h , мм	D_n , мм	<i>Ход</i> , мм	$P_{эксп}$, кН	\bar{p} <i>теор.</i>	σ_s , МПа	$p_{теор}$, МПа	$P_{теор}$, кН
АД1	45	21,2	7	28,2	5	250	2,65	171,2	454	283
					10	295	2,93	175,4	519	324
					15	324	2,97	176,6	538	336
					20	317	3,11	177,3	551	344
					25	328	3,15	178,3	569	355
АД1	45	14,2	7	28,2	5	264	2,31	166,2	384	240
					10	297	3,08	176,9	545	340
					15	340	3,52	182,2	641	400
					20	325	3,82	185,4	708	442
					25	328	4,02	187,5	754	471
С1	45	14,2	3	36	5	17	2,99	31,4	94	96
					10	20	3,73	32,8	122	124
					15	23	4,29	33,7	144	147
					20	19,5	4,87	34,5	168	171
					25	16	5,19	34,9	181	184
С1	45	14,2	7	36	5	15	2,16	29,6	64	65
					10	17	2,91	31,3	91	93
					15	20	3,38	32,2	109	111
					20	19	4,18	33,5	140	142
					25	16	4,5	34,0	153	155
АД31	45	21,2	5	21,2	5	287	3,88	252,2	978	345
					10	335	4,08	254,7	1039	367
					15	374	4,33	257,8	1116	394
					20	355	4,61	261,1	1204	425
					25	370	4,74	262,6	1245	439
АД31	45	21,2	5	36	5	490	2,43	229,3	557	567
					10	687	3,05	240,1	732	745
					15	800	3,64	248,9	906	922
					20	924	4,20	256,2	1076	1095
					25	1024	4,5	259,9	1169	1190

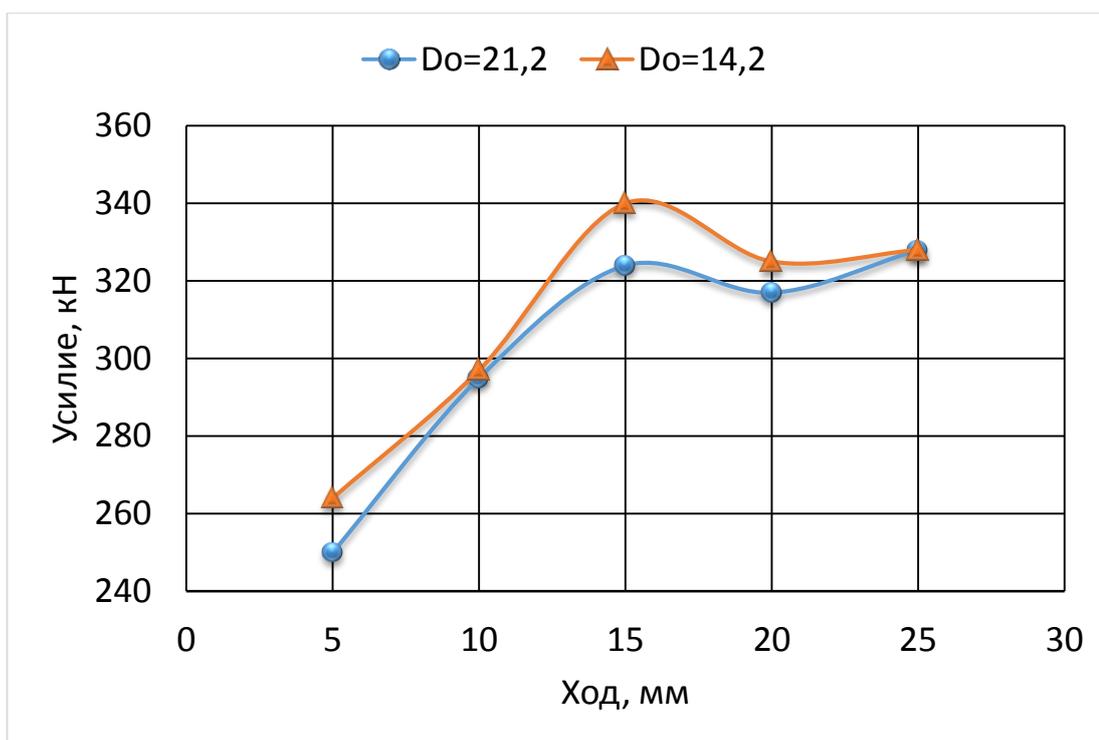


Рисунок 4.8 – Усилие деформирования для материала АД1 при разных значениях отрезка

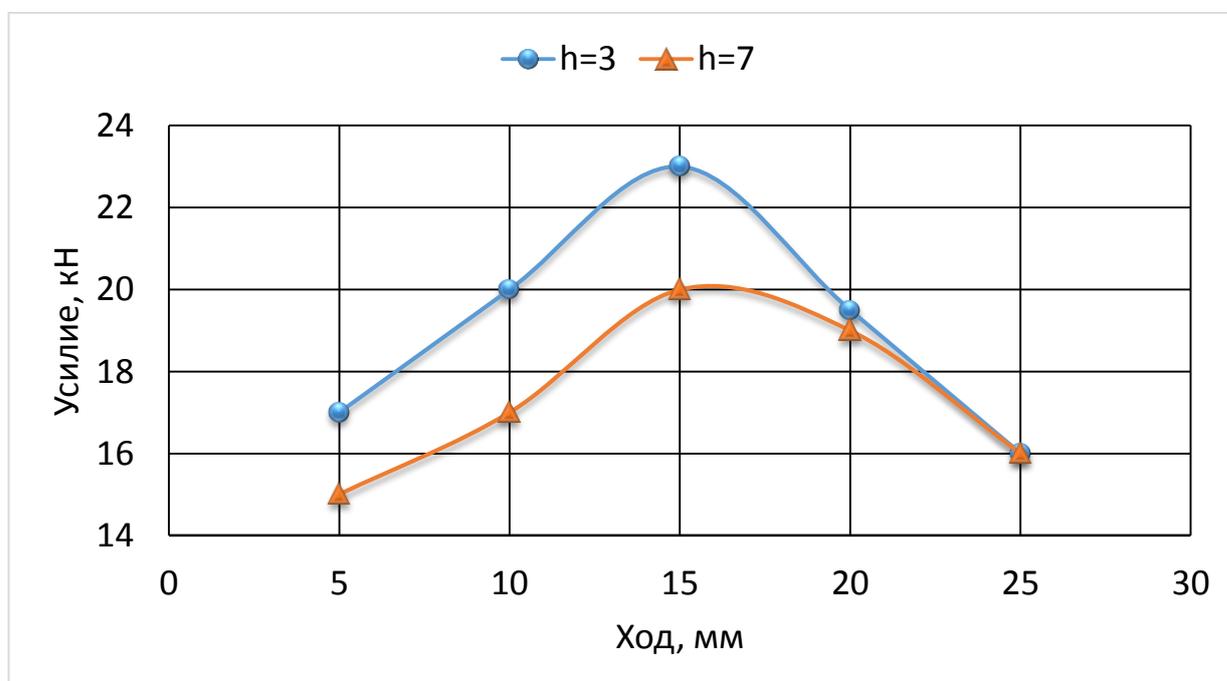


Рисунок 4.9 – Усилие деформирования для материала С1 при разных значениях высоты фланца

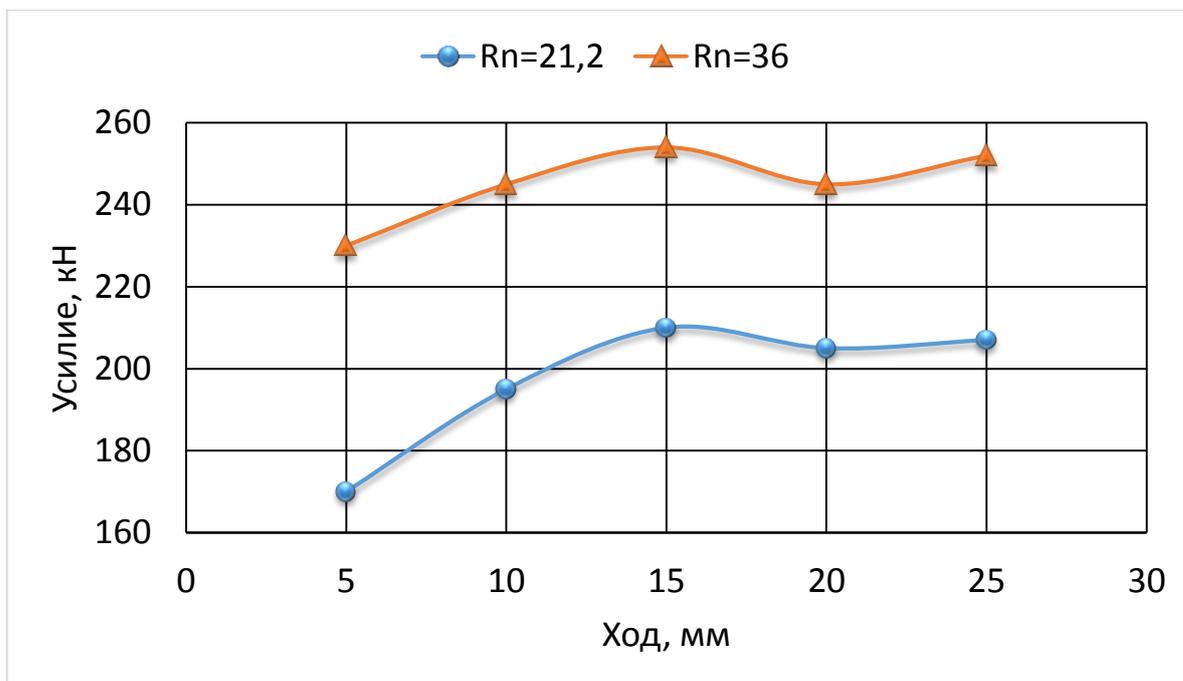


Рисунок 4.10 – Усилие деформирования для материала АД31 при разных значениях диаметра пуансона

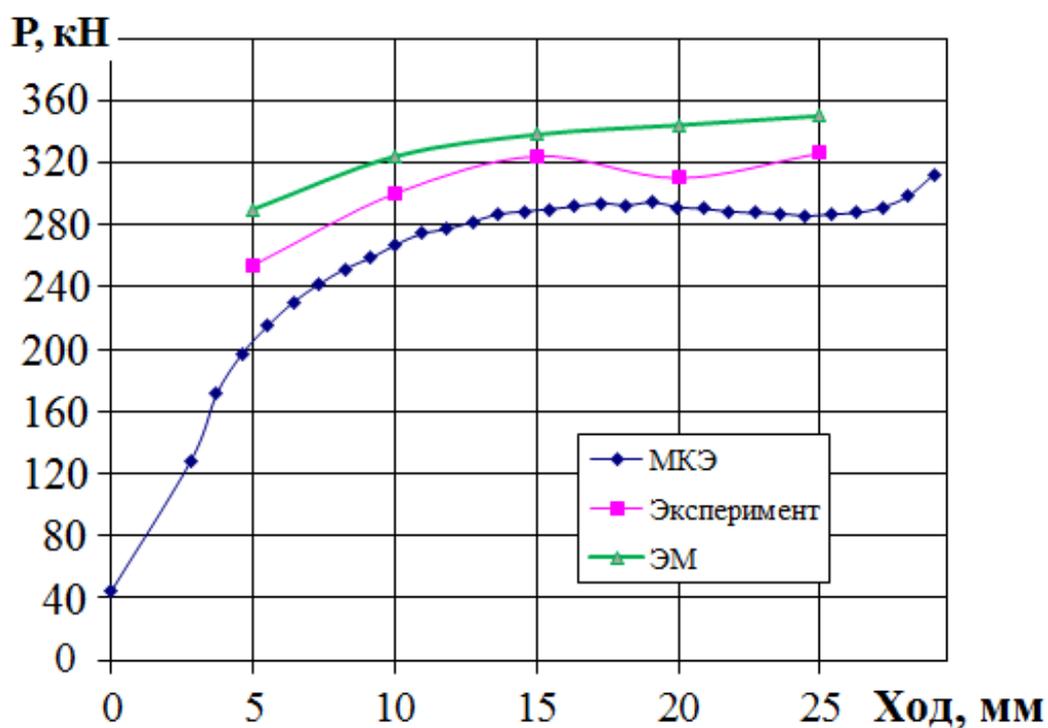


Рисунок 4.11 – Зависимость усилия от хода пуансона для детали с фланцем и отростком для алюминиевого сплава АД1

При сравнении данных полученных энергетическим методом и экспериментальными исследованиями было установлено, что теоретические расчеты дают результаты на 20% выше экспериментальных. МКЭ показал результаты на 12% ниже экспериментов. Это объясняется не возможностью создания идеальных условий выдавливания (трения, идентичных материал) при эксперименте. Распределения степени деформации, полученной методом делительных сеток на 11% выше данных полученных математическим моделированием.

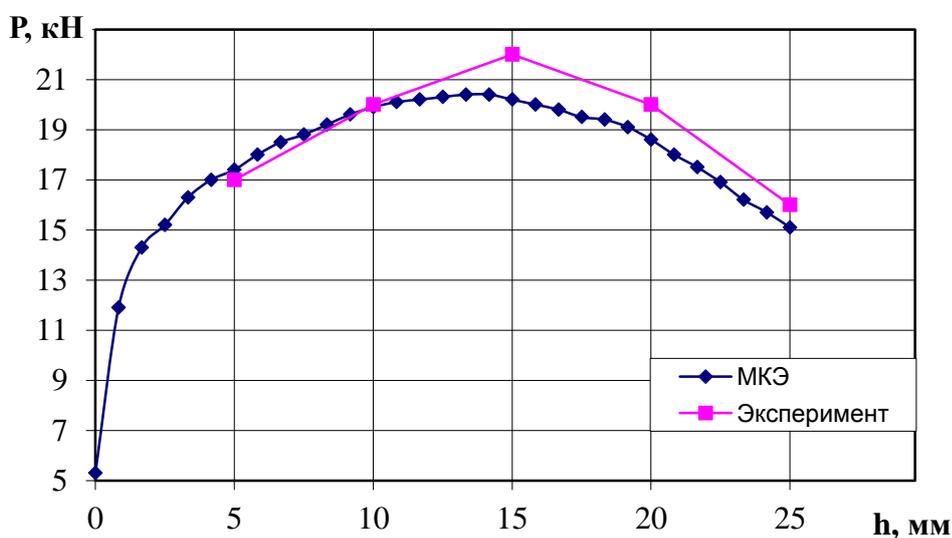


Рисунок 4.12 – Зависимость усилия от хода пуансона для детали с фланцем для алюминиевого сплава С1

4.3 Моделирование формоизменения в процессах комбинированного трехстороннего выдавливания

Важным показателем правомерности использования полученных математических моделей комбинированного трехстороннего выдавливания является формоизменение. В виду некоторых допущений о характере течения металла в пределах каждого из модулей, образующих расчетную схему,

возможно значительное отклонение приращений размеров полуфабриката наряду с получением приемлемых значений величины силы выдавливания. Поэтому для исследования возможности использования каждой из расчетных схем для качественного прогнозирования поэтапного формообразования заготовки в процессе комбинированного деформирования и получения соответствующих рекомендаций, был проведен сравнительный анализ на основе экспериментальных данных и моделирования МКЭ (рис. 4.13).

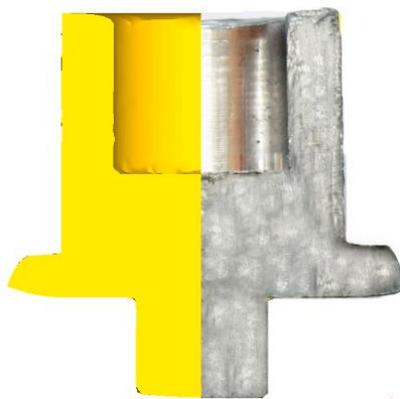


Рисунок 4.13 – Изменения геометрии полуфабриката из С1 полученные на основе эксперимента и МКЭ

Для эксперимента была выбрана заготовка с диаметром и высотой 45 мм, диаметром отверстия 21,2 мм, высотой фланца 5 мм и диаметром пуансона 28,2 мм. Ход процесса равен 25 мм.

Сопоставление полученных данных показало, что формообразование при эксперименте, незначительно отличается от МКЭ. Это связано с трением на контактных поверхностях, сложностью центрирования пуансона и обеспечения параллельности торцевых поверхностей в контейнере.

Проведен сравнительный эксперимент, в котором диаметр отростка принимался 14,2 мм и 21,2 мм при других равных параметрах (рис. 4.14).

По результатам эксперимента можно сделать вывод, что при уменьшении диаметра отростка, высота отростка уменьшается, при этом также, но незначительно, уменьшается диаметр фланца, а вот высота стакана

увеличивается. Данный эксперимент подтверждает математические исследования, которые отображены в 3 разделе (табл. 3.7).

При проведении эксперимента комбинированного выдавливания наблюдались такие дефекты как разрыв фланца, трещины на фланце, подъем фланца от поверхности нижней опорной поверхности («седлообразование»), отклонение от круглости фланца, овальность наружной вертикальной поверхности фланца, овальность отростка и заусенцы.

Величина отклонения от формы получаемых холодным выдавливанием фланцев зависит от множества технологических параметров процесса деформирования таких как: конфигурация детали, геометрия инструмента, трение на контактных поверхностях.



Рисунок 4.14 – Сравнение деформированного состояния у деталей с разным диаметром отростка

Из-за неравномерно смазанной поверхности инструмента либо неправильной формы инструмента фланец может иметь неправильную форму в виде «седла» (рис. 4.15). Отклонение от круглости фланца объясняется особенностями направления шлифовки полуматриц, т.е. не одинаковой шероховатостью поверхности инструмента.



Рисунок 4.15 – Отклонение формы фланца, дефект «седла»

При низкой жесткости инструмента возможно локальное расширение заготовок. Также может возникнуть трещины (рис. 4.16, а, б) и разрывы (см. рис. 4.16, в) на фланце из-за дефектов на инструменте либо при неметаллических примесях в материале заготовки. Появление трещин объясняется наличием растягивающих окружных напряжений во фланце, а также большой степенью деформации. Овальность фланца и отростка объясняется наличием трения на поверхностях.



а



б



в

Рисунок 4.16 – Разрывы и трещины при комбинированном выдавливании

Основной причиной образования заусенцев и складок является плохая подгонка инструмента, скольжения полуматриц. На определенном этапе

выдавливания, когда пуансон достигает уровня фланца, наблюдается интенсивное течение материала в радиальном направлении, что приводит к появлению такого дефекта как прострелы (рис. 4.17).



Рисунок 4.17 – Дефект в виде прострелов при трехстороннем выдавливании

Выводы по разделу

1. Исследование напряженно-деформированного состояния при комбинированном трехстороннем выдавливании деталей с фланцем и отростком из материала С1 проведено методом координатных сеток и моделированием в специализированном программном продукте. Полученные данные о картине распределения деформаций подтверждают факт наличия промежуточной жёсткой зоны и разъединенного очага деформации на начальном этапе процесса деформирования для достаточно высоких заготовок, а также позволяют выделить нескольких зон с характерной тенденцией поэтапного изменения картины деформированного состояния.

2. С целью подтверждения теоретических исследований силового режима и формообразования заготовки в процессе деформирования,

проведены экспериментальные исследования на заготовках из алюминиевых сплавов АД1, АД31 и свинца С1. При сравнении данных полученных энергетическим методом и экспериментальными исследованиями было установлено, что теоретические расчеты дают результаты на 20% выше экспериментальных. МКЭ показал результаты на 12% ниже экспериментов. Распределения степени деформации, полученной методом делительных сеток на 11% выше данных полученных математическим моделированием.

3. Выявлены дефекты у деталей, полученных по схеме комбинированного трехстороннего выдавливания, такие как разрыв фланца, трещины на фланце, подъем фланца от поверхности нижней опорной поверхности («седлообразование»), отклонение от круглости фланца, овальность наружной вертикальной поверхности фланца, овальность отростка и заусенцы. Установлены причины возникновения и возможные способы эффективного управления формообразованием детали.

РАЗДЕЛ 5

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Результатом выполнения теоретических и экспериментальных исследований стала разработка методики проектирования и технологических рекомендаций по практическому использованию процессов трехстороннего выдавливания деталей типа стакан с фланцем.

5.1 Методика проектирования процесса выдавливания

Современные методики проектирования технологических процессов основаны на системном подходе к решению поставленных задач и на концепции группового метода организации производства деталей [123, 125]. При этом глобальной целью проектирования технологии является разработка наиболее эффективного (предпочтительного) процесса. При разработке технологического процесса выдавливания, в том числе комбинированного трехстороннего деформирования, целесообразно использовать методику, представленную на рис. 5.1.

Научно-методические принципы современных методик проектирования технологических процессов (ТП) базируются на концепции группового метода организации производства деталей и системном подходе к решению поставленных задач. Сущность методики применительно к разработке технологических процессов изготовления точных объемных заготовок выдавливанием поясняется усовершенствованной схемой проектирования процессов, в основу которой легли известные алгоритмы разработки технологий штамповки. Предлагаемая методика проектирования технологических процессов предполагает шесть основных этапов проектирования технологий.

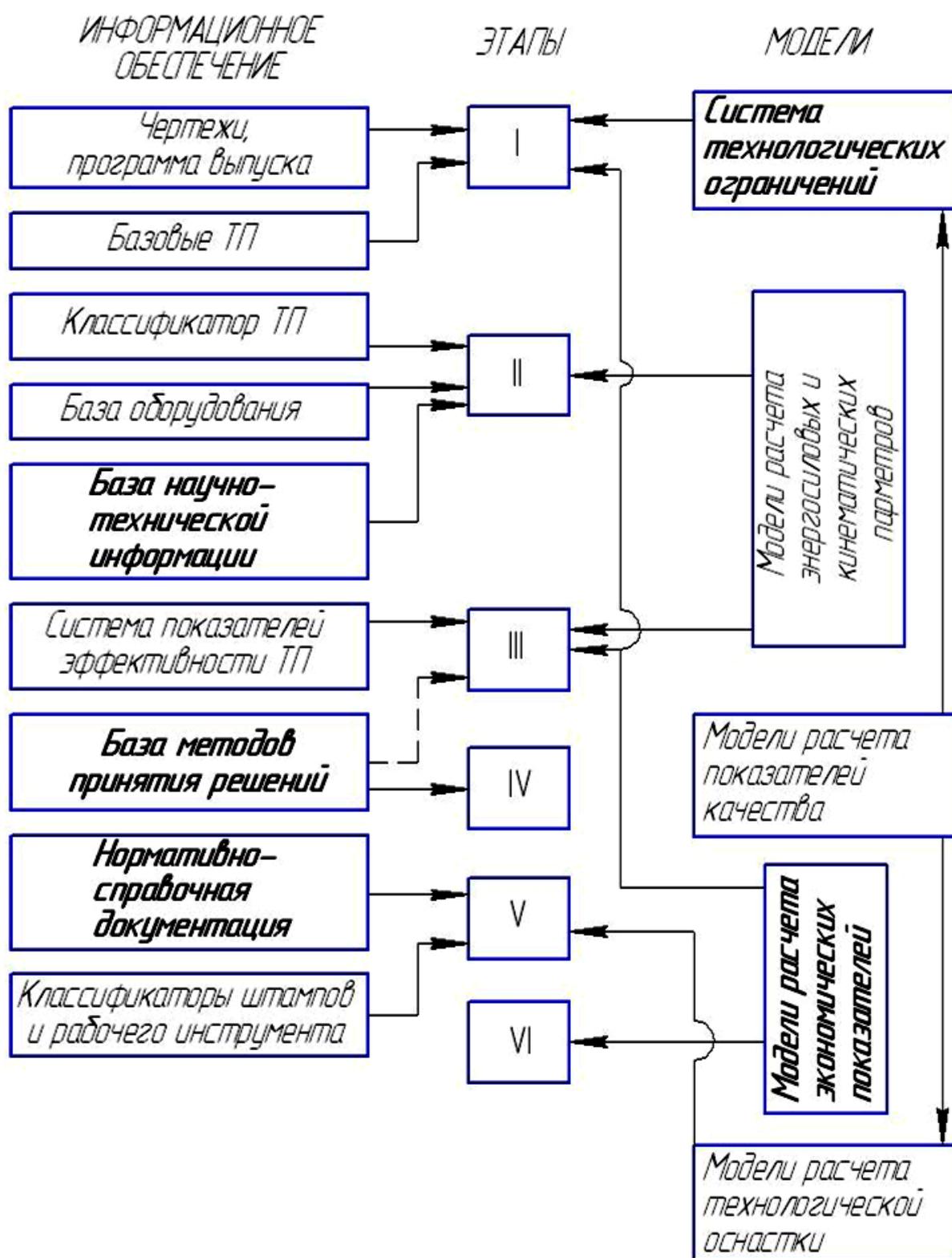


Рисунок 5.1 – Схема проектирования технологических процессов

Первый этап проектирования ТП - конструкторско-технологическая классификация деталей. В состав исходной информации, необходимой для этой классификации, входят чертежи деталей и сведения о программах выпуска, базовых процессах и составе технологического оборудования. На этом этапе необходимо: определить с учетом специфики предприятия наиболее значимые критерии классификации; сгруппировать детали в отдельные группы, обладающие наличием классификационных признаков; оценить возможности изготовления каждой детали выдавливанием; удалить те детали, которые невозможно изготовить штамповкой выдавливанием. Наибольший габаритный размер деталей, минимальная толщина характерных элементов детали (стенки, фланца или отростка) и годовая программа выпуска деталей в наибольшей степени определяют возможность штамповки, применяемое оборудование и показатели эффективности освоения новой технологии [160]. Руководствуясь этими признаками необходимо отнести разрабатываемую деталь к одной из подгрупп. Возможность изготовления деталей различными технологическими способами штамповки оценивается в первом приближении с помощью баз ограничений, содержащих упрощенные расчетные соотношения или рекомендации для установления значений признаков, которыми ограничено внедрение технологических процессов выдавливания [158, 159].

Решение поставленных задач позволяет выделить основные типы деталей, которые можно перевести на штамповку выдавливанием. Дальнейшее проектирование процессов проводится не для каждой детали в отдельности, а для деталей - характерных представителей группы.

Задачами второго этапа является разработка возможно более полного набора вариантов альтернативных техпроцессов при этом предварительно проанализировав их и исключив заведомо неэффективные варианты. В результате выполнения второго этапа должны быть разработаны наборы вариантов последовательных технологических переходов выдавливания, соответствующие эскизы оснастки и состав оборудования.

В случае необходимости анализа сложных схем формообразования с неоднозначной кинематикой течения металла используются расчетные программы, основанные на энергетическом подходе и анализе кинематически возможных полей пластического течения [121-123, 125].

Третий этап - определение системы оценки эффективности альтернативных процессов. Исходной информацией для этого этапа служит обобщенная система показателей эффективности технологий и совокупность методов принятия решений. Для оценки эффективности процессов выдавливания система содержит пять обобщенных критериев: завершенность формообразования деталей, давление деформирования, технический уровень процесса, экономическая и организационная эффективность [133].

Для определения завершенности формообразования и расчета энергосиловых характеристик рекомендуется применить разработанное программное обеспечение. Программа «Energy Model» предназначена для построения расчетной схемы процесса, выбора полей скоростей и расчета энергетическим методом силового режима процесса комбинированного выдавливания (рис. 5.2) [181]. Язык разработки – Object Pascal, средство разработки – программная среда Turbo Delphi Explorer.

Основными операциями, выполняемыми по программе, являются:

- выбор одного из возможных типов кинематических модулей, удовлетворяющих поведению течения металла в определенной зоне деформации;
- определение геометрических параметров и границ кинематического модуля в системе координат моделируемого процесса, а также направлений течения и разрывов скоростей;
- расчет мощностей сил деформирования, среза и трения;
- варьирование параметров процесса в определенном диапазоне и исследование их влияния на давление деформирования (с построением графиков).



Рисунок 5.2 – Последовательность действий при работе программы

Ввод исходных параметров, отбор и корректировка кинематических модулей и рассмотрение результатов работы программы возможно в диалоговом режиме. В качестве исходных данных, и данных которыми можно варьировать, выбраны радиус и высота заготовки, радиус отростка, радиус пуансона, высота фланца, коэффициент трения по закону Зибеля и ход активного пуансона. Также, можно выбрать желаемое число шагов расчета, которые будут соответствовать числу точек, отображенных на полученных графиках. По итогам расчета программа строит график приведенного давления деформирования (рис. 5.3) и график приращения размера по трем направлениям течения материала (рис. 5.4).

В качестве базы данных для процессов выдавливания рекомендуется применять карты маршрутных технологий и альтернативных технологических вариантов изготовления деталей типовых конструкций [181].

Кроме того, проведенные теоретические расчеты позволяют оценить также приведенное давление комбинированного трехстороннего выдавливания на основе традиционных методов. Рекомендуется использовать расчетную зависимость (3.5), и зависимость (3.6), которая учитывает наличие фасок на инструменте.

Четвертый этап проектирования - выбор наиболее эффективного варианта технологического процесса - реализуется с использованием предлагаемых критериев оценки. Окончательное решение по выбору приемлемого варианта остается за технологом при условии получения количественной оценки всех альтернатив [158 - 160].

Применение одного формообразующего перехода позволяет сократить продолжительность технологического процесса, уменьшить количество оснастки и подготовленных операций. Предложенная технология, реализующая поставленную задачу, описана в пункте 5.2 данного раздела.

Пятый этап - разработка технологического процесса и оснастки. В качестве исходной информации используют классификаторы штампов и

сменных инструментов, с разъемными матрицами, а также нормативную и методическую документацию.

Шестым заключительным этапом разработки технологического процесса холодной объемной штамповки выдавливанием, является расчет экономической эффективности от внедрения нового процесса выдавливания взамен базового варианта.

На всем протяжении процесса проектирования технологического процесса холодной объемной штамповки выдавливанием, необходимо контролировать взаимосвязь выполняемых этапов и при необходимости производить корректировку предшествующих этапов для получения более целесообразной технологической цепочки.

Формулировка целей дает возможность выбора связанных показателей для количественного сопоставления вариантов и установления системы технологических ограничений. К ограничениям для технологических процессов выдавливания можно отнести показатели качества (точность размеров, конструктивных элементов деталей и др.), характеристики материалов, энергоемкость, производительность и др.

В случае необходимости анализа сложных схем формообразования с неоднозначной кинематикой течения металла используются расчетные программы, основанные на энергетическом подходе и анализе кинематически возможных полей пластического течения. Разработана база данных в виде матрицы плоских и осесимметричных кинематических модулей, имитирующих комбинированное трехстороннее выдавливание. Для решения осесимметричных задач на базе простых полей скоростей с элементами прямоугольной и треугольной формы в ДГМА разработаны кинематические элементы (модули) трапецеидальной и треугольной формы с различной ориентировкой прямой наклонной границы [182].

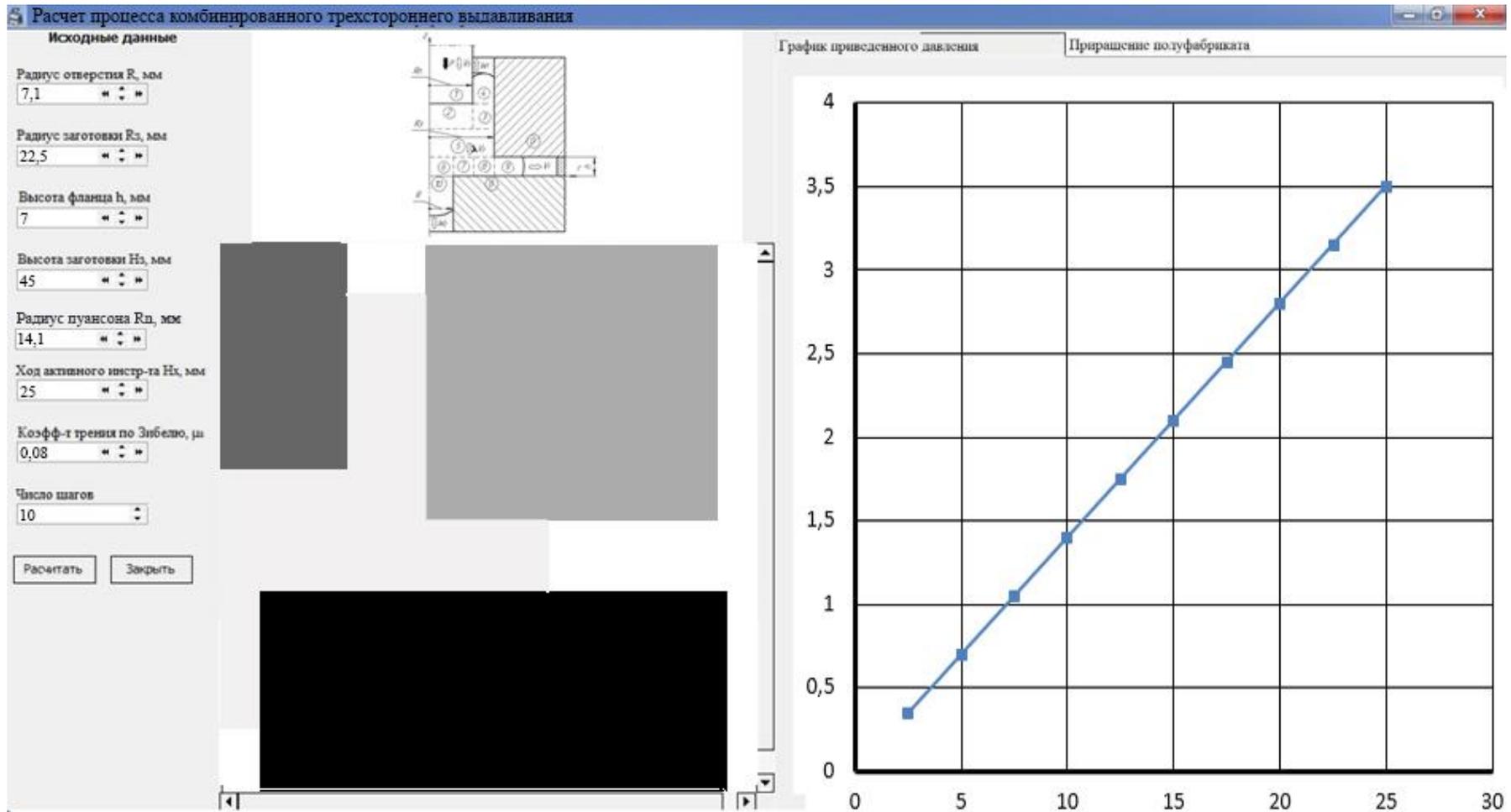


Рисунок 5.3 – Главное окно программы с вводом исходных данных и просмотр результатов расчета приведенного давления деформирования

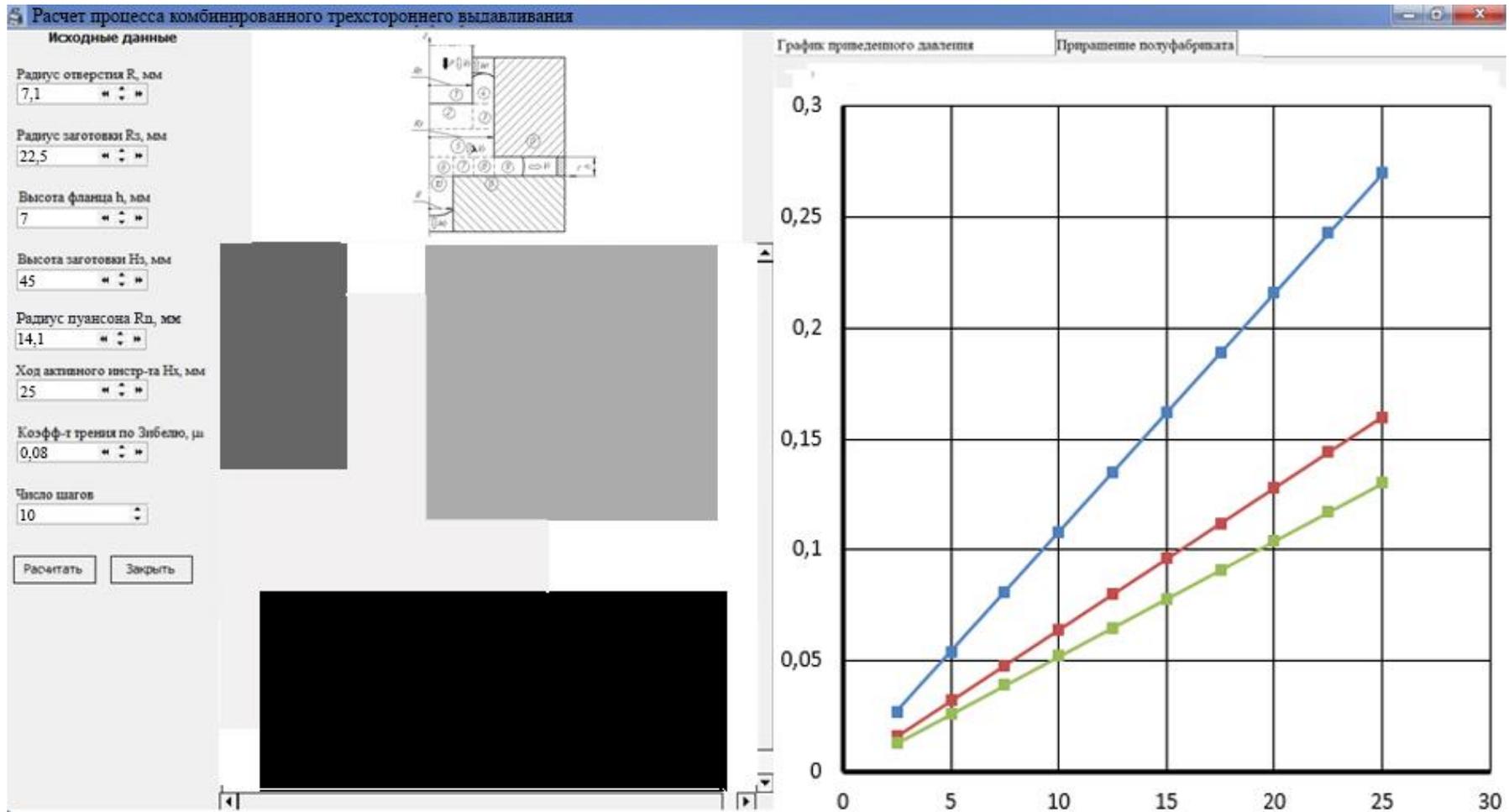


Рисунок 5.4 – Главное окно программы с вводом исходных данных и просмотр результатов расчета приращения размеров по трем направлениям

5.2. Технология и штамповая оснастка для процесса радиально-прямо-обратного выдавливания

Деталь типа стакан с фланцем и отростком является достаточно распространенной в машиностроении. К подобным деталям относятся заготовки типа фитингов, штуцеров, корпусов, втулок, пробок и прочие детали с фланцами и отростками различных конфигураций (см. рис. 2.1).

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований полых деталей с фланцем была разработана технология штамповки детали (рис. 5.5). Требования по точности соответствуют 14 качеству. Деталь изготавливается из алюминиевого сплава АД31м.

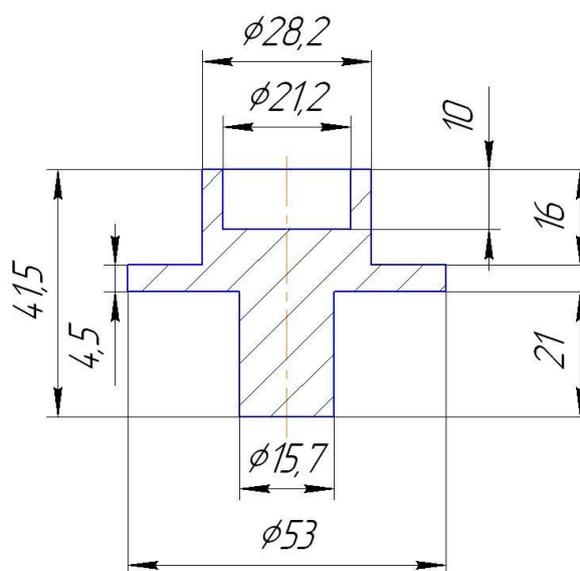


Рисунок 5.5 - Чертеж детали

Этапы изготовления детали по ресурсосберегающей технологии, которая предполагает один формообразующий переход – трехстороннее выдавливание, представлены в табл. 5.1.

Нанесение смазки и подсмазочного слоя рекомендовано выполнить согласно технологии показанной в табл. 5.2.

Таблица 5.1 – Технология изготовления детали «втулка с фланцем»

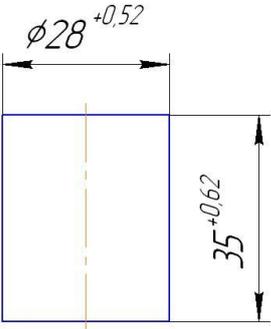
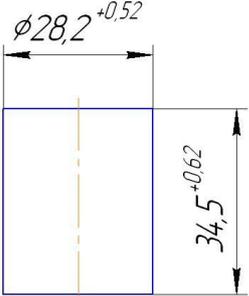
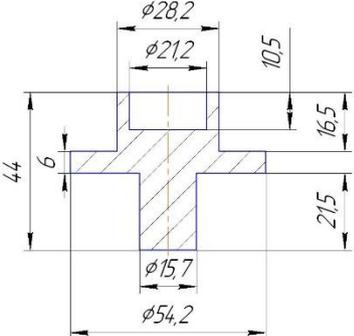
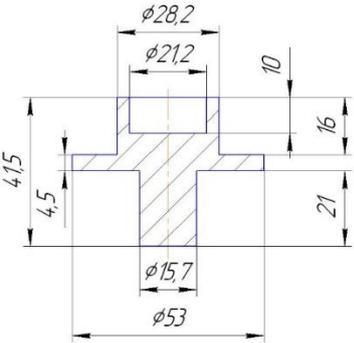
Операционный эскиз	Наименование операции
1	2
	<p>Отрезка заготовки (материал АД1) смещением в отрезном штампе с дифференциальным зажимом. Оборудование: автоматический комплекс для резки прутков усилием 1600 кН. Усилие резки 443 кН.</p>
Термообработка	Нагрев до 400 °С, выдержка 1,5 час и охлаждения на воздухе.
Подготовка поверхности	Анодирование (табл. 5.2).
Смазка	Нанесение смазки (технический жир)
	Калибровка. Усилие 150 кН
	<p>Комбинированное выдавливание заготовки. Заготовка: пруток $d_{\text{вн.}}=28,2\text{мм}$; Оборудование: Кривошипный пресс двойного действия усилием 1600 кН.</p>
	Механическая доводка торцов и фланца

Таблица 5.2 – Схема подготовки подсмазочного слоя и нанесения смазки на заготовках

Операция	Компоненты	Массовая концция, г/л	Режим обработки	
			Температура, °С	Время обработки, мин
Промывка в холодной проточной воде				0,5-1
Обезжиривание химическое	Тринатрийфосфат (ГОСТ 201-76)	50-60	80-100	0,083-0,1
	Жидкое стекло	5-10	-	-
Промывка в горячей проточной воде	Вода	-	80-100	1
Травление	Серная кислота	110-160	50-70	15-20
	Натриевая селитра	20-30		
Промывка в холодной проточной воде	Вода	-	-	0,2-0,3
Промывка в горячей проточной воде	Вода	-	80-100	1
Анодирование	Серная кислота	190-200	20-25	15-25
Промывка в холодной проточной воде	Вода	-	-	0,2-0,3
Обработка в растворе хромпика	Хромпик калиевый технический	100-120	80-100	15-20
Промывка в холодной проточной воде	Вода	-	-	0,2-0,3
Промывка в горячей проточной воде	Вода	-	60-100	0,2-0,3
Сушка	-	-	80-120	15-20

На рис. 5.6 показан штамп для комбинированного трехстороннего выдавливания. Штамп состоит из верхней плиты 1 и нижней плиты 18, к которым прикреплен весь рабочий инструмент. Между собой плиты направляются по средствам пары колонка 19 и втулка 20. На нижней плите расположен контейнер 10, который прикреплен к плите по скользящей посадке и болтами 24. В контейнере располагается составная матрица 10, подкладка 11, в которую вкручиваются направляющие для тарельчатых пружин 12, пуансонодержатель 14, каленая прокладка 15 предназначенная для предотвращения продавливания нижней плиты 18 пуансоном 16. В пуансонодержателе имеются отверстия под толкатели (на рис.5.3 не указаны), которые воздействуют на выталкиватель 17. Тарельчатые пружины 13 предназначены для съема детали с пуансона 16. К контейнеру 10 с помощью винтов 22 прикреплено кольцо 9, которое предотвращает выталкивание матрицы 11 при воздействии на нее пружин 13. К верхней плите прикреплен контейнер 2 с помощью посадки и винта 23, в которой располагается кольцо 3, на которое опирается составная матрица 8. Содержимое контейнера 2 крепится с помощью кольца 7 и винтов 21. Пружина 6 предотвращает падение выталкивателя 4. Толкатель 5 предназначен для выталкивания детали из матрицы 8, воздействуя через выталкиватель 4.

Штамп работает следующим образом. Заготовку устанавливают на противополопуансон 16. Верхняя плита штампа 1, закрепленная в ползуне прессы, при опускании вниз образует замкнутую полость для радиального течения материала во фланцевую зону матрицами 8 и 11. Тарельчатые пружины 13 обеспечивают постоянную высоту радиальной полости по ходу выдавливания. Ограничением течения материала в стенку стакана обеспечивается наличием выталкивателя 17. При рабочем ходе прессы заготовка деформируется противополопуансоном 11 по схеме трехстороннего выдавливания. После окончания деформирования верхняя плита возвращается в исходное положение. Съём детали, в случае ее залипания на инструментах, осуществляется пружиной 6 и выталкивателем 17 по средствам толкателей.

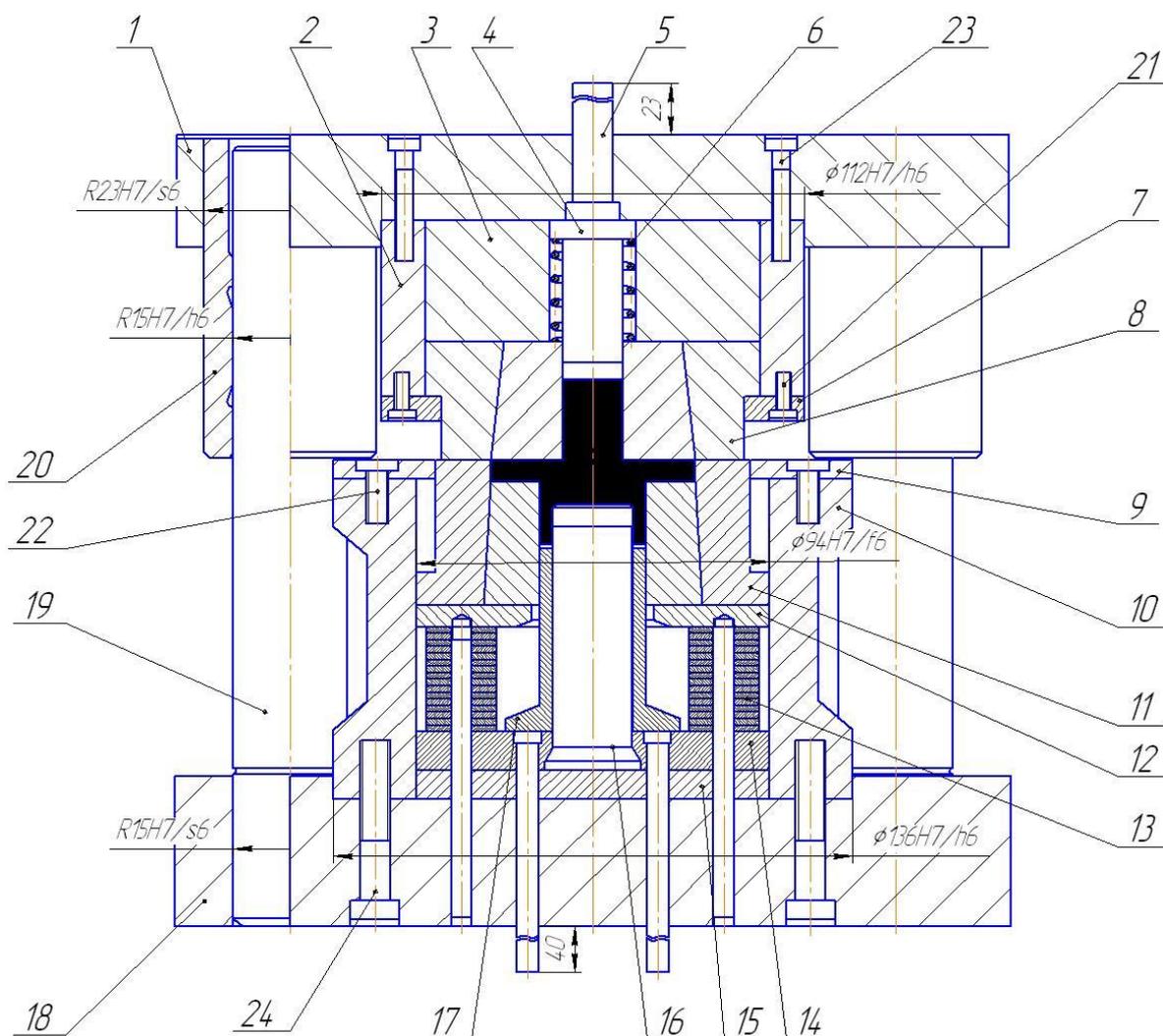


Рисунок 5.6 – Схема штампа для комбинированного выдавливания

Общим недостатком штампа является наличие тарельчатых пружин, которые вызывают сложность в создании необходимого усилия для предотвращения раскрытия полуматрицы. В свою очередь раскрытие полуматрицы может привести к появлению такого дефекта как заусенец и увеличению необходимой высоты фланца, что может повлечь за собой неправильное распределение объемов металла в конфигурационных частях детали.

Оптимальным оборудованием для процессов выдавливания являются специализированные прессы двойного действия, обеспечивающие необходимый ход и усилие.

5.3 Расширение технологических возможностей комбинированного выдавливания деформирования

Важнейшей проблемой современного производства, является получение заготовок с заданными механическими свойствами, что может быть достигнута такими видами обработки: выдавливанием с несколькими степенями свободы истечения металла, выдавливанием с натяжением, осадка с кручением, винтовая экструзия, деформирование с макросдвигами, протяжка со сдвигом и др.

Нами установлена эффективность комбинированных схем деформирования с макросдвигами в задачах снижения сил деформирования и повышения равномерности распределения деформации [183]. Кроме того, установлено, что при комбинированном деформировании (протяжка с макросдвигами) заготовки существенно снижаются необходимые силы деформирования. Также, установлено положительное влияние макросдвигов на преобразование кристаллической структуры металл (рис. 5.7).

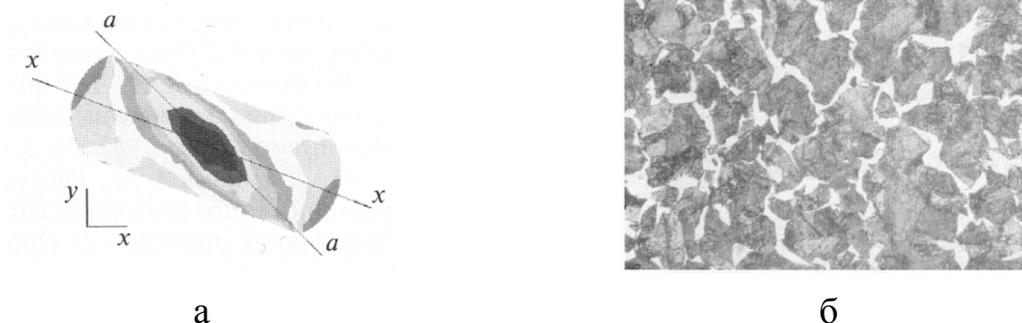


Рисунок 5.7 – Поперечное сечение заготовки (а) и микроструктура заготовки из стали 40Х (б) после комбинированного деформирования протяжкой

Недостатком выдавливания пустотелых изделий, в частности деталей типа стакан, является неоднородность механических свойств металла изделия.

В то время, когда стенки стакана имеют проработанный металл, в центральной зоне донной части металл получает лишь незначительные

деформации. Особенно этот недостаток проявляется в стаканах с большой толщиной дна, когда толщина дна равна радиусу пуансона или выше его. Это и обуславливает неоднородность механических свойств изделий.

В основу изобретения поставлена задача: расширение технологических возможностей способа и улучшение качества изделия за счет обеспечения проработки металла в его донной части [184].

Поставленная цель достигается тем, что согласно способу изготовления изделий типа стакан деформированием заготовки выдавливанием в матрице с помощью пуансона, деформирования происходит в два этапа таким образом, что на первом этапе одновременно выполняют обратное выдавливание стенки стакана и прямое выдавливание с образованием технологического отростка в донной части стакана, а на втором этапе происходит вытеснение металла из технологического отростка назад в донную часть стакана.

Знакопеременная деформация, которой подвергается металл в донной части полуфабриката - стакана за счет сначала прямого, а затем обратного выдавливания металла в донную часть, обеспечивает хорошую проработку этой донной зоны.

Особенно это целесообразно для деталей с относительно толстым дном, толщина которого равна или превышает радиус пуансона (или толщины ячейки интенсивной деформации).

Обеспечения хорошей проработки и укрепления металла по всему объему стакана, снижение неравномерности деформации, обеспечивает равнопрочность и хорошее качество изделий и их эксплуатационную надежность и расширяет возможности процессов выдавливания.

Исходную заготовку 1 (отожженную и с подготовленной поверхностью) размещают в матрицу 2 на торец контрпуансону 3. На первом этапе процесса деформирования под влиянием деформирующего подвижного пуансона 4 металл заготовки 1 выдавливается в обратном направлении с образованием стенки и полый части изделия. Одновременно с этим в нижней части заготовки металл выдавливается в прямом направлении в полость, которая предусмотрена в контрпуансоне 3, что приводит к образованию в донной части стакана технологического отростка (рис. 5.8, а).

Первый этап деформирования заканчивается при достижении расчетной толщины полуфабриката h_1 , величина которой меньше заданной толщины дна стакана h в основном в 1,5 - 2,0 раза.

Далее осуществляется второй этап деформирования, на котором с формируемого технологического отростка металл вытесняется (выдавливается или направляется) назад в донную часть, что приводит к увеличению толщины дна стакана, что штампуется, к величине h , то есть до заданного по чертежу значение. Для выполнения этой стадии процесса приводят в движение и силовое воздействие пуансон-толкатель 5, размещенный в полости контр пуансона 3 (см. рис. 5.8, б).

После завершения двух этапов деформирования подвижный пуансон 4 отводится вверх, в исходное положение, а деталь выталкивается из матрицы движением контрпуансона 3 или пуансона-толкателя 5 (см. рис. 5.8, в).

Затем цикл штамповки продолжается.

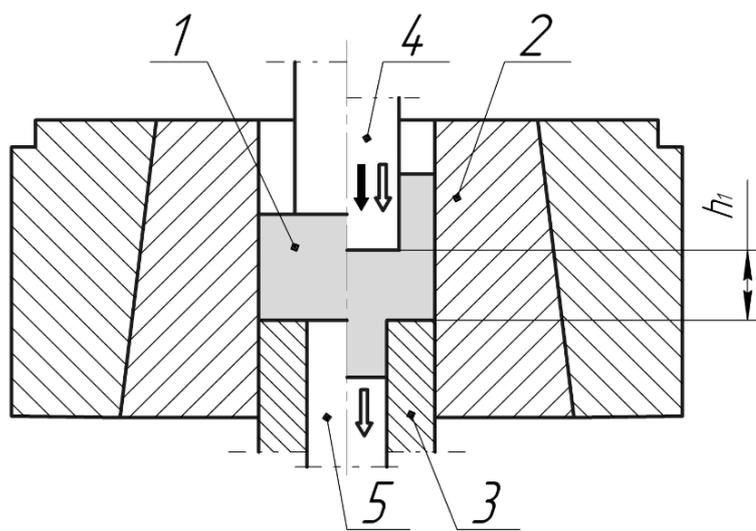
Достижения необходимой донной высоты стакана на втором этапе деформирования может быть обеспечено также дополнительным синхронным опусканием контрпуансона. При этом процесс деформирования похож с методом радиального выдавливания.

Комбинированное возвратно-прямое выдавливание для первого этапа способствует снижению усилия штамповки.

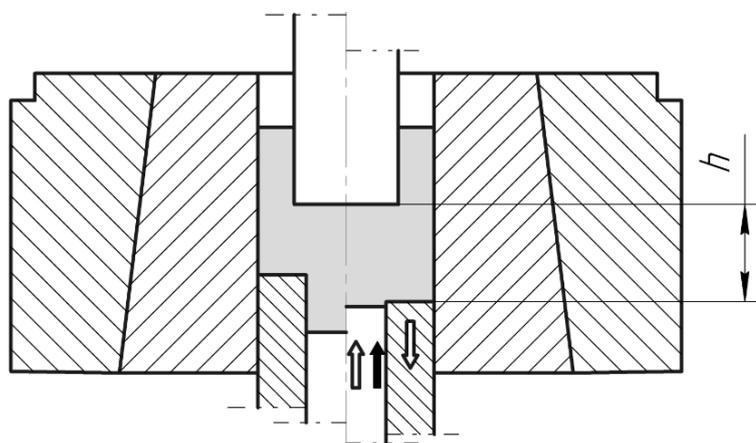
На заключительном этапе при необходимости осуществляют калибровкой обратное выдавливание металла дополнительным движением пуансона.

Существенным преимуществом предлагаемого способа является возможность получения тонкостенных изделий с большей толщиной дна изделий типа стаканов с однородностью механических свойств по сечению стакана.

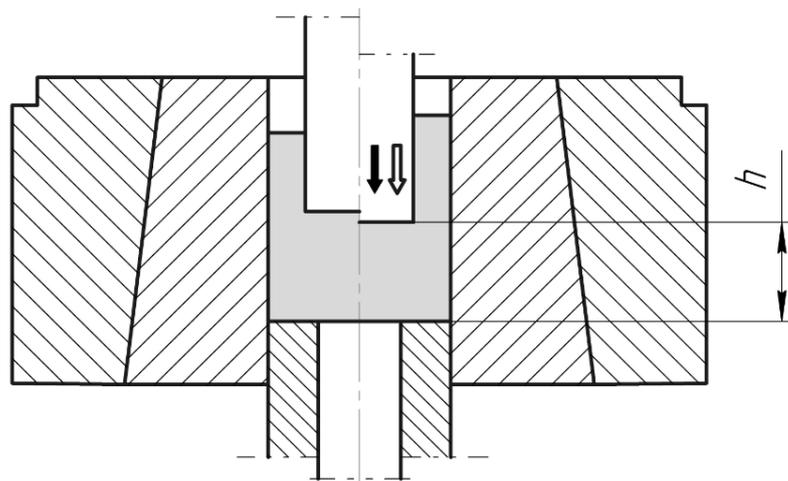
Разработаны и переданы для промышленного освоения технологические рекомендации для изготовления деталей с фланцем и отростком на АО «Мотор Сич». Результаты исследований используются в учебном процессе в практических и проектных работах студентов и магистров специальности ОМД (приложение Е, Ж).



а



б



в

Рисунок 5.8 – Способ изготовления детали типа стакан

Выводы по разделу

1. Разработаны технологические рекомендации и методика проектирования процессов и штампов комбинированного трехстороннего выдавливания деталей типа «стакан с фланцем и отростком» на основе созданной базы расчетных схем и программных продуктов, что обеспечивает снижение затрат и времени на конструкторско-технологическую подготовку производства.

2. Для расчета величины приведенного давления, относительной скорости истечения металла в нескольких направлениях одновременно по ходу процесса деформирования и для анализа поэтапного формоизменения полуфабриката разработана программа с использованием бесплатной среды разработки Turbo Delphi Explorer, что обеспечивает снижение затрат и времени на конструкторско-технологическую подготовку производства.

3. Предложен способ получения детали типа стакан с фланцем и отростком с возвратно поступательным течением металла в отросток, который способствует снижению неравномерности деформированного состояния детали в центральной и донной части заготовки.

4. Результаты теоретических и экспериментальных исследований и соответствующие программы используются в учебном процессе в проектных и практических работах студентов. Методические материалы, рекомендации по проектированию штамповой оснастки и технологического процесса штамповки полых деталей с фланцами переданы для освоения на промышленных предприятиях.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Диссертационная работа посвящена исследованию процесса комбинированного трехстороннего выдавливания деталей типа «стакан с фланцем и отростком» и направлена на решение актуальных задач машиностроения, связанных с уменьшением энергосиловых параметров, повышением качества продукции, расширением номенклатуры изделий за счёт получения штамповкой деталей сложной формы.

1. Анализ литературных данных показал, что способы комбинированного деформирования демонстрируют устойчивое развитие и обладают широкими возможностями по совершенствованию технологий ХОШ выдавливанием. Однако способы изготовления деталей типа «стакан с фланцем и отростком» с применением трехстороннего течения материала в достаточной мере не изучены.

2. Впервые энергетическим методом баланса мощностей получены аналитические зависимости приведенного давления деформирования от геометрических параметров процесса $\bar{p} = f(\bar{R}_1, \bar{R}_n, \bar{R}_k, \bar{R}_o, \bar{R}_m, \bar{h}_i, \alpha, \beta, \gamma)$ для схемы с прямоугольными модулями и схемы учитывающей наличие фасок на инструменте (с трапецидальными модулями). Установлено, что значения приведенного давления деформирования и раскрытия матриц при деформировании в инструменте с фасками выше на 7-10% по сравнению с применением инструмента без фасок.

3. Разработаны на основе установленных экспериментально полях деформаций расчетные модели процесса комбинированного радиально-обратно-прямого выдавливания деталей типа «стакан с фланцем и отростком» с разъединенным очагом деформации с наличием промежуточной недеформируемой зоны, с верхним очагом деформации обратного выдавливания и нижним присоединенным очагом радиально-прямого выдавливания, который в свою очередь характеризуется наличием границы

раздела течения материала в радиальном и прямом направлении. На основе минимума энергетических затрат установлены значения параметра t , определяющего положение границы раздела течения металла в нижнем очаге деформации радиально-прямого выдавливания, который равен $t=0,23$ для схемы не учитывающей наличие фасок на инструменте и $t=0,25$ для выдавливания в инструменте с фасками.

4. На основе МКЭ получен массив данных для определения энергосиловых параметров процесса комбинированного трехстороннего выдавливания. Методом планирования эксперимента получены зависимости и построены графики приведенного давления выдавливания и приведенного давления раскрытия матриц от геометрии инструмента, которые показали характер изменения показателей процесса схожий с результатами, полученными энергетическим методом баланса мощностей. Данные, полученные МКЭ, в среднем на 12% меньше результатов по энергетическому методу.

5. На основе МКЭ и ЭМ установлены закономерности приращения геометрических размеров и объемов конфигурационных частей полуфабриката на основе разработанной расчетной схемы осесимметричного деформирования в качестве оценки возможностей данного способа изготовления деталей с фланцем и отростком. При наличии фасок на инструменте приращение радиуса фланца увеличивается на 2,15%, длины отростка - на 4,06%, а высота стакана уменьшается на 14,48%. При наличии фаски только на пуансоне линейный размер высоты стакана увеличивается, а фланца уменьшается не более чем на 0,5%. Длина отростка при этом уменьшается на 5%. Наличие фаски только на нижней матрице в зоне отростка способствует увеличению длины отростка на 4% и уменьшению высоты стакана и линейного размера фланца на 3,95% и 0,3% соответственно. С учетом фаски только на верхней матрице и в зоне радиального выдавливания линейный размер фланца увеличивается на 2%, также увеличивается и длина отростка на 11,2%, а высота стенки стакана уменьшается на 12,1%.

6. С использованием МКЭ проведена оценка исчерпания ресурса пластичности заготовок. Определены опасные зоны с точки зрения разрушения, которые находятся между переходными кромками инструмента и на периферии фланца. Установлено, что наиболее опасной с точки зрения разрушения является периферия фланца и при достижении степени деформации $e_{max}=0,75$ наступает разрушение фланца.

7. С целью подтверждения теоретических исследований силового режима и формообразования заготовки в процессе деформирования, проведены экспериментальные исследования на заготовках из алюминиевых сплавов АД1, АД31 и свинца С1. При сравнении данных полученных энергетическим методом и экспериментальными исследованиями было установлено, что теоретические расчеты дают результаты на 20% выше экспериментальных. МКЭ показал результаты на 12% ниже экспериментов. Распределения степени деформации, полученной методом делительных сеток на 11% выше данных полученных математическим моделированием.

8. Разработаны технологические рекомендации и методика для проектирования процессов и штампов комбинированного трехстороннего выдавливания деталей типа «стакан с фланцем и отростком» на основе созданной базы расчетных схем и программных продуктов, что обеспечивает снижение затрат и времени на конструкторско-технологическую подготовку производства. Предложен способ получения детали типа стакан с фланцем и отростком с возвратно поступательным течением металла в отросток, который способствует снижению неравномерности деформированного состояния детали в центральной и донной части заготовки. Результаты теоретических и экспериментальных исследований и соответствующие программы используются в учебном процессе в проектных и практических работах студентов. Методические материалы, рекомендации по проектированию штамповой оснастки и технологического процесса штамповки полых деталей с фланцами переданы для освоения на промышленных предприятиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теорияковки и штамповки / Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров, В. А. Огородников [и др.]. Под общ. ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. – М. : Машиностроение, 1992. – 720 с.
2. Холодная объемная штамповка: справочник / Под ред. Г. А. Навроцкого. – М.: Машиностроение, 1973. – 496 с.
3. Головин В. А. Технология холодной штамповки выдавливанием / В. А. Головин, А. И. Митькин, А. Г. Резников. – М.: Машиностроение, 1970. – 152 с.
4. Холодная и полугорячая штамповка на прессах : методические рекомендации / В. А. Головин, В. А. Евстратов, Л. И. Рудман [и др.]. – М. : НИИМАШ, 1981. – 73 с.
5. Евстратов В. А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов / В. А. Евстратов. – Харьков : Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1987. – 144 с.
6. Кузнецу-штамповщику: справочное пособие / Л. Н. Соколов [и др.]. – Донецк : Донбасс, 1986. – 144 с.
7. Артес А. Э. Холодная объемная штамповка в мелкосерийном и серийном производстве. – М. : НИИмаш, 1982. – 58 с.
8. Богоявленский К. Н. Экономические методы формообразования деталей / К. Н. Богоявленский, В. В. Рис. – Л., 1984. – 144 с.
9. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров. – М. : Metallургия, 1986. – 688 с.
10. Werner N. Einsatz der Massivumformung in der Automobilindustrie / N. Werner // Umformtechnik. – 1992. – № 26. – P. 393–395.
11. Авдеев В. М. Изготовление заготовок и деталей пластическим деформированием / В. М. Авдеев, Л. Б. Аксенов, И. С. Алиев. – Л. : Политехника, 1991. – 351 с.

12. Розенберг О. А. Технологическая механика деформирующего протягивания / О. А. Розенберг, Ю. А. Цеханов, С. Е. Шейкин. – Воронеж : Гос. технол. акад., 2001. – 203 с.
13. Алиев И. С. Поиск и классификация новых технологических способов выдавливания / И. С. Алиев // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – ДДМА : Краматорськ, 2003. – С. 207–212.
14. Внедрение технологии холодной объемной штамповки / П. Н. Фролов, И. П. Семикрас, А. Э. Артеc, В. А. Панков, М. Я. Элькин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1987. – № 12. – С. 1–3.
15. О холодном выдавливании полых цилиндрических изделий из малоуглеродистой стали / В. П. Кузнецов, В. Н. Рогожин, П. И. Татаринoв, Е. А. Закуренов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1972. – №6. – С. 5–8.
16. Алиев И. С. Технологические процессы холодного поперечного выдавливания / И. С. Алиев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1988. – № 6. – С. 1–4.
17. Алиев И. С. Методы поиска новых технологических способов точной объемной штамповки выдавливанием / И. С. Алиев // Материалы Международ. научн.-техн. конф. «Новые технологические и организационные структуры» 22–25.12.1994. – Винница, 1994. – С. 98–99.
18. Исаченков Е. И. Перспективы интенсификации процессов холодного прессования / Е. И. Исаченков, В. А. Мишунин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1965. – №9. – С. 1–8.
19. Алиев И. С. Интенсификация технологических процессов выдавливания полых деталей / И. С. Алиев, В. П. Еремин // Совершенствование процессов и машин обработки металлов давлением: сборник научных статей / Редкол.: Л. Н. Соколов (отв. ред.) [и др.] – К. : УМК ВО, 1988. – С. 9–18.

20. Дорошко В. И. Автоматизированное проектирование технологии штамповки полых деталей / В. И. Дорошко, Е. Ю. Коваленко, В. М. Гришин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1993. – № 5–6. – С. 2–4.

21. Краснопольский М. А. Поперечное выдавливание при изготовлении коллекторов электрических машин / М. А. Краснопольский // Вестник машиностроения. – 1964. – № 2. – С. 43–46.

22. Ковка и штамповка. Справочник в 4-х т. Т. 1. Ковка / Под ред. Е. И. Семенова [и др.]. – М. : Машиностроение, 1987. – 384 с.

23. Пат. 67977 А Украина, МПК В21К 21/00. Спосіб видавлювання порожнистих деталей/ І. С. Алієв, І. Г. Савчинський, Л. І. Алієва, К. І. Сивак – № 2003077078; заявл. 15.07.2004; опубл. 15.07.2004, Бюл. № 7.

24. Овчинников А. Г. Холодное выдавливание полых цилиндрических изделий с активными силами трения / А. Г. Овчинников, А. М. Дмитриев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1981. – №6. – С. 24–27.

25. Овчинников А. Г. Деформируемость сплавов при холодном выдавливании полых цилиндрических изделий / А. Г. Овчинников, А. А. Головин, А. М. Дмитриев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1980. – № 1. – С. 7–10.

26. Алиев И. С. Прогнозирование дефектообразования при выдавливании / И. С. Алиев, К. Крюгер // Теория, технология оборудования и автоматизация обработки металлов давлением, резанием : сб. науч. тр. – Тула : ТулГУ, 1999. – Вып. 1. – С. 87–90.

27. Гридасов В. М. Анализ появления дефектов в виде утяжин в процессе комбинированного выдавливания детали типа «стакан с фланцем» / В. М. Гридасов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 1998. – Вып. 4. – С. 338–341.

28. Дмитриев А. М. Прогнозирование утяжин при штамповке / А. М. Дмитриев, А. Л. Воронцов // Справочник инженера. – 2004. – № 11. – С. 29–32.

29. Носаков А. А. Прогнозирование дефектов типа утяжин при точной штамповке выдавливанием / А. А. Носаков, Е. М. Солодун, Л. И. Алиева // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ–Хмельницький : ДДМА, 2002. – С. 105–110.

30. Оценка условий возникновения утяжин при прямом выдавливании на оправке / Л. И. Алиева, Н. С. Грудкина, С. В. Мартынов, Е. А. Мясущкин, С. В. Янчук // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – № 3 (5). – С. 114–119. – ISBN 5–7763–0428–8.

31. А.с. 1660829 СССР, МКИ В21 К 21/08. Способ изготовления изделий типа стаканов с кольцевым поднутрением / И.С. Алиев, Г.Б. Альперович, Ф.Э. Азадов. – №4453640 / 27; заявл. 04.07.1988; опубл. 07.07.1991, Бюл. № 25.

32. Пат. 8620 Украина, МПК В21К 21/00, В21К 23/00. Спосіб видавлювання деталей зі складним профілем / Л. І. Алієва, Р. С. Борисов. – № u200500452; заявл. 17.01.2005; опубл. 15.08.2005, Бюл. № 8.

33. А.с. 1080909 СССР, МКИ В21 J 5/00. Способ многоканального выдавливания / Ф.А. Коммель, Х. Х. Мьянд, Ю. Х. Суйсалу, Х. Э. Хольм. – № 3321367 / 25 – 27; заявл. 13.07.1981; опубл. 23.03.1984, Бюл. № 11.

34. А.с. 912395 СССР, МКИ В21 К 21/08. Способ однопереходной штамповки изделий типа стаканов с боковым выступом / К. А. Кирсанов, Л. И. Щспакин, Л. Б. Цамалашвили, М. А. Бородин, В. Г. Белкин, Е.Н. Юани. – № 2860445 / 25 – 27; заявл. 02.01.1980; опубл. 15.03.1982, Бюл. № 10.

35. Пат. 71184 А Украина, МПК В21К 5/00, В21J 5/06. Спосіб видавлювання порожнистих виробів з фасонною зовнішньою поверхнею / І. С. Алієв, О. А. Носаков, Л. І. Алієва, М. В. Косенко – № 20031110738; заявл. 27.11.2003; опубл. 15.11.2004, Бюл. № 11.

36. Степанский Л. Г. Система управления качеством изделий, изготовляемых холодной объемной штамповкой / Л.Г. Степанский, А.Н. Шляхин, А.В. Кутышкин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2005. – №9. – С. 44–46.

37. Оценка технологической деформируемости при штамповке деталей с фланцем / Л. И. Алиева, И. А. Деревенько, С. В. Мартынов, К. В. Гончарук // Научный Вестник ДГМА : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2014. – № 2 (14Е). – С. 4–8. – Режим доступа : http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%962%2814%D0%95%29_2014/article%5C3.pdf.

38. Алиева Л.И. Анализ напряженно-деформированного состояния при комбинированном выдавливании / Л.И. Алиева, К.В. Гончарук, Е.М. Солодун / Материалы VII Международной научно-технической конференции «Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии». – Харьков : НТУ «ХПИ», 2015. – С. 3–5.

39. Алиева Л. И. Силовые параметры комбинированного выдавливания стержневых деталей с фланцем / Л. И. Алиева, К. В. Гончарук // Обработка металлов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2015. – № 1 (40). – С. 18–22.

40. Investigation of defect in combined precision extrusion process with multiple ram / I. Aliiev, L. Aliieva, P. Abhari, K. Goncharuk // XVI International Scientific Conference New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering. – Series: Monographs. – №48. – Czestochowa, 2015. –P. 90–93.

41. Алиев И. С. Определение величины утяжины в процессе радиально-продольного выдавливания в разъемных матрицах / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, К. В. Гончарук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: зб. наук. пр. – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – № 44 (1087). – С. 3–7.

42. Прогнозирования дефектообразования при комбинированном выдавливании в разъемных матрицах / Л. И. Алиева, И. С. Алиев, П. Б. Абхари, К. В. Гончарук // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула: ТулГУ, 2014. – Часть 1. – С. 63–68.

43. Алиева Л. И. Формоизменение детали в процессе комбинированного радиально-обратного выдавливания / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков, Н. С. Грудкина // Обработка металлов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2010. – № 2 (23). – С. 16–19.

44. Анализ влияния размера очага деформации на параметры комбинированного выдавливания / Л. И. Алиева, К. В. Гончарук, А. В. Шкира, П. В. Гнездилов // Научный Вестник ДГМА: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2014. – № 1 (13Е). – С. 4–9. – Режим доступа: http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%961%2813%D0%95%29_2014/article%5C3.pdf.

45. Влияние видов очагов деформации на характеристики процесса комбинированного выдавливания на оправке / Л. И. Алиева, Л. В. Быкова, К. В. Гончарук, И. А. Деревенько // Материалы VI Международной научно-технической конференции «Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2014. – С. 7–8.

46. Теоретическое исследование комбинированного процесса радиального выдавливания в конической матрице / Ю. К. Филиппов, В. Н. Игнатенко, З. С. Головина, А. В. Рагулин, А. С. Анюхин,

Д. А. Гневашев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2011. – №7. – С. 3–7.

47. Головин В. А. Особенности кинематики течения металла при комбинированном холодном выдавливании полых деталей с фланцем заданных размеров / В. А. Головин, Ю. К. Филиппов, В. Н. Игнатенко // Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров : материалы 49-й Международной научно-технической конференции ААИ. Секция 6. «Заготовительные производства в машиностроении. Подсекция «МиТОМД». – М. : МАМИ, 2005. – Часть 2. – С. 18–20.

48. Разработка и исследование процессов холодной объемной штамповки полых осесимметричных деталей сложной формы / В. А. Головин [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – М. : МГТУ «Станкин», 2005. – № 11. – С. 35–38.

49. Евдокимов А. К. Комбинированное выдавливание с противодавлением / А. К. Евдокимов, К. А. Антонкина // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2012. – №12. – С. 6–12.

50. Lee D.J. New processes to prevent a flow defect in the combined forward-backward cold extrusion of a piston-pin / D.J. Lee, D.J. Kim, B.M. Kim // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – №139. – С. 422–427.

51. Lee Y. S. The forming characteristics of radial-forward extrusion / Y.S. Lee, S.K. Hwang, Y.S. Chang, B.B. Hwang // Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – №113. – P. 136–140.

52. Hwang B.C. A UBET analysis of the non-axisymmetric combined extrusion process / B.C. Hwang, H.I. Lee, W.B. Bae // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – №139. – P. 547–552.

53. Ebrahimi R. An analytical approach for radial-forward extrusion process / R. Ebrahimi, M. Reihanian, M.M. Moshksar // *Materials and Design*. – 2008. – №29. – P. 1694–1700.
54. Левченко В. Н. Исследование процесса комбинированного выдавливания / В. Н. Левченко, И. В. Галась // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – 2014. – №5. – С. 40–50.
55. Lee H.I. A UBET analysis of non-axisymmetric forward and backward extrusion / H.I. Lee, B.C. Hwang, W.B. Bae // *Journal of Materials Processing Technology* 113. – 2001. – P. 103–108.
56. Yamin Hu. The study of cup-rod combined extrusion processes of magnesium alloy (AZ61A) / Hu Yamin, Lai Zhouyi, Zhang Yucheng // *Journal of Materials Processing Technology* 187–188. – 2007. – P. 649–652.
57. Мишунин Л. М. Качество и точность деталей при холодном выдавливании / В. А. Мишунин, Л. М. Решетникова, В. Г. Фролкин, Г. И. Белобородов, Ю. М. Белавин // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1971. – № 7. – С. 4–8.
58. Пат. 67960 А Украина, МПК В21К 21/00, В21К 23/00. Спосіб видавлювання порожнистих деталей з фасонною бічною поверхнею І. С. Алієв, О. К. Савченко; Л. І. Алієва, О. В. Чучин. – № 2003076832; заявл. 21.07.2003; опубл. 15.07.2004, Бюл. № 7.
59. Алиев И. С. Анализ процессов деформирования с несколькими степенями свободы течения металл / И. С. Алиев, К. Крюгер // *Металлургия и горнорудная промышленность*. – 2000. – №8–9. – С. 66–69.
60. Алиев И. С. Моделирование процессов комбинированного выдавливания / И. С. Алиев, Е. М. Солодун, К. Крюгер // *Механика деформированного твердого тела и обработка металлов давлением : сборник научных трудов*. – Тула : Тульский гос. ун-т, 2000. – С. 21–27.
61. Исследование комбинированного поперечно-прямого выдавливания / Л. И. Алиева, Р. С. Борисов, Я. Г. Жбанков, Б. С. Мороз //

Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 45–48.

62. Оценка влияния формы очага деформации при комбинированном выдавливании / Л. И. Алиева, К. В. Гончарук, Л. В. Быкова, П. В. Гнездилов // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали дванадцятої Міжнародної науково-технічної конференції 23–24 вересня 2014 року / Під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ : ДДМА, 2014. – С. 15–16.

63. Алиева Л. И. Планирование эксперимента для определения силового режима при комбинированном двухстороннем выдавливании / Л. И. Алиева, С. В. Мартынов, К. В. Гончарук // V научно-техническая конференция молодых специалистов «Энергомашспецсталь–2013». – Краматорск, 2013. – С. 25–26.

64. Алиева Л. И. Характеристика формоизменения металла при выдавливании / Л. И. Алиева, Р. С. Борисов, Е. Л. Скрипниченко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2003. – С. 340–344.

65. Алиев И. С. Анализ процессов комбинированного выдавливания методом верхней оценки / И. С. Алиев, В. И. Гридасов // Сборник научных статей. – 1996. – С. 62–66.

66. Алиев И. С. Исследование комбинированного радиально-обратного выдавливания полых деталей с фланцем / И. С. Алиев, А. А. Носаков // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – ДДМА : Краматорськ, 2003. – С. 181–186.

67. Комбинированное выдавливание полых деталей с фланцем / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков, С. В. Мартынов, Б. С. Мороз // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ, 2007. – С. 231–236.

68. Компьютерное моделирование силового режима при комбинированном выдавливании стержневых деталей / Л. И. Алиева, Г. П. Клименко, С. В. Мартынов, К. В. Гончарук // Научный Вестник ДГМА : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 2 (12Е). – С. 44–51. – Режим доступа: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%962\(12%D0%95\)_2013/%E2%84%962\(12%D0%95\)_2013/article/9.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%962(12%D0%95)_2013/%E2%84%962(12%D0%95)_2013/article/9.pdf)

69. Заблоцкий В. Н. Компьютерное моделирование силового режима при высадке втулок с фланцем / В. Н. Заблоцкий, С. В. Мартынов, К. В. Гончарук // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2013. – № 2 (31). – С. 26–31.

70. Абхари П. Б. Моделирование комбинированного выдавливания в разъемных матрицах / П. Б. Абхари, К. В. Гончарук, Л. К. Парашенко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали дванадцятої Міжнародної науково-технічної конференції 23–24 вересня 2014 року / Під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ : ДДМА, 2014. – С. 9–10.

71. Алиева Л. И. Моделирование процесса комбинированного выдавливания полых деталей с фланцем на основе визуализации постановки задачи / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков, Е. А. Мясущкин // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. пр. – Краматорськ, 2008. – №1 (11). – С. 20–24.

72. Алиева Л. И. Анализ процесса последовательного радиально-прямого выдавливания методом кинематических модулей / Л. И. Алиева, О. В. Чучин // Научный Вестник ДГМА : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 4 (19Е). – С. 70–79.

73. Бовтало Я. Н. Разработка технологического процесса изготовления осесимметричных деталей с фланцем с применением комбинированного трёхстороннего выдавливания: автореф. дис. ... канд. тех.

наук: 28.10.11 / Ярослав Николаевич Бовтало, Московский государственный технологический университет «Станкин». – М., 2011. – 20 с.

74. Кузнецов Г. В. Комбинированное выдавливание деталей с фланцами / Г. В. Кузнецов, В. М. Мирошниченко, Ю. М. Кансберг // Кузнечно-штамповочное производство. – 1974. – № 5. – С. 21–23.

75. Алиев И. С. Технологические возможности новых способов комбинированного выдавливания // Кузнечно-штамповочное производство. – 1990. – №2. – С. 7–10.

76. Stress–strain state of combined backward–radial extrusion process of can–franged part / Milutinovic Mladomir, Cupkovic Dorde, Vilotic Dragisa, Pepelnjak Tomaz, Plancak Miroslav // J. Technol. Plast. – 2006. – 31. – № 1–2. – С. 110–116.

77. Process design of the cold forging of a billet by forward and backward extrusion. / Cho H. Y., Min G. S., Jo C. Y., Kim M. H. // J Mater Process Technol. – 2003. – 135. – P. 375–381.

78. Yang D. Y. Design of processes and products through simulation of three-dimensional extrusion / Yang D. Y., Kim K. J. // J Mater Process Technol. – 2007. – Nr 191. – P. 2–6.

79. Farhoumand A. Analysis of forward–backward-radial extrusion process / A. Farhoumand, R. Ebrahimi // Materials and Design. – 2009. – №30. – С. 2152–2157.

80. The forming characteristics of radial–forward extrusion / Y.S. Lee, S.K. Hwang, Y.S. Chang, B.B. Hwang // Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – №113. – С. 136–140.

81. А. с. 1426686 СССР. МКИ В 21 J 13/12. Штамп для выдавливания деталей с фланцами / И. С. Алиев, О. К. Савченко, Е. А. Гришин, М. Я. Элькин. – № 4141261/31–27. заявл. 01.08.86 опубл. 15.03.1982, Бюл. №36.

82. Кузнецов А. В. Штамповка поковок выдавливанием в разъемных матрицах (состояние и перспективы) / А. В. Кузнецов, О. В. Протопопов, В. Т. Ключков // Кузнечно-штамповочное производство. – 1980. – № 11. – С. 2–6.

83. Смуров А. М. Из опыта разработки, освоения и внедрения штампов с разъемной матрицей для металло-экономной штамповки / А. М. Смуров // Кузнечно-штамповочное производство. – 1992. – №6. – С. 5–8.

84. Разработка штампов с разъемными матрицами для процессов поперечного выдавливания/ И. С. Алиев, А. И. Лобанов, Р. С. Борисов, И. Г. Савчинский // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ, 2003. – С. 493–498.

85. Верховец С. А. Поперечное выдавливание в штампах с разъемными матрицами / С. А. Верховец, О. В. Каплун // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ, 2000. – С. 367–371.

86. Барков В. С. Безоблойная штамповка в разъемных матрицах поковок с фланцем / В. С. Барков // Кузнечно-штамповочное производство. – 1983. – № 9. – С.17–18.

87. Савченко О. К. Проектирование штампов с разъемными матрицами // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 1998. – С. 407–410.

88. Роганов Л. Л. Перспективные конструктивные схемы машин для разделения проката с клиношарнирным механизмом/ Л. Л. Роганов, Н. В. Чоста // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ–Слов'янськ, 2000 – С. 437–439.

89. Лобанов А. И. Совершенствование технологических режимов и конструктивных параметров оснастки для малоотходной штамповки в разъемных матрицах : дис. канд. тех. наук : 05.03.05 – Процессы и машины обработки давлением / Лобанов Александр Иванович. – Краматорск : ДГМА, 2006. – 238 с.

90. Проектирование штампов для комбинированной штамповки стержневых деталей / О. К. Савченко, Е. М. Солодун, А. А. Носаков, А. И. Лобанов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2002. – С. 343–347.

91. Исследование штампов с разъемными матрицами для процессов поперечного выдавливания / И. С. Алиев, А. И. Лобанов, Р. С. Борисов, И. Г. Савчинский // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2004. – № 8. – С. 21–26.

92. Алиев И. С. Возможности применения схем комбинированного течения при изготовлении прецизионных деталей / И. С. Алиев, Е. М. Солодун, А. И. Лобанов // Металлург : Материалы международной научно-практической конференции «Перспективы развития горнометаллургического комплекса». – Москва : Metallurgizdat – Metallurg, Спецвыпуск, 2004. – С. 40–41.

93. Plancak M. Non-conventional cold extrusion / M. Plancak, A. Bramley, F. Osman // Journal of Materials Processing Technology. – 1992. – №34. – С. 465–472.

94. Пат. 76204 Украина, МПК В21J 13/02. Штамп для комбінованого видавлювання стакана з фланцем / Л. И. Алиева, С. В. Мартинов, Н. С. Грудкина, О. Д. Комирченко; заявитель и патентообладатель ДГМА.– №201207386; заявл. 18.06.12; опубл. 25.12.12, Бюл. № 24. – 3 с.: ил.

95. Пат. 35731 Украина В21D22/00. Штамп для холодного зворотного видавлювання / А. П. Качанов, Д. О. Корольов; заявитель и

патентообладатель Кировоградский ГТУ.– №98031610; заявл. 31.03.98; опубл. 16.04.01, Бюл. № 3. – 4 с.: ил.

96. Пат. 37360 Украина, В21D24/02. Штамп для холодного зворотного видавлювання / А. П. Качанов, Д. О. Корольов; заявитель и патентообладатель Кировоградский ИС/ХМ.– №98041660; заявл. 01.04.98; опубл. 15.05.01, Бюл. № 4. – 3 с.: ил.

97. Пат. 36292 Украина, МПК В21J 13/02. Штамп для видавлювання порожнистих деталей зі складним профілем / И. С. Алиев, Я. Г. Жбанков; заявитель и патентообладатель ДГМА.– № u200804529; заявл. 09.04.08; опубл. 27.10.08, Бюл. № 20. – 1 с.: ил.

98. Технология изготовления патрубков крупногабаритных толстостенных сосудов / Е. Н. Мошнин, Н. И. Ромашко, О. В. Щерба, В. А. Однодушный, Ю. Л. Лукьяненко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1990. – № 2. – С. 10–13.

99. Артес А. Э. Совершенствование технологических процессов холодной объемной штамповки деталей из трубных заготовок / А. Э. Артес, Д. Г. Кобзианидзе // Кузнечно-штамповочное производство. – 1989. – № 10. – С. 7–10.

100. Пат. 64958 Украина, МПК В21J 13/02. Штамп для комбінованого видавлювання деталей з фланцем та відростком / Л. И. Алиева, С. В. Мартинов, Н. С. Грудкина; заявитель и патентообладатель ДГМА.– № u201104705; заявл. 18.04.11; опубл. 25.11.08, Бюл. № 22. – 3 с.: ил.

101. Экспериментальное исследование течения металла при комбинированном процесса радиального и обратного выдавливания в конической матрице / Ю. К. Филиппов, В. Н. Игнатенко, З. С. Головина, А. В. Рагулин, А. С. Анюхин, Д. А. Гневашев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2011. – №9. – С. 33–35.

102. Кутяйкин В. Г. Анализ микроструктуры заготовок в очаге деформации при вдавливании пуансона с плоским торцом / В. Г. Кутяйкин, О. В. Кутяйкин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2007. – №5. – С. 11–16.

103. Технологические возможности трехстороннего комбинированного выдавливания / А. В. Шкира, Л. И. Алиева, М. С. Косилов, А. А. Еремина // Всеукраинская научно-техническая конференция молодых специалистов «Энергомашспецсталь–2013» – Краматорск, 24 мая 2012. – С. 37–39.

104. Алиева Л. И. Комбинированное трёхстороннее выдавливание сложнопрофилированных деталей / Л. И. Алиева, И. А. Деревенько, А. В. Шкира // XI Міжнародна науково-технічна конференція «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку». – Краматорськ : ДДМА, 4–6 червня 2013. – С. 17.

105. Алиева Л. И. Холодное выдавливание прецизионных деталей сложной формы / Л. И. Алиева, О. А. Жукова, А. В. Шкира // XIV Международная научно-техническая конференция «Прогрессивная техника, технология и инженерное образование». – Севастополь, 25–28 июня 2013. – С. 28–29.

106. Алиева Л. И. Холодное выдавливание прецизионных деталей сложной формы / Л. И. Алиева, А. В. Шкира, К. В. Гончарук // I Всеукраїнська науково-практична конференція «Сучасні технології промислового комплексу». – Херсон : Херсонський національний технічний університет, 2015. – Вип. 2. – С. 33–34.

107. Богоявленский К. Н. Холодная раскатка заготовок сложного профиля / К. Н. Богоявленский, Н. М. Елкин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1986. – № 7. – С. 22–25.

108. Артес А. Э. Алюминиевые сплавы в производстве деталей механизмов и машин (штампованные поковки): методические указания / А. Э. Артес. – М. : МГТУ «Станкин», 2004. – 56 с.

109. Шестаков Н. А. Энергетические методы расчёта процессов обработки металлов давлением: учебное пособие / Шестаков Н. А. – М.: МГИУ, 1998. – 125 с.

110. Елкин Н. М. Технология холодной раскатки точных заготовок / Н. М. Елкин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1995. – № 1. – С. 20–22.

111. Алиева Л. И. Перспективы развития процессов точной объемной штамповки выдавливанием / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2008. – № 1 (1). – С. 13–19.

112. Алиев И. С. Совершенствование процесса обжима корпуса конденсатора обкаткой, путём управления деформируемостью материала / И. С. Алиев, В. А. Матвийчук // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2007. – № 3 (9). – С. 7–12.

113. Матвийчук В. А. Разработка и опыт внедрения на предприятиях Винничины ресурсосберегающих процессов штамповки обкатыванием / В. А. Матвийчук // Застосування теорії пластичності в сучасних технологіях обробки тиском : матеріали міжнар. наук.-техн. конф., 30 травня–2 червня 2001 року. – Вінниця, 2001. – С. 109–110.

114. Влияние пластической деформации при холодной торцовой раскатке на вакуумную герметичность изделий / Н. М. Ёлкин, В. А. Матвийчук, С. Н. Старцев [и др.] // Электронная техника. Сер. 4. Электривакуумные и газоразрядные приборы. – 1983. – № 2. – С. 43–46.

115. А. с. № 1038033 СССР, МКИ В 21 Н 1/06. Способ изготовления кольцевых заготовок раскаткой / К. Н. Богоявленский, Н. М. Ёлкин,

С. М. Мочалов, В. А. Матвийчук, В. П. Жуков (СССР). – № 3428000 / 25–27 ; заявл. 20.04.82 ; опубл. 30.08.83 , Бюл. №32. – 1 с. : ил.

116. Кривда Л. Д. Экспериментальная установка для исследования процесса штамповки с обкатыванием / Л. Д. Кривда, А. С. Пшеничнюк, С. З. Майборода // Вестник КПИ. Машиностроение. – Киев : Вища школа, 1979. – Выпуск 16. – С. 18–21.

117. Гун Г. Я. Математическое моделирование процессов ОМД / Г. Я. Гунн. – М. : Metallurgiya, 1983. – 352 с.

118. Полухин П. И. Методы исследования процессов ОМД / П. И. Полухин. – М. : Metallurgiya, 1977. – 110 с.

119. Громов П. П. Теория обработки металлов давлением / П. П. Громов. – М. : Metallurgiya, 1967. – 280 с.

120. Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 423 с.

121. Алиев И. С. Методика моделирования силового режима процессов выдавливания в разъёмных матрицах / И. С. Алиев // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – № 8–9. – С. 458–462.

122. Алиев И. С. Методика анализа процессов точной объемной штамповки с помощью модульных полей скоростей / И. С. Алиев // Разработка и исследование высокоэффективных технологических процессов, оснастки и оборудования. Обработка металлов давлением. Тематический сборник научных трудов. – Киев : УМК ВО, 1990. – С. 7–17.

123. Алиева Л. И. Совершенствование процессов холодного выдавливания осесимметричных деталей с фланцем : дис. ... канд. тех. наук : 05.03.05 – Процессы и машины обработки давлением / Алиева Лейла Ибрагимовна. – Луганск : ВНУ им. В. Даля, 2006. – 215 с.

124. Алиева Л. И. Исследование процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания деталей с фланцем с разъединенным

очагом деформации / Л. И. Алиева, Н. С. Грудкина // Вестник КГИУ. – Темиртау, 2014. – № 1 (4). – С. 19–24.

125. Получение сложнопрофильных кольцевых деталей с требуемыми свойствами методом холодной торцевой раскатки / С. Н. Старцев, В. А. Матвийчук, Н. М. Ёлкин, И. А. Васянович // Материалы семинара «Внедрение прогрессивных технологических процессов в холодно-штамповочном производстве». – Л. : ЛДНТП, 1982. – С. 68–73.

126. Яковченко А. В. Аналитические методы моделирования нестационарных процессов обработки металлов давлением / А. В. Яковченко. – Донецк : ДонНИИЧермет, 1997. – 177 с.

127. Джонсон В. Механика процессов выдавливания металла / В. Джонсон, Х. Кудо. – М. : Металлургия, 1966. – 317 с.

128. Дмитриев А. М. Выдавливание полых изделий с раздачей заготовки в движущейся матрице / А. М. Дмитриев, А. Л. Воронцов // Вестник машиностроения. – 2004. – № 10. – С. 55–61.

129. Каменецкий Б. И. Опытная технология холодной объёмной штамповки из труб деталей с внутренними фланцами / Б. И. Каменецкий, В. А. Обухов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1999. – № 12. – С. 30–31.

130. Кузнецов Д. П. Усилие деформирования трубной заготовки при изготовлении холодным поперечным выдавливанием внутреннего фланца / Д. П. Кузнецов, Ю. И. Гуменюк, Е. Т. Савушкин // Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением : сб. науч. тр. – Тула : ТПИ, 1983. – 164 с.

131. Кухарь В. Д. Формирование утолщений на стенках трубчатых заготовок / В. Д. Кухарь, А. А. Харитонов, Л. П. Бурак // Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением : межвуз. сб. научн. тр. – Тула : ТулГУ, 2002. – С. 172–177.

132. Wang Z. Numerical simulation and experimental study on the multi-step upsetting of a thick and wide flange on the end of a pipe / Z. Wang // J. Mater. Process. Technol. – 2004. – № 1–3. – P. 321–327.
133. Чудаков П. Д. Нестационарное пластическое течение упрочняющегося материала / П. Д. Чудаков // Исследование в области пластичности и ОМД. – Тула: ТПИ, 1974. – С. 34–41.
134. Пасько А. Н. Холодная объемная штамповка осесимметричных заготовок : монография / А. Н. Пасько. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2004. – 252 с.
135. Степанский Л. Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением / Л. Г. Степанский. – М. : Машиностроение, 1982. – 217 с.
136. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологий металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М. : Машиностроение ; София : Техника, 1980. – 304 с. : ил.
137. Унксов Е. П. Теория пластических деформаций металлов / Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров. – М. : Машиностроение, 1983. – 598 с.
138. Алюшин Ю. А. Теоретические основы энергетических методов расчета процессов обработки металлов давлением : учебное пособие / Ю. А. Алюшин, С. А. Еленев. – Ростов н/Д. : РИСХМ, 1987. – 106 с.
139. Шофман Л. А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки / Л. А. Шофман. – М. : Машиностроение, 1964. – 375 с.
140. Алюшин Ю. А. Энергетические основы механики : учебное пособие для вузов / Ю. А. Алюшин. – М. : Машиностроение, 1999. – 192 с.
141. Чучин О. В. Кинематически возможные поля скоростей при выдавливании в разъемных матрицах / О. В. Чучин, В. Г. Бойко, Р. С. Борисов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2000. – С. 52–56.

142. А. с. 614877 СССР, МКИ В 21 J 5/12. Способ получения полых изделий с фасонной боковой поверхностью / И. С. Алиев, К. Н. Богоявленский. – № 2188373 / 25–27 ; заявл. 10.11.75 ; опубл. 15.07.78 , Бюл. № 26.

143. Иванов К. М. Метод конечных элементов в технологических задачах: учебн. пособие / К. М. Иванов, В. С. Шевченко, Э. Е. Юргенсон. – СПб.: Изд-во ПИМаш, 2000. – 224 с.

144. QForm – универсальная и эффективна программа для моделирования коки и штамповки / Н. В. Биба, С. А. Стебунов, Ю. А. Гладков, П. С. Мордвинцев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2011. – № 1. – С. 36–42.

145. Евстратов В. А. Разработка и экспериментальное исследование технологического процесса выдавливания деталей типа втулок с двумя фланцами и ступицами / В. А. Евстратов, И. В. Куликов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1985. – №10. – С. 17–18.

146. Gouveia V. P. P. A. Steady-state finite-element analysis of cold forward extrusion / V. P. P. A. Gouveia, J. M. C. Rodrigues, P. A. F. Martins // Journal of Materials Processing Technology. – Elsevier, 1998. – № 73. – P. 281–288.

147. Смирнов-Аляев Г. А. Механические основы пластической обработки металлов / Г. А. Смирнов-Аляев. – Л. : Машиностроение, 1978. – 368 с.

148. Колмогоров В. Л. Напряжения, деформации, разрушение / В. Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1970. – 230 с.

149. Богатов А. А. Ресурс пластичности при обработке давлением / А. А. Богатов, О. И. Мижирицкий, С. В. Смирнов. – М.: Металлургия, 1984. – 144 с.

150. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. – К.: Вища школа, 1983. – 175 с.

151 Губкин С. И. Пластическая деформация металлов. Физико-механические основы пластической деформации / С. И. Губкин. – М.: Металлургиздат, 1961. – 376 с.

152. Лебедев А. А. О выборе инвариантов напряжённого состояния при решении задач механики материалов / А. А. Лебедев, В. М. Михалевич // Проблемы прочности. – 2003. – №3. – С. 5–14.

153. Огородников В. А. Энергия. Деформации. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы) / В. А. Огородников, В. Б. Киселёв, И. О. Сивак. – Винница: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 204 с.

154. Сивак И. О. Оценка пластичности металлов при холодной пластической деформации / И. О. Сивак, Е. И. Сивак, С. И. Сухоруков // Изв. ТулГУ. Серия: Механика твёрдого деформируемого тела и обработка металлов давлением. – Тула: ТулГУ, 2004. – Вып. 2. – С. 114–121.

155. Experimental and numerical study of optimum die profile in backward rod extrusion / M. Bakhshi-Jooybari, M. Saboori, S. J. Hosseinipour, M. Shakeri, A. Gorji // Journal of Materials Processing Technology. – Elsevier, 2006. – № 177. – P. 596–599.

156. Грушко А. В. Определение параметров кривой течения материала по его твердости / А. В. Грушко // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2010. – № 2 (23). – С. 83–87.

157. Грушко А. В. Изучение двухпараметрической степенной кривой упрочнения на основе твердости и характеристик прочности металла / А. В. Грушко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП». – 2013. – №43 (1016). – С. 66–72.

158. Алиев И. С. Системное проектирование технологических процессов холодного выдавливания / И. С. Алиев, О. К. Савченко, А. А. Носаков // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні : зб. наук. пр. – Луганськ : Вид-во СНУ, 2001. – С. 12–18.

159. Рене И. П. Теоретические основы экспериментальных методов исследования деформаций методом сеток в процессах обработки металлов давлением / И. П. Рене. – Тула : ТПИ, 1979. – 96 с.

160. Рене И. П. Обобщение метода обработки результатов искажения делительной сетки, предложенного П. О. Пашковым, для исследования процессов сложного деформирования / И. П. Рене // Исследования в области пластических деформаций и обработки металлов давлением. Сб. Технология машиностроения. Вып. 1. Тула, Приокское изд-во, 1967. – 176 с.

161. Алиева Л. И. Теоретический анализ процесса комбинированного выдавливания деталей с фланцем энергетическим методом / Л. И. Алиева, К. В. Гончарук, А. В. Шкира // Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 2 (41). – С. 35–40.

162. Анализ влияния формы инструмента на энергосиловые параметры при комбинированной осадке / К. В. Гончарук, Л. И. Алиева, Н. С. Грудкина, Л. В. Таган, А. В. Шкира // Научный Вестник ДГМА : сб. науч. тр. – Краматорск, 2015. – № 3 (18Е). – С. 70–79.

163. Анализ энергосиловых параметров процесса комбинированной осадки / К. В. Гончарук, Л. И. Алиева, Н. С. Грудкина, Л. В. Таган, А. В. Шкира // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали тринадцятої Міжнародної науково-технічної конференції 2–4 червня 2015 року. – Краматорськ: ДДМА, 2015. – С. 24–25.

164. Чудаков П. Д. Исследование двустороннего холодного выдавливания / П. Д. Чудаков, И. С. Калениченко // Кузнечно-прессовое производство. – 1975. – №5. – С. 4–6.

165. Евстратов В. А. Теория обработки металлов давлением / В. А. Евстратов. – Харьков : Вища школа, 1981. – 248 с.

166. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 541 с.

167. Матвеев С. А. Возможности конечно-элементного анализа при решении технологических задач обработки металлов давлением / С. А. Матвеев, В. С. Мамутов, К. М. Иванов // *Металлообработка*. – 2003. – № 1. – С. 23–28.

168. Степанский Л. Г. Об опытной проверке результатов компьютерного моделирования процессов пластического деформирования / Л. Г. Степанский // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2001. – № 6. – С. 36–40.

169. Flow formulation for numerical solution of metal forming processes. In *Numerical analyses of forming processes* / Ed. J.F.T. Pittman, O. C. Zienkiewicz, R. D. Wood, J. M. Alexander. – 1984. – P. 1–44.

170. Возникновение утяжин при прямом выдавливании на оправке / Л. И. Алиева, С. В. Мартынов, Н. С. Грудкина, Е. А. Мясущкин // I Научно-техническая конференция «Энергомашспецсталь – 2007». – Краматорск : ПАО «Энергомашспецсталь», 2007. – С. 33–35.

171. Алиева Л. И. Радиальное выдавливание фланцев на оправке / Л. И. Алиева, С. В. Мартынов // II Научно-техническая конференция молодых специалистов «Энергомашспецсталь–2008». – Краматорск, 2008. – С. 26–28.

172. Алиева Л. И. Изготовление втулок с фланцем из полых заготовок радиально-прямым выдавливанием / Л. И. Алиева, С. В. Мартынов, Н. А. Калина // *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку : матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції*. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 8.

173. Численное моделирование процесса равноканального многоугольного прессования / А. В. Периг, С. А. Короткий, А. М. Лаптев, С. В. Мартынов // *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво) Полтавського національного технічного університету*

імені Юрія Кондратюка. – Вип. 3 (25). – Т. 2. – Полтава : ПолтНТУ, 2009. – С. 159–163.

174. Исмагилов И. М. Моделирование процесса обратного выдавливания с подпором жидкости и активными силами трения по матрице методом конечных элементов / И. М. Исмагилов, А. В. Вахрушев // Известия вузов. Машиностроение. – 1985. – №8. – С. 92–94.

175. Алиева Л. И. Исследование процессов радиального выдавливания методом конечных элементов / Л. И. Алиева, П. Абхари, Я. Г. Жбанков // Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2009. – №1 (20). – С. 19–24.

176. Савченко О. К. Штамповка корпусных изделий авиационной промышленности из титановых сплавов / О. К. Савченко, С. В. Мартынов, Д. О. Савченко // IV Научно-техническая конференция молодых специалистов ПАО «Энергомашспецсталь–2012». – Краматорск, 2012. – С. 36–37.

177. Алиева Л. И. Применение математического аппарата для определения энергосиловых характеристик комбинированного трехстороннего выдавливания / Л. И. Алиева, А. В. Шкира, К. В. Гончарук // Научный Вестник ДГМА : сб. науч. трудов. – Краматорск, 2015. – № 2 (17Е). – С. 5–10.

178. Алиева Л. И. Деформируемость металла в процессе трехстороннего комбинированного выдавливания / Л. И. Алиева, А. В. Шкира, К. В. Гончарук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : зб. наук. праць. Серія : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – № 43 (1086). – С. 3–7.

179. Оценка ресурса пластичности при комбинированном радиально-продольном выдавливании / Л. И. Алиева, И.А. Деревенько, К. В. Гончарук, А.В. Шкира // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку.

Матеріали дванадцятої Міжнародної науково-технічної конференції 23–24 вересня 2014 року. — Краматорськ: ДДМА, 2014. — С. 17–18.

180. Експериментальне дослідження деформованого стану комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання / Л. І. Алієва, Є. М. Солодун, Х. В. Гончарук, О. В. Шкіра // Вісник Херсонського національного технічного університету. — Херсон, 2015. — № 4 (55). — С. 82–87.

181. Грудкина Н. С. Формообразование осесимметричных деталей типа «стакан с фланцем» с использованием комбинированного радиально-обратного выдавливания : дис. канд. техн. наук : 05.03.05 : защищена 26.03.2014 / Грудкина Наталья Сергеевна. — Краматорск, 2014. — 264 с.

182. Алиева Л. И. Выбор кинематических модулей для определения силовых параметров радиального выдавливания / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. пр. — Краматорськ : ДДМА, 2006. — № 3 (5). — С. 108–113.

183. Исследование процесса протяжки заготовок / Я. Г. Жбанков, В. И. Шимко, Л. В. Таган, А. В. Шкіра // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. — 2013. — №1(13). — С. 13–18.

184. Пат. 107950 Україна, МПК В21J 5/12, В21К 21/00. Спосіб виготовлення порожнистих виробів типу стакана / Л. І. Алієва, Х. В. Гончарук, О. В. Шкіра, Р. І. Сивак; власник Донбаська державна машинобудівна академія. — № u 2015 13100; заявл. 30.12.2015 ; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12. — 3 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Расчет приведенного давления процесса комбинированного трехстороннего
выдавливания энергетическим методом схемы не учитывающей фаски на
инструменте в MathCAD

† ORIGIN := 1

Геометрические размеры схемы:

$$\begin{array}{llll} RR_1 := 22.5 & HH_1 := 10 & RR_n := 14.1 & \beta := \frac{2}{\sqrt{3}} \quad \sigma_s := 1 \quad \mu_s := 0.08 \\ RR_0 := 10 & HH_2 := 15 & HH_3 := 15 & ff := 35 \quad V_0 := 1 \\ RR_f := 25 & hh_f := 5 & HH_4 := 20 & RR_k := 15 \end{array}$$

Приведение к параметрическому виду

$$\begin{array}{llll} R_1 := \frac{RR_1}{RR_1} & H_1 := \frac{HH_1}{RR_1} & H_3 := \frac{HH_3}{RR_1} & H_4 := \frac{HH_4}{RR_1} \\ R_0 := \frac{RR_0}{RR_1} & H_2 := \frac{HH_2}{RR_1} & f := \frac{ff}{RR_1} & R_n := \frac{RR_n}{RR_1} \\ R_f := \frac{RR_f}{RR_1} & h_f := \frac{hh_f}{RR_1} & & R_k := \frac{RR_k}{RR_1} \end{array}$$

```
P := k ← 0
for μs ∈ 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35
  i ← 0
  j ← k + 1
  k ← j + 1
  for Rk ∈ 0.05, 0.06.. 1
    kk ← 1
    p1 ← 1 +  $\frac{1}{2} + \frac{1}{1 - R_n^2} \cdot \ln\left(\frac{1}{R_n}\right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[ \frac{H_1}{R_n} - \frac{[(H_1 + H_2)^2 - H_1^2]}{2 \cdot H_2 \cdot R_n} \right] + \frac{R_n}{3 \cdot \sqrt{3} \cdot H_2} \dots$ 
      +  $\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[ \frac{(1 - R_n^3)}{3 \cdot H_2 \cdot (1 - R_n^2)} + \frac{H_1}{H_2 \cdot (1 - R_n^2)} \right] + \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \left[ \frac{H_1}{(1 - R_n^2)} - \frac{(H_1 + H_2)^2 - H_1^2}{2 \cdot H_2 \cdot (1 - R_n^2)} \right] \dots$ 
      +  $\frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{R_n \cdot H_3}{1 - R_n^2} + \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{H_3}{(1 - R_n^2)} + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s$ 
    p2 ←  $R_k^2 + 2R_0^2 + \frac{(R_k^2 - R_0^2)}{2} + R_k^2 \cdot \ln\left(\frac{R_k}{R_0}\right) + \left[ \frac{(1 - R_k^2)}{2} - R_k^2 \cdot \ln\left(\frac{1}{R_k}\right) \right] + \ln(R_f) \cdot (1 - R_k^2) \dots$ 
      +  $\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[ \frac{(R_0^3)}{3 \cdot h_f} + R_0 \cdot \frac{(R_k^2 - R_0^2)}{h_f} \right] + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left[ \frac{(1 - R_k^3)}{3 \cdot h_f} - R_k^2 \cdot \frac{(1 - R_k)}{h_f} \right] \dots$ 
      +  $\left[ \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (0 - R_k \cdot h_f) + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[ \frac{(R_k^2 - R_0^2) \cdot h_f}{R_0^2} + 3R_0 \cdot h_f \right] \right] + \frac{h_f}{\sqrt{3}} \dots$ 
      +  $\frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot (H_4) + \frac{2 \cdot \mu_s}{\sqrt{3}} \cdot \left[ \frac{(R_k^3 - 1)}{3 \cdot h_f} + R_k^2 \cdot \frac{(R_k - R_0)}{h_f} \right] \dots$ 
```

```

+ \frac{2 \cdot \mu_s}{\sqrt{3}} \left[ \frac{(1 - R_k^3)}{3 \cdot h_f} + \frac{(1 - R_k)}{h_f} \right] + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot (1 - R_k^2) \cdot \frac{(R_f - 1)}{h_f}
G ← 0
λ ← R_n^2
p ← (1 - λ) · p_1 + λ · (p_2 + G)
i ← i + 1
P_{i,j} ← μ_s
P_{i,k} ← p
P

```

P =

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.05	3.294	0.1	3.615	0.15	3.935	0.2	4.256	0.25
2	0.05	3.291	0.1	3.611	0.15	3.931	0.2	4.25	0.25
3	0.05	3.289	0.1	3.608	0.15	3.926	0.2	4.244	0.25
4	0.05	3.287	0.1	3.604	0.15	3.922	0.2	4.239	0.25
5	0.05	3.284	0.1	3.601	0.15	3.917	0.2	4.233	0.25
6	0.05	3.282	0.1	3.598	0.15	3.913	0.2	4.228	0.25
7	0.05	3.28	0.1	3.594	0.15	3.908	0.2	4.223	0.25
8	0.05	3.278	0.1	3.591	0.15	3.904	0.2	4.217	0.25
9	0.05	3.277	0.1	3.589	0.15	3.9	0.2	4.212	0.25
10	0.05	3.275	0.1	3.586	0.15	3.897	0.2	4.207	0.25
11	0.05	3.274	0.1	3.583	0.15	3.893	0.2	4.203	0.25
12	0.05	3.273	0.1	3.581	0.15	3.89	0.2	4.198	0.25
13	0.05	3.272	0.1	3.579	0.15	3.886	0.2	4.194	0.25
14	0.05	3.271	0.1	3.577	0.15	3.883	0.2	4.19	0.25
15	0.05	3.271	0.1	3.576	0.15	3.881	0.2	4.186	0.25
16	0.05	3.27	0.1	3.574	0.15	3.878	0.2	4.182	...

```

R_k :=
for μ_s ∈ 0
  i ← 0
  j ← k + 1
  k ← j + 1
  for R_k ∈ 0.05, 0.06.. 1
    p ← 0
    i ← i + 1
    H_{i,j} ← R_k
H

```

R_k =

	1
1	0.05
2	0.06
3	0.07
4	0.08
5	0.09
6	0.1
7	0.11
8	0.12
9	0.13
10	0.14
11	0.15
12	0.16
13	0.17
14	0.18
15	0.19
16	...

$P_{0.05} := P^{(2)}$
 $P_{0.1} := P^{(4)}$
 $P_{0.15} := P^{(6)}$
 $P_{0.20} := P^{(8)}$
 $P_{0.25} := P^{(10)}$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Расчет приведенного давления процесса комбинированного трехстороннего
выдавливания энергетическим методом схемы учитывающей фаски на
инструменте в MathCAD

ORIGIN := 1

Геометрические размеры схемы:

$$\begin{aligned} RR_1 &:= 22.5 & HH_1 &:= 10 & RR_n &:= 14.1 & \beta &:= 0.5773 & \sigma_s &:= 1 & \mu_s &:= 0.08 & HH_{11} &:= 15 & RR_{12} &:= 27.5 & HH_n &:= 10 \\ RR_0 &:= 10 & HH_2 &:= 15 & HH_3 &:= 15 & ff &:= 35 & V_0 &:= 1 & \alpha &:= 0.2679 & TT &:= 5 \\ RR_f &:= 25 & hh_f &:= 5 & HH_4 &:= 20 & RR_k &:= 15 & RR_{01} &:= RR_0 + HH_n \cdot \alpha & hh_n &:= (RR_{12} - RR_1) \cdot \beta + hh_f \end{aligned}$$

Приведение к параметрическому виду

$$\begin{aligned} R_1 &:= \frac{RR_1}{RR_1} & H_1 &:= \frac{HH_1}{RR_1} & H_3 &:= \frac{HH_3}{RR_1} & H_4 &:= \frac{HH_4}{RR_1} & h_{11} &:= \frac{HH_{11}}{RR_1} & H_n &:= \frac{HH_n}{RR_1} \\ R_0 &:= \frac{RR_0}{RR_1} & H_2 &:= \frac{HH_2}{RR_1} & f &:= \frac{ff}{RR_1} & R_n &:= \frac{RR_n}{RR_1} & t &:= \frac{TT}{RR_1} & R_{01} &:= \frac{RR_{01}}{RR_1} \\ R_f &:= \frac{RR_f}{RR_1} & h_f &:= \frac{hh_f}{RR_1} & R_k &:= \frac{RR_k}{RR_1} & h_n &:= \frac{hh_n}{RR_1} & R_{12} &:= \frac{RR_{12}}{RR_1} \end{aligned}$$

```
P := k ← 0
for μs ∈ 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35
  i ← 0
  j ← k + 1
  k ← j + 1
  for Rk ∈ 0.05, 0.06.. 1
    kk ← 1
    p1 ←  $\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left[ \mu_s \cdot \frac{R_n}{12 \cdot h_{11}} + \frac{h_{11}}{R_n} + \frac{R_1 - R_n}{h_{11} + 0.134 \cdot R_n} + 3 \cdot \mu_s \dots \right.$ 
       $\left. + 0.226 + \frac{(3.73 \cdot h_{11} - 0.5 \cdot R_n)}{R_n^2} \cdot \left[ (3.73 \cdot h_{11} - 0.5 \cdot R_n) \cdot \ln \left[ \frac{(h_{11} + 0.134 \cdot R_n)}{h_{11}} \right] - 0.5 \cdot R_n \cdot (8 \cdot \mu_s - 1.57) \dots \right] \right.$ 
       $\left. + \frac{2}{R_1^2 - R_n^2} \cdot \left[ R_1^2 \cdot \ln \left( \frac{R_1}{R_n} \right) + 2 \cdot \mu_s \cdot t \cdot (R_1 + R_n) + 2 \cdot (h_{11} + 0.134 \cdot R_n) \cdot \left[ \mu_s \cdot R_1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{(R_1^3 - R_n^3)}{R_1^2 - R_n^2} \right] \right] \right]$ 
    p2 ←  $R_k^2 + 2R_0^2 + \frac{(R_k^2 - R_0^2)}{2} + R_k^2 \cdot \ln \left( \frac{R_k}{R_0} \right) + \left[ \frac{(1 - R_k^2)}{2} - R_k^2 \cdot \ln \left( \frac{1}{R_k} \right) \right] + \ln(R_f) \cdot (1 - R_k^2) \dots$ 
       $+ \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[ \frac{(R_0^3)}{3 \cdot h_f} + R_0 \cdot \frac{(R_k^2 - R_0^2)}{h_f} \right] + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left[ \frac{(1 - R_k^3)}{3 \cdot h_f} - R_k^2 \cdot \frac{(1 - R_k)}{h_f} \right] \dots$ 
       $+ \left[ \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (0 - R_k \cdot h_f) + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[ \frac{(R_k^2 - R_0^2) \cdot h_f}{R_0^2} + 3R_0 \cdot h_f \right] \right] + \frac{h_f}{\sqrt{3}} \dots$ 
       $+ \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot (H_4) + \frac{2 \cdot \mu_s}{\sqrt{3}} \cdot \left[ \frac{(R_k^3 - 1)}{3 \cdot h_f} + R_k^2 \cdot \frac{(R_k - R_0)}{h_f} \right] \dots$ 

```

$$\begin{aligned}
 & + \left[\frac{1}{\sqrt{3}} (0 - R_k h_f) + \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\frac{(R_k^2 - R_0^2) \cdot h_f}{R_0^2} + 3R_0 \cdot h_f \right] \right] + \frac{h_f}{\sqrt{3}} \dots \\
 & + \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s (H_4) + \frac{2 \cdot \mu_s}{\sqrt{3}} \left[\frac{(R_k^3 - 1)}{3 \cdot h_f} + R_k^2 \cdot \frac{(R_k - R_0)}{h_f} \right] \dots \\
 & + \frac{2 \cdot \mu_s}{\sqrt{3}} \left[\frac{(1 - R_k^3)}{3 \cdot h_f} + \frac{(1 - R_k)}{h_f} \right] + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s (1 - R_k^2) \cdot \frac{(R_f - 1)}{h_f} \dots \\
 & + 1.08 \cdot 2 \cdot H_n \frac{\alpha}{-\alpha H_n + R_{01}} + \frac{2 \cdot R_{01}^3 \cdot \alpha}{3 \cdot \sqrt{3} \cdot (-\alpha H_n + R_{01})^3} + \frac{2 \cdot R_0^3 \cdot \alpha}{3 \cdot \sqrt{3} \cdot (-\alpha H_n + R_{01})^3} + \frac{4 \cdot \mu_s (R_{01}^3 - R_0^3) \cdot \alpha}{3 \cdot \sqrt{3} \cdot (-\alpha H_n + R_{01})^3} \dots \\
 & + \left[2 \cdot \frac{\sqrt{2}}{3} \left[(h_f + h_n + \beta R_1) \cdot \frac{R_{12}^2 - R_1^2}{2} - \beta \cdot \frac{R_{12}^3 - R_1^3}{3} \right] \left[\frac{6 + 0.5 \cdot \beta^2}{2 \cdot (h_f + h_n + \beta R_1)} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_{12}^2} \right) \dots \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{\beta \cdot (2.5 \cdot \beta^2 + 12)}{(h_f + h_n + \beta R_1)^2} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_{12}^2} \right) \cdot \frac{\beta^2 \cdot (6.5 \cdot \beta^2 + 20)}{(h_f + h_n + \beta R_1)^3} \cdot \ln \left(\frac{R_{12}}{R_1} \right) \dots \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{\beta^2 \cdot (\beta^2 + 1)}{(h_f + h_n + \beta R_1)} \left[\frac{1}{[(h_f + h_n + \beta R_1) - \beta R_{12}]^2} - \frac{1}{[(h_f + h_n + \beta R_1) - \beta R_1]^2} \right] \dots \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{4 \cdot \beta^2 \cdot (2 + \beta^2)}{(h_f + h_n + \beta R_1)^2} \left[\frac{1}{[(h_f + h_n + \beta R_1) - \beta R_{12}]} - \frac{1}{[(h_f + h_n + \beta R_1) - \beta R_1]} \right] \dots \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{\beta^2 \cdot (20 + 6.5 \cdot \beta^2)}{(h_f + h_n + \beta R_1)^3} \cdot \ln \left[\frac{(h_f + h_n + \beta R_1) - \beta R_1}{(h_f + h_n + \beta R_1) - \beta R_{12}} \right] \right] \dots \right. \\
 & \left. + \frac{2 \cdot \beta}{\sqrt{3}} + \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{1}{\beta} \cdot \ln \left(\frac{h_f + h_n}{h_f} \right) \dots \right.
 \end{aligned}$$

$$\left[\frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \mu_s \cdot \frac{1 + \beta^2}{\beta} \cdot \ln \left[\frac{(h_f + h_n + \beta R_1) - \beta R_1}{(h_f + h_n + \beta R_1) - \beta R_{12}} \right] \right]$$

P

- G ← 0
- λ ← R_n²
- p ← (1 - λ) · p₁ + λ · (p₂ + G)
- i ← i + 1
- P_{i,j} ← μ_s
- P_{i,k} ← p

P =

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.05	4.079	0.1	4.522	0.15	4.965	0.2	5.409	0.25
2	0.05	4.076	0.1	4.519	0.15	4.961	0.2	5.403	0.25
3	0.05	4.074	0.1	4.515	0.15	4.956	0.2	5.397	0.25
4	0.05	4.072	0.1	4.512	0.15	4.952	0.2	5.392	0.25
5	0.05	4.069	0.1	4.508	0.15	4.947	0.2	5.386	0.25
6	0.05	4.067	0.1	4.505	0.15	4.943	0.2	5.381	0.25
7	0.05	4.065	0.1	4.502	0.15	4.939	0.2	5.375	0.25
8	0.05	4.063	0.1	4.499	0.15	4.934	0.2	5.37	0.25
9	0.05	4.062	0.1	4.496	0.15	4.931	0.2	5.365	0.25
10	0.05	4.06	0.1	4.493	0.15	4.927	0.2	5.36	0.25
11	0.05	4.059	0.1	4.491	0.15	4.923	0.2	5.355	0.25
12	0.05	4.057	0.1	4.489	0.15	4.92	0.2	5.351	0.25
13	0.05	4.057	0.1	4.487	0.15	4.917	0.2	5.347	0.25
14	0.05	4.056	0.1	4.485	0.15	4.914	0.2	5.342	0.25
15	0.05	4.055	0.1	4.483	0.15	4.911	0.2	5.339	0.25
16	0.05	4.055	0.1	4.482	0.15	4.909	0.2	5.335	...

```

Rk :=  $\left\{ \begin{array}{l} k \leftarrow 0 \\ \text{for } \mu_s \in 0 \\ \quad i \leftarrow 0 \\ \quad j \leftarrow k + 1 \\ \quad k \leftarrow j + 1 \\ \quad \text{for } R_k \in 0.05, 0.06 \dots 1 \\ \quad \quad p \leftarrow 0 \\ \quad \quad i \leftarrow i + 1 \\ \quad \quad H_{i,j} \leftarrow R_k \end{array} \right.$ 
H

```

R_k =

	1
1	0.05
2	0.06
3	0.07
4	0.08
5	0.09
6	0.1
7	0.11
8	0.12
9	0.13
10	0.14
11	0.15
12	0.16
13	0.17
14	0.18
15	0.19
16	...

$$P_{0.05} := P^{(2)}$$

$$P_{0.1} := P^{(4)}$$

$$P_{0.15} := P^{(6)}$$

$$P_{0.20} := P^{(8)}$$

$$P_{0.25} := P^{(10)}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Расчётная программа для определения уравнения регрессии 3-х факторного имитационного эксперимента в MathCAD

Количество опытов:

 $N := 14$ $\text{ORIGIN} := 1$

Количество факторов:

 $k := 3$

Постоянные для определения коэффициентов регрессии:

 $C1 := 0.40625 \quad C2 := 0.15625 \quad C3 := 0.1$ $C4 := 0.125 \quad C5 := 0.5 \quad C6 := -0.09375$

Матрица планирования: $x :=$

$$\begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Значения отклонений от профиля в относительных размерах :

$y :=$

$$\begin{pmatrix} 3.24 \\ 3.22 \\ 2.48 \\ 2.22 \\ 3.01 \\ 3.01 \\ 1.78 \\ 1.55 \\ 2.24 \\ 2.21 \\ 2.97 \\ 1.94 \\ 2.48 \\ 1.99 \end{pmatrix}$$

Формулы для определения коэффициентов регрессии:

$$b0 := C1 \cdot \left(\sum_{g=1}^N y_g \right) - C2 \cdot \sum_{i=1}^k \sum_{g=1}^N \left[(x_{g,i})^2 \cdot y_g \right]$$

$$b1 := C3 \cdot \sum_{g=1}^N (x_{g,1} \cdot y_g)$$

$$b12 := C4 \cdot \sum_{g=1}^N (x_{g,1} \cdot x_{g,2} \cdot y_g)$$

$$b2 := C3 \cdot \sum_{g=1}^N (x_{g,2} \cdot y_g)$$

$$b13 := C4 \cdot \sum_{g=1}^N (x_{g,1} \cdot x_{g,3} \cdot y_g)$$

$$b3 := C3 \cdot \sum_{g=1}^N (x_{g,3} \cdot y_g)$$

$$b23 := C4 \cdot \sum_{g=1}^N (x_{g,2} \cdot x_{g,3} \cdot y_g)$$

$$b11 := \left[C5 \cdot \sum_{g=1}^N \left[(x_{g,1})^2 \cdot y_g \right] + C6 \cdot \sum_{i=1}^k \sum_{g=1}^N \left[(x_{g,i})^2 \cdot y_g \right] \right] - C2 \cdot \sum_{g=1}^N y_g$$

$$b22 := \left[C5 \cdot \sum_{g=1}^N \left[(x_{g,2})^2 \cdot y_g \right] + C6 \cdot \sum_{i=1}^k \sum_{g=1}^N \left[(x_{g,i})^2 \cdot y_g \right] \right] - C2 \cdot \sum_{g=1}^N y_g$$

$$b33 := \left[C5 \cdot \sum_{g=1}^N \left[(x_{g,3})^2 \cdot y_g \right] + C6 \cdot \sum_{i=1}^k \sum_{g=1}^N \left[(x_{g,i})^2 \cdot y_g \right] \right] - C2 \cdot \sum_{g=1}^N y_g$$

Коэффициенты регрессии:

$$b_0 = 2.176 \quad b_1 = -0.054 \quad b_2 = -0.548 \quad b_3 = -0.23 \quad b_{12} = -0.059$$

$$b_{13} = 6.25 \times 10^{-3} \quad b_{23} = -0.116 \quad b_{11} = 0.049 \quad b_{22} = 0.279 \quad b_{33} = 0.059$$

Общий вид уравнения регрессии:

$$y_2(x_1, x_2, x_3) := b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 \dots$$

$$+ (b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2)$$

Переход от закодированных значений факторов к натуральным:

$$x_1 := \frac{dn - 0.62}{0.11} \quad x_2 := \frac{h - 0.11}{0.04} \quad x_3 := \frac{do - 0.47}{0.13}$$

Уравнение регрессии в натуральных величинах:

$$Y(dn, h, do) := b_0 + b_1 \cdot \frac{dn - 0.62}{0.11} + b_2 \cdot \frac{h - 0.11}{0.04} + b_3 \cdot \frac{do - 0.47}{0.13} + \left(b_{12} \cdot \frac{dn - 0.62}{0.11} \cdot \frac{h - 0.11}{0.04} \right) \dots$$

$$+ b_{13} \cdot \frac{dn - 0.62}{0.11} \cdot \frac{do - 0.47}{0.13} + b_{23} \cdot \frac{h - 0.11}{0.04} \cdot \frac{do - 0.47}{0.13} + b_{11} \cdot \left(\frac{dn - 0.62}{0.11} \right)^2 \dots$$

$$+ \left[b_{22} \cdot \left(\frac{h - 0.11}{0.04} \right)^2 + b_{33} \cdot \left(\frac{do - 0.47}{0.13} \right)^2 \right]$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Расчет ресурса пластичности при комбинированном трехстороннем ВЫДАВЛИВАНИИ

+ ORIGIN := 1

$$\sigma_{\theta} := \begin{pmatrix} -221.9 & -221.9 & 2.251 & 1 \\ -200.4 & -238.7 & 143.2 & 1 \\ -193.1 & -196.6 & 153.5 & 1 \\ -248.9 & -174.6 & 155.3 & 1 \\ -263.6 & -131.9 & 148.2 & 1 \\ -249.8 & -151.2 & 143 & 1 \\ -238 & -185.6 & 143.3 & 1 \\ -233.4 & -191.2 & 144.9 & 1 \\ -224.9 & 1.011 & 144.5 & 1 \\ 27.7 & 2.251 & 144 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad \sigma_2 := \begin{pmatrix} -169.6 & -169.6 & -44.68 & 1 \\ -279.8 & -349.5 & 2.239 & 1 \\ -262.9 & -344.3 & 0.5263 & 1 \\ -262.2 & -294 & 0.394 & 1 \\ -281.1 & -258.7 & -0.1623 & 1 \\ -284 & -260.4 & -0.2778 & 1 \\ -282.1 & -261.3 & -0.0453 & 1 \\ -295.5 & -262.4 & -0.1816 & 1 \\ -211.3 & -75.3 & -0.1319 & 1 \\ 15.96 & -44.68 & -0.0095 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad \sigma_1 := \begin{pmatrix} 220.3 & 220.3 & 179.6 & 1 \\ 177.5 & 214.3 & 182.8 & 1 \\ 145.5 & 188.2 & 183.1 & 1 \\ 131.9 & 179.2 & 178.5 & 1 \\ 134.5 & 179.4 & 164.8 & 1 \\ 149.7 & 173.9 & 157.4 & 1 \\ 159.6 & 174.5 & 156.9 & 1 \\ 169.3 & 175.9 & 158.6 & 1 \\ 193.6 & 178.6 & 160.1 & 1 \\ 213.8 & 179.6 & 161.3 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad \epsilon_1 := \begin{pmatrix} 1.692 & 1.992 & 1.5363 & 1 \\ 0.7344 & 1.849 & 0.4567 & 1 \\ 0.2611 & 0.9004 & 0.4387 & 1 \\ 0.1575 & 0.7246 & 0.4172 & 1 \\ 0.1758 & 0.7228 & 0.3502 & 1 \\ 0.2947 & 0.6741 & 0.3729 & 1 \\ 0.4061 & 0.7363 & 0.3698 & 1 \\ 0.5473 & 0.6254 & 0.3245 & 1 \\ 1.076 & 0.6800 & 0.3096 & 1 \\ 1.01 & 0.7363 & 0.225 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_r := \begin{pmatrix} -217.8 & -217.8 & 16.09 & 1 \\ -134.5 & -146.4 & -3.748 & 1 \\ -184.6 & -166.6 & -11.86 & 1 \\ -257.1 & -147.7 & -7.235 & 1 \\ -272.6 & -113.9 & -2.151 & 1 \\ -264.9 & -149 & -1.731 & 1 \\ -246.6 & -159 & -0.8144 & 1 \\ -232.2 & -169 & -0.8162 & 1 \\ -249.4 & -45.2 & -1.021 & 1 \\ -85.11 & -16.09 & -2.321 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad \tau_{rz} := \begin{pmatrix} 48.79 & 48.79 & -10.71 & 1 \\ 56.31 & 41 & -4.82 & 1 \\ 13.33 & -35.51 & -2.077 & 1 \\ 57.76 & -52.72 & -0.090 & 1 \\ 69.41 & -48.7 & 0.4663 & 1 \\ 76.36 & -58.7 & 0.058 & 1 \\ 81.38 & -61.71 & 0.08343 & 1 \\ 86.4 & -68.7 & 0.1873 & 1 \\ 108.5 & -25.3 & -0.06317 & 1 \\ -11.52 & -10.71 & -0.3759 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad \sigma_0 := \begin{pmatrix} -186.9 & -186.9 & -23.86 & 1 \\ -207.5 & -247.9 & 50.43 & 1 \\ -216.4 & -234.7 & 48.4 & 1 \\ -254.4 & -203 & 49.57 & 1 \\ -272.7 & -167.8 & 48.76 & 1 \\ -265.2 & -145.8 & 47.34 & 1 \\ -255.9 & -175.2 & 47.38 & 1 \\ -252.5 & -200.6 & 47.06 & 1 \\ -214.2 & -42.3 & 47.07 & 1 \\ -31.47 & -23.86 & 46.4 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Ячейка 1.1

$$i := 1 \qquad j := 1$$

$$T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{r_{i,j}} & 0 & \tau_{rz_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{rz_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = -7.669 \times 10^6$$

$$\sigma_{11_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{11_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{11_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad \Pi_{11} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}}$$

$$\mu_{11\sigma} := \frac{2 \cdot \sigma_{11_2} - \sigma_{11_1} - \sigma_{11_3}}{\sigma_{11_1} - \sigma_{11_3}} \quad I_2 := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2$$

$$I_3 := |T_{\sigma}| \quad I_1 = -609.3 \quad I_2 = 1.205 \times 10^5 \quad I_3 = -7.669 \times 10^6$$

$$\Pi_{11\sigma} := \frac{\sigma_{11_1} + \sigma_{11_2} + \sigma_{11_3}}{\sigma_{1,1}}$$

$$\sigma_{11_1} = -139.282 \quad \sigma_{11_2} = -221.9 \quad \sigma_{11_3} = -248.118 \quad \mu_{11\sigma} = -0.518 \quad \Pi_{11\sigma} = -2.766$$

Ячейка 1.2

$$\begin{array}{l}
 j_k := 1 \qquad j_w := 2 \\
 T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{r_{i,j}} & 0 & \tau_{r_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{r_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = -7.669 \times 10^6
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \sigma_{12_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{12_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{12_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad \Pi_{\sigma} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\
 \mu_{12_{\sigma}} := \frac{2 \cdot \sigma_{12_2} - \sigma_{12_1} - \sigma_{12_3}}{\sigma_{12_1} - \sigma_{12_3}} \quad \begin{array}{l} \underline{\Pi}_{\sigma} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\ \underline{\Pi}_{\sigma} := |T_{\sigma}| \quad \Pi_1 = -609.3 \quad \Pi_2 = 1.205 \times 10^5 \quad \Pi_3 = -7.669 \times 10^6 \end{array} \\
 \Pi_{12_{\sigma}} := \frac{\sigma_{12_1} + \sigma_{12_2} + \sigma_{12_3}}{\sigma_{i_{1,2}}} \\
 \sigma_{12_1} = -139.282 \quad \sigma_{12_2} = -221.9 \quad \sigma_{12_3} = -248.118 \quad \mu_{12_{\sigma}} = -0.518 \quad \Pi_{12_{\sigma}} = -2.766
 \end{array}$$

Ячейка 1.3

$$\begin{array}{l}
 j_k := 1 \qquad j_w := 3 \\
 T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{r_{i,j}} & 0 & \tau_{r_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{r_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = -1.876 \times 10^3
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \sigma_{13_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{13_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{13_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad \Pi_{\sigma} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\
 \mu_{13_{\sigma}} := \frac{2 \cdot \sigma_{13_2} - \sigma_{13_1} - \sigma_{13_3}}{\sigma_{13_1} - \sigma_{13_3}} \quad \begin{array}{l} \underline{\Pi}_{\sigma} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\ \underline{\Pi}_{\sigma} := |T_{\sigma}| \quad \Pi_1 = -26.339 \quad \Pi_2 = -897.961 \quad \Pi_3 = -1.876 \times 10^3 \end{array} \\
 \Pi_{13_{\sigma}} := \frac{\sigma_{13_1} + \sigma_{13_2} + \sigma_{13_3}}{\sigma_{i_{1,3}}} \\
 \sigma_{13_1} = 17.922 \quad \sigma_{13_2} = 2.251 \quad \sigma_{13_3} = -46.512 \quad \mu_{13_{\sigma}} = 0.514 \quad \Pi_{13_{\sigma}} = -0.147
 \end{array}$$

Ячейка 1.4

$$\begin{array}{l}
 j_k := 1 \qquad j_w := 4 \\
 T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{r_{i,j}} & 0 & \tau_{r_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{r_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = 0
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \sigma_{14_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{14_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{14_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad \Pi_{\sigma} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\
 \mu_{14_{\sigma}} := \frac{2 \cdot \sigma_{14_2} - \sigma_{14_1} - \sigma_{14_3}}{\sigma_{14_1} - \sigma_{14_3}} \quad \begin{array}{l} \underline{\Pi}_{\sigma} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\ \underline{\Pi}_{\sigma} := |T_{\sigma}| \quad \Pi_1 = 3 \quad \Pi_2 = 2 \quad \Pi_3 = 0 \end{array} \\
 \Pi_{14_{\sigma}} := \frac{\sigma_{14_1} + \sigma_{14_2} + \sigma_{14_3}}{\sigma_{i_{1,4}}} \\
 \sigma_{14_1} = 2 \quad \sigma_{14_2} = 1 \quad \sigma_{14_3} = 0 \quad \mu_{14_{\sigma}} = 0 \quad \Pi_{14_{\sigma}} = 3
 \end{array}$$

Ячейка 2.1

$$\begin{array}{l}
 i_k := 2 \qquad j_w := 1 \\
 T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{r_{i,j}} & 0 & \tau_{r_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{r_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = -6.906 \times 10^6
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \sigma_{21_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{21_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{21_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad I_{\text{www}} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\
 \mu_{21_{\sigma}} := \frac{2 \cdot \sigma_{21_2} - \sigma_{21_1} - \sigma_{21_3}}{\sigma_{21_1} - \sigma_{21_3}} \quad I_{\text{www}} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\
 \Pi_{21_{\sigma}} := \frac{\sigma_{21_1} + \sigma_{21_2} + \sigma_{21_3}}{\sigma_{i_{2,1}}} \quad I_{\text{www}} := |T_{\sigma}| \quad I_1 = -614.7 \quad I_2 = 1.175 \times 10^5 \quad I_3 = -6.906 \times 10^6 \\
 \sigma_{21_1} = -115.232 \quad \sigma_{21_2} = -200.4 \quad \sigma_{21_3} = -299.068 \quad \mu_{21_{\sigma}} = 0.073 \quad \Pi_{21_{\sigma}} = -3.463
 \end{array}$$

Ячейка 2.2

$$\begin{array}{l}
 i_k := 2 \qquad j_w := 2 \\
 T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{r_{i,j}} & 0 & \tau_{r_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{r_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = -1.181 \times 10^7
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \sigma_{22_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{22_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{22_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad I_{\text{www}} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\
 \mu_{22_{\sigma}} := \frac{2 \cdot \sigma_{22_2} - \sigma_{22_1} - \sigma_{22_3}}{\sigma_{22_1} - \sigma_{22_3}} \quad I_{\text{www}} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\
 \Pi_{22_{\sigma}} := \frac{\sigma_{22_1} + \sigma_{22_2} + \sigma_{22_3}}{\sigma_{i_{2,2}}} \quad I_{\text{www}} := |T_{\sigma}| \quad I_1 = -734.6 \quad I_2 = 1.679 \times 10^5 \quad I_3 = -1.181 \times 10^7 \\
 \sigma_{22_1} = -138.436 \quad \sigma_{22_2} = -238.7 \quad \sigma_{22_3} = -357.464 \quad \mu_{22_{\sigma}} = 0.084 \quad \Pi_{22_{\sigma}} = -3.428
 \end{array}$$

Ячейка 2.3

$$\begin{array}{l}
 i_k := 2 \qquad j_w := 3 \\
 T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{r_{i,j}} & 0 & \tau_{r_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{r_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = -4.529 \times 10^3
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \sigma_{23_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{23_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{23_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad I_{\text{www}} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\
 \mu_{23_{\sigma}} := \frac{2 \cdot \sigma_{23_2} - \sigma_{23_1} - \sigma_{23_3}}{\sigma_{23_1} - \sigma_{23_3}} \quad I_{\text{www}} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\
 \Pi_{23_{\sigma}} := \frac{\sigma_{23_1} + \sigma_{23_2} + \sigma_{23_3}}{\sigma_{i_{2,3}}} \quad I_{\text{www}} := |T_{\sigma}| \quad I_1 = 141.691 \quad I_2 = -247.713 \quad I_3 = -4.529 \times 10^3 \\
 \sigma_{23_1} = 143.2 \quad \sigma_{23_2} = 4.919 \quad \sigma_{23_3} = -6.428 \quad \mu_{23_{\sigma}} = -0.848 \quad \Pi_{23_{\sigma}} = 0.775
 \end{array}$$

Ячейка 2.4

$$\begin{array}{l}
 i := 2 \qquad j := 4 \\
 T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{i,j} & 0 & \tau_{\alpha_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{\alpha_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = 0 \\
 \\
 \sigma_{24_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{24_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{24_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad \Pi_{\sigma} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\
 \mu_{24_{\sigma}} := \frac{2 \cdot \sigma_{24_2} - \sigma_{24_1} - \sigma_{24_3}}{\sigma_{24_1} - \sigma_{24_3}} \quad \begin{array}{l} \Pi_{\sigma} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\ \Pi_{\sigma} := |T_{\sigma}| \quad I1 = 3 \quad I2 = 2 \quad I3 = 0 \end{array} \\
 \Pi_{24_{\sigma}} := \frac{\sigma_{24_1} + \sigma_{24_2} + \sigma_{24_3}}{\sigma_{2,4}} \\
 \\
 24_1 = 2 \quad \sigma_{24_2} = 1 \quad \sigma_{24_3} = 0 \quad \mu_{24_{\sigma}} = 0 \quad \Pi_{24_{\sigma}} = 3
 \end{array}$$

Ячейка 3.1

$$\begin{array}{l}
 i := 3 \qquad j := 1 \\
 T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{i,j} & 0 & \tau_{\alpha_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{\alpha_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = -9.337 \times 10^6 \\
 \\
 \sigma_{31_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{31_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{31_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad \Pi_{\sigma} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\
 \mu_{31_{\sigma}} := \frac{2 \cdot \sigma_{31_2} - \sigma_{31_1} - \sigma_{31_3}}{\sigma_{31_1} - \sigma_{31_3}} \quad \begin{array}{l} \Pi_{\sigma} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\ \Pi_{\sigma} := |T_{\sigma}| \quad I1 = -640.6 \quad I2 = 1.348 \times 10^5 \quad I3 = -9.337 \times 10^6 \end{array} \\
 \Pi_{31_{\sigma}} := \frac{\sigma_{31_1} + \sigma_{31_2} + \sigma_{31_3}}{\sigma_{3,1}} \\
 \\
 \sigma_{31_1} = -182.393 \quad \sigma_{31_2} = -193.1 \quad \sigma_{31_3} = -265.107 \quad \mu_{31_{\sigma}} = 0.741 \quad \Pi_{31_{\sigma}} = -4.403
 \end{array}$$

Ячейка 3.2

$$\begin{array}{l}
 i := 3 \qquad j := 2 \\
 T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{i,j} & 0 & \tau_{\alpha_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{\alpha_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = -1.103 \times 10^7 \\
 \\
 \sigma_{32_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{32_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{32_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad \Pi_{\sigma} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\
 \mu_{32_{\sigma}} := \frac{2 \cdot \sigma_{32_2} - \sigma_{32_1} - \sigma_{32_3}}{\sigma_{32_1} - \sigma_{32_3}} \quad \begin{array}{l} \Pi_{\sigma} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\ \Pi_{\sigma} := |T_{\sigma}| \quad I1 = -707.5 \quad I2 = 1.565 \times 10^5 \quad I3 = -1.103 \times 10^7 \end{array} \\
 \Pi_{32_{\sigma}} := \frac{\sigma_{32_1} + \sigma_{32_2} + \sigma_{32_3}}{\sigma_{3,2}} \\
 \\
 \sigma_{32_1} = -159.767 \quad \sigma_{32_2} = -196.6 \quad \sigma_{32_3} = -351.133 \quad \mu_{32_{\sigma}} = 0.615 \quad \Pi_{32_{\sigma}} = -3.759
 \end{array}$$

Ячейка 3.3

$$T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{i_1, j_1} & 0 & \tau_{\pi_{i_1, j_1}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i_1, j_1}} & 0 \\ \tau_{\pi_{i_1, j_1}} & 0 & \sigma_{z_{i_1, j_1}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = -1.62 \times 10^3$$

$$\begin{aligned} \sigma_{33_1} &:= \sigma_{\Gamma_1} & \sigma_{33_2} &:= \sigma_{\Gamma_2} & \sigma_{33_3} &:= \sigma_{\Gamma_3} & I_{1, \sigma} &:= T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\ \mu_{33_{\sigma}} &:= \frac{2 \cdot \sigma_{33_2} - \sigma_{33_1} - \sigma_{33_3}}{\sigma_{33_1} - \sigma_{33_3}} & I_{2, \sigma} &:= T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\ I_{3, \sigma} &:= |T_{\sigma}| & I_1 &= 142.166 & I_2 &= -1.75 \times 10^3 & I_3 &= -1.62 \times 10^3 \\ \Pi_{33_{\sigma}} &:= \frac{\sigma_{33_1} + \sigma_{33_2} + \sigma_{33_3}}{\sigma_{i_3, j_3}} \end{aligned}$$

$$\sigma_{33_1} = 153.5 \quad \sigma_{33_2} = 0.865 \quad \sigma_{33_3} = -12.199 \quad \mu_{33_{\sigma}} = -0.842 \quad \Pi_{33_{\sigma}} = 0.776$$

Ячейка 3.4

$$T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{i_1, j_1} & 0 & \tau_{\pi_{i_1, j_1}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i_1, j_1}} & 0 \\ \tau_{\pi_{i_1, j_1}} & 0 & \sigma_{z_{i_1, j_1}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = 0$$

$$\begin{aligned} \sigma_{34_1} &:= \sigma_{\Gamma_1} & \sigma_{34_2} &:= \sigma_{\Gamma_2} & \sigma_{34_3} &:= \sigma_{\Gamma_3} & I_{1, \sigma} &:= T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\ \mu_{34_{\sigma}} &:= \frac{2 \cdot \sigma_{34_2} - \sigma_{34_1} - \sigma_{34_3}}{\sigma_{34_1} - \sigma_{34_3}} & I_{2, \sigma} &:= T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\ I_{3, \sigma} &:= |T_{\sigma}| & I_1 &= 3 & I_2 &= 2 & I_3 &= 0 \\ \Pi_{34_{\sigma}} &:= \frac{\sigma_{34_1} + \sigma_{34_2} + \sigma_{34_3}}{\sigma_{i_3, j_4}} \end{aligned}$$

$$\sigma_{34_1} = 2 \quad \sigma_{34_2} = 1 \quad \sigma_{34_3} = 0 \quad \mu_{34_{\sigma}} = 0 \quad \Pi_{34_{\sigma}} = 3$$

Ячейка 4.1

$$T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{i_1, j_1} & 0 & \tau_{\pi_{i_1, j_1}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i_1, j_1}} & 0 \\ \tau_{\pi_{i_1, j_1}} & 0 & \sigma_{z_{i_1, j_1}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = -1.595 \times 10^7$$

$$\begin{aligned} \sigma_{41_1} &:= \sigma_{\Gamma_1} & \sigma_{41_2} &:= \sigma_{\Gamma_2} & \sigma_{41_3} &:= \sigma_{\Gamma_3} & I_{1, \sigma} &:= T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\ \mu_{41_{\sigma}} &:= \frac{2 \cdot \sigma_{41_2} - \sigma_{41_1} - \sigma_{41_3}}{\sigma_{41_1} - \sigma_{41_3}} & I_{2, \sigma} &:= T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\ I_{3, \sigma} &:= |T_{\sigma}| & I_1 &= -768.2 & I_2 &= 1.933 \times 10^5 & I_3 &= -1.595 \times 10^7 \\ \Pi_{41_{\sigma}} &:= \frac{\sigma_{41_1} + \sigma_{41_2} + \sigma_{41_3}}{\sigma_{i_4, j_1}} \end{aligned}$$

$$\sigma_{41_1} = -201.834 \quad \sigma_{41_2} = -248.9 \quad \sigma_{41_3} = -317.466 \quad \mu_{41_{\sigma}} = 0.186 \quad \Pi_{41_{\sigma}} = -5.824$$

Ячейка 4.2

$$\begin{array}{l}
 i := 4 \qquad j := 2 \\
 T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{f_{i,j}} & 0 & \tau_{r_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{r_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \qquad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \qquad |T_{\sigma}| = -7.097 \times 10^6
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \sigma_{42_1} := \sigma_{\Gamma_1} \qquad \sigma_{42_2} := \sigma_{\Gamma_2} \qquad \sigma_{42_3} := \sigma_{\Gamma_3} \qquad I_{11} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\
 \mu_{42_{\sigma}} := \frac{2 \cdot \sigma_{42_2} - \sigma_{42_1} - \sigma_{42_3}}{\sigma_{42_1} - \sigma_{42_3}} \qquad I_{22} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\
 I_{33} := |T_{\sigma}| \qquad I_{11} = -616.3 \qquad I_{22} = 1.178 \times 10^5 \qquad I_{33} = -7.097 \times 10^6 \\
 \Pi_{42_{\sigma}} := \frac{\sigma_{42_1} + \sigma_{42_2} + \sigma_{42_3}}{\sigma_{i_{4,2}}}
 \end{array}$$

$$\tau_{42_1} = -130.682 \qquad \sigma_{42_2} = -174.6 \qquad \sigma_{42_3} = -311.018 \qquad \mu_{42_{\sigma}} = 0.513 \qquad \Pi_{42_{\sigma}} = -3.439$$

Ячейка 4.3

$$\begin{array}{l}
 i := 4 \qquad j := 3 \\
 T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{f_{i,j}} & 0 & \tau_{r_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{r_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \qquad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \qquad |T_{\sigma}| = -443.955
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \sigma_{43_1} := \sigma_{\Gamma_1} \qquad \sigma_{43_2} := \sigma_{\Gamma_2} \qquad \sigma_{43_3} := \sigma_{\Gamma_3} \qquad I_{11} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\
 \mu_{43_{\sigma}} := \frac{2 \cdot \sigma_{43_2} - \sigma_{43_1} - \sigma_{43_3}}{\sigma_{43_1} - \sigma_{43_3}} \qquad I_{22} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\
 I_{33} := |T_{\sigma}| \qquad I_{11} = 148.459 \qquad I_{22} = -1.065 \times 10^3 \qquad I_{33} = -443.955 \\
 \Pi_{43_{\sigma}} := \frac{\sigma_{43_1} + \sigma_{43_2} + \sigma_{43_3}}{\sigma_{i_{4,3}}}
 \end{array}$$

$$\sigma_{43_1} = 155.3 \qquad \sigma_{43_2} = 0.395 \qquad \sigma_{43_3} = -7.236 \qquad \mu_{43_{\sigma}} = -0.906 \qquad \Pi_{43_{\sigma}} = 0.832$$

Ячейка 4.4

$$\begin{array}{l}
 i := 4 \qquad j := 4 \\
 T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{f_{i,j}} & 0 & \tau_{r_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{r_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \qquad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \qquad |T_{\sigma}| = 0
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \sigma_{44_1} := \sigma_{\Gamma_1} \qquad \sigma_{44_2} := \sigma_{\Gamma_2} \qquad \sigma_{44_3} := \sigma_{\Gamma_3} \qquad I_{11} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\
 \mu_{44_{\sigma}} := \frac{2 \cdot \sigma_{44_2} - \sigma_{44_1} - \sigma_{44_3}}{\sigma_{44_1} - \sigma_{44_3}} \qquad I_{22} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\
 I_{33} := |T_{\sigma}| \qquad I_{11} = 3 \qquad I_{22} = 2 \qquad I_{33} = 0 \\
 \Pi_{44_{\sigma}} := \frac{\sigma_{44_1} + \sigma_{44_2} + \sigma_{44_3}}{\sigma_{i_{4,4}}}
 \end{array}$$

$$\sigma_{44_1} = 2 \qquad \sigma_{44_2} = 1 \qquad \sigma_{44_3} = 0 \qquad \mu_{44_{\sigma}} = 0 \qquad \Pi_{44_{\sigma}} = 3$$

Ячейка 5.1

$$\begin{array}{l}
 i_k := 5 \qquad j_w := 1 \\
 T_\sigma := \begin{pmatrix} \sigma_{f_{i,j}} & 0 & \tau_{a_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{a_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \qquad \sigma_\Gamma := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_\sigma), 1)) \qquad |T_\sigma| = -1.893 \times 10^7
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \sigma_{51_1} := \sigma_{\Gamma_1} \qquad \sigma_{51_2} := \sigma_{\Gamma_2} \qquad \sigma_{51_3} := \sigma_{\Gamma_3} \qquad I_{\text{www}} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\
 \mu_{51_\sigma} := \frac{2 \cdot \sigma_{51_2} - \sigma_{51_1} - \sigma_{51_3}}{\sigma_{51_1} - \sigma_{51_3}} \qquad I_{\text{www}} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\
 I_{\text{www}} := |T_\sigma| \qquad I_1 = -817.3 \qquad I_2 = 2.178 \times 10^5 \qquad I_3 = -1.893 \times 10^7 \\
 \Pi_{51_\sigma} := \frac{\sigma_{51_1} + \sigma_{51_2} + \sigma_{51_3}}{\sigma_{5,1}} \\
 \sigma_{51_1} = -207.31 \qquad \sigma_{51_2} = -263.6 \qquad \sigma_{51_3} = -346.39 \qquad \mu_{51_\sigma} = 0.191 \qquad \Pi_{51_\sigma} = -6.077
 \end{array}$$

Ячейка 5.2

$$\begin{array}{l}
 i_k := 5 \qquad j_w := 2 \\
 T_\sigma := \begin{pmatrix} \sigma_{f_{i,j}} & 0 & \tau_{a_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{a_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \qquad \sigma_\Gamma := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_\sigma), 1)) \qquad |T_\sigma| = -3.574 \times 10^6
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \sigma_{52_1} := \sigma_{\Gamma_1} \qquad \sigma_{52_2} := \sigma_{\Gamma_2} \qquad \sigma_{52_3} := \sigma_{\Gamma_3} \qquad I_{\text{www}} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\
 \mu_{52_\sigma} := \frac{2 \cdot \sigma_{52_2} - \sigma_{52_1} - \sigma_{52_3}}{\sigma_{52_1} - \sigma_{52_3}} \qquad I_{\text{www}} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\
 I_{\text{www}} := |T_\sigma| \qquad I_1 = -504.5 \qquad I_2 = 7.624 \times 10^4 \qquad I_3 = -3.574 \times 10^6 \\
 \Pi_{52_\sigma} := \frac{\sigma_{52_1} + \sigma_{52_2} + \sigma_{52_3}}{\sigma_{5,2}} \\
 \sigma_{52_1} = -99.045 \qquad \sigma_{52_2} = -131.9 \qquad \sigma_{52_3} = -273.555 \qquad \mu_{52_\sigma} = 0.623 \qquad \Pi_{52_\sigma} = -2.812
 \end{array}$$

Ячейка 5.3

$$\begin{array}{l}
 i_k := 5 \qquad j_w := 3 \\
 T_\sigma := \begin{pmatrix} \sigma_{f_{i,j}} & 0 & \tau_{a_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{a_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \qquad \sigma_\Gamma := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_\sigma), 1)) \qquad |T_\sigma| = 19.514
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \sigma_{53_1} := \sigma_{\Gamma_1} \qquad \sigma_{53_2} := \sigma_{\Gamma_2} \qquad \sigma_{53_3} := \sigma_{\Gamma_3} \qquad I_{\text{www}} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\
 \mu_{53_\sigma} := \frac{2 \cdot \sigma_{53_2} - \sigma_{53_1} - \sigma_{53_3}}{\sigma_{53_1} - \sigma_{53_3}} \qquad I_{\text{www}} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\
 I_{\text{www}} := |T_\sigma| \qquad I_1 = 145.887 \qquad I_2 = -342.699 \qquad I_3 = 19.514 \\
 \Pi_{53_\sigma} := \frac{\sigma_{53_1} + \sigma_{53_2} + \sigma_{53_3}}{\sigma_{5,3}} \\
 \sigma_{53_1} = 148.2 \qquad \sigma_{53_2} = -0.058 \qquad \sigma_{53_3} = -2.255 \qquad \mu_{53_\sigma} = -0.971 \qquad \Pi_{53_\sigma} = 0.885
 \end{array}$$

Ячейка 5.4

$$i_{\sigma} := 5 \quad j_{\sigma} := 4$$

$$T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{i,j} & 0 & \tau_{\pi_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{\pi_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = 0$$

$$\sigma_{54_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{54_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{54_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad \Pi_{\sigma} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}}$$

$$\mu_{54_{\sigma}} := \frac{2 \cdot \sigma_{54_2} - \sigma_{54_1} - \sigma_{54_3}}{\sigma_{54_1} - \sigma_{54_3}} \quad \begin{aligned} \Pi_{\sigma} &:= T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\ \Pi_{\sigma} &:= |T_{\sigma}| \quad \Pi_1 = 3 \quad \Pi_2 = 2 \quad \Pi_3 = 0 \end{aligned}$$

$$\Pi_{54_{\sigma}} := \frac{\sigma_{54_1} + \sigma_{54_2} + \sigma_{54_3}}{\sigma_{i_{5,4}}}$$

$$\sigma_{54_1} = 2 \quad \sigma_{54_2} = 1 \quad \sigma_{54_3} = 0 \quad \mu_{54_{\sigma}} = 0 \quad \Pi_{54_{\sigma}} = 3$$

Ячейка 6.1

$$i_{\sigma} := 6 \quad j_{\sigma} := 1$$

$$T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{i,j} & 0 & \tau_{\pi_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{\pi_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = -1.734 \times 10^7$$

$$\sigma_{61_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{61_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{61_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad \Pi_{\sigma} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}}$$

$$\mu_{61_{\sigma}} := \frac{2 \cdot \sigma_{61_2} - \sigma_{61_1} - \sigma_{61_3}}{\sigma_{61_1} - \sigma_{61_3}} \quad \begin{aligned} \Pi_{\sigma} &:= T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\ \Pi_{\sigma} &:= |T_{\sigma}| \quad \Pi_1 = -798.7 \quad \Pi_2 = 2.065 \times 10^5 \quad \Pi_3 = -1.734 \times 10^7 \end{aligned}$$

$$\Pi_{61_{\sigma}} := \frac{\sigma_{61_1} + \sigma_{61_2} + \sigma_{61_3}}{\sigma_{i_{6,1}}}$$

$$\sigma_{61_1} = -197.495 \quad \sigma_{61_2} = -249.8 \quad \sigma_{61_3} = -351.405 \quad \mu_{61_{\sigma}} = 0.32 \quad \Pi_{61_{\sigma}} = -5.335$$

Ячейка 6.2

$$i_{\sigma} := 6 \quad j_{\sigma} := 2$$

$$T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{i,j} & 0 & \tau_{\pi_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{\pi_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = -5.346 \times 10^6$$

$$\sigma_{62_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{62_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{62_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad \Pi_{\sigma} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}}$$

$$\mu_{62_{\sigma}} := \frac{2 \cdot \sigma_{62_2} - \sigma_{62_1} - \sigma_{62_3}}{\sigma_{62_1} - \sigma_{62_3}} \quad \begin{aligned} \Pi_{\sigma} &:= T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\ \Pi_{\sigma} &:= |T_{\sigma}| \quad \Pi_1 = -560.6 \quad \Pi_2 = 9.726 \times 10^4 \quad \Pi_3 = -5.346 \times 10^6 \end{aligned}$$

$$\Pi_{62_{\sigma}} := \frac{\sigma_{62_1} + \sigma_{62_2} + \sigma_{62_3}}{\sigma_{i_{6,2}}}$$

$$\sigma_{62_1} = -123.779 \quad \sigma_{62_2} = -151.2 \quad \sigma_{62_3} = -285.621 \quad \mu_{62_{\sigma}} = 0.661 \quad \Pi_{62_{\sigma}} = -3.224$$

Ячейка 6.3

$$i_w := 6 \quad j_w := 3$$

$$T_\sigma := \begin{pmatrix} \sigma_{r_{i,j}} & 0 & \tau_{r_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{r_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_\Gamma := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_\sigma), 1)) \quad |T_\sigma| = 68.284$$

$$\sigma_{63_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{63_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{63_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad \begin{matrix} I1 := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\ I2 := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\ I3 := |T_\sigma| \end{matrix}$$

$$\mu_{63_\sigma} := \frac{2 \cdot \sigma_{63_2} - \sigma_{63_1} - \sigma_{63_3}}{\sigma_{63_1} - \sigma_{63_3}} \quad \begin{matrix} I1 = 140.991 & I2 = -286.781 & I3 = 68.284 \end{matrix}$$

$$\Pi_{63_\sigma} := \frac{\sigma_{63_1} + \sigma_{63_2} + \sigma_{63_3}}{\sigma_{i_{6,3}}}$$

$$\sigma_{63_1} = 143 \quad \sigma_{63_2} = -0.275 \quad \sigma_{63_3} = -1.733 \quad \mu_{63_\sigma} = -0.98 \quad \Pi_{63_\sigma} = 0.896$$

Ячейка 6.4

$$i_w := 6 \quad j_w := 4$$

$$T_\sigma := \begin{pmatrix} \sigma_{r_{i,j}} & 0 & \tau_{r_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{r_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_\Gamma := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_\sigma), 1)) \quad |T_\sigma| = 0$$

$$\sigma_{64_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{64_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{64_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad \begin{matrix} I1 := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\ I2 := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\ I3 := |T_\sigma| \end{matrix}$$

$$\mu_{64_\sigma} := \frac{2 \cdot \sigma_{64_2} - \sigma_{64_1} - \sigma_{64_3}}{\sigma_{64_1} - \sigma_{64_3}} \quad \begin{matrix} I1 = 3 & I2 = 2 & I3 = 0 \end{matrix}$$

$$\Pi_{64_\sigma} := \frac{\sigma_{64_1} + \sigma_{64_2} + \sigma_{64_3}}{\sigma_{i_{6,4}}}$$

$$\sigma_{64_1} = 2 \quad \sigma_{64_2} = 1 \quad \sigma_{64_3} = 0 \quad \mu_{64_\sigma} = 0 \quad \Pi_{64_\sigma} = 3$$

Ячейка 7.1

$$i_w := 7 \quad j_w := 1$$

$$T_\sigma := \begin{pmatrix} \sigma_{r_{i,j}} & 0 & \tau_{r_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{r_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_\Gamma := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_\sigma), 1)) \quad |T_\sigma| = -1.498 \times 10^7$$

$$\sigma_{71_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{71_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{71_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad \begin{matrix} I1 := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\ I2 := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\ I3 := |T_\sigma| \end{matrix}$$

$$\mu_{71_\sigma} := \frac{2 \cdot \sigma_{71_2} - \sigma_{71_1} - \sigma_{71_3}}{\sigma_{71_1} - \sigma_{71_3}} \quad \begin{matrix} I1 = -766.7 & I2 = 1.888 \times 10^5 & I3 = -1.498 \times 10^7 \end{matrix}$$

$$\Pi_{71_\sigma} := \frac{\sigma_{71_1} + \sigma_{71_2} + \sigma_{71_3}}{\sigma_{i_{7,1}}}$$

$$\sigma_{71_1} = -181.057 \quad \sigma_{71_2} = -238 \quad \sigma_{71_3} = -347.643 \quad \mu_{71_\sigma} = 0.316 \quad \Pi_{71_\sigma} = -4.804$$

Ячейка 7.2

$$\begin{array}{l}
 i := 7 \qquad j := 2 \\
 \hline
 T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{i,j} & 0 & \tau_{\pi_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{\pi_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = -7.004 \times 10^6 \\
 \\
 \sigma_{72_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{72_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{72_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad \Pi_{\sigma} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\
 \mu_{72_{\sigma}} := \frac{2 \cdot \sigma_{72_2} - \sigma_{72_1} - \sigma_{72_3}}{\sigma_{72_1} - \sigma_{72_3}} \quad \begin{array}{l} \Pi_{\sigma} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\ \Pi_{\sigma} := |T_{\sigma}| \quad \Pi_1 = -605.9 \quad \Pi_2 = 1.157 \times 10^5 \quad \Pi_3 = -7.004 \times 10^6 \end{array} \\
 \\
 \Pi_{72_{\sigma}} := \frac{\sigma_{72_1} + \sigma_{72_2} + \sigma_{72_3}}{\sigma_{i,j}} \\
 \\
 \sigma_{72_1} = -129.997 \quad \sigma_{72_2} = -185.6 \quad \sigma_{72_3} = -290.303 \quad \mu_{72_{\sigma}} = 0.306 \quad \Pi_{72_{\sigma}} = -3.472
 \end{array}$$

Ячейка 7.3

$$\begin{array}{l}
 i := 7 \qquad j := 3 \\
 \hline
 T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{i,j} & 0 & \tau_{\pi_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{\pi_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = 4.289 \\
 \\
 \sigma_{73_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{73_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{73_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad \Pi_{\sigma} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\
 \mu_{73_{\sigma}} := \frac{2 \cdot \sigma_{73_2} - \sigma_{73_1} - \sigma_{73_3}}{\sigma_{73_1} - \sigma_{73_3}} \quad \begin{array}{l} \Pi_{\sigma} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\ \Pi_{\sigma} := |T_{\sigma}| \quad \Pi_1 = 142.44 \quad \Pi_2 = -123.165 \quad \Pi_3 = 4.289 \end{array} \\
 \\
 \Pi_{73_{\sigma}} := \frac{\sigma_{73_1} + \sigma_{73_2} + \sigma_{73_3}}{\sigma_{i,j}} \\
 \\
 \sigma_{73_1} = 143.3 \quad \sigma_{73_2} = -0.036 \quad \sigma_{73_3} = -0.823 \quad \mu_{73_{\sigma}} = -0.989 \quad \Pi_{73_{\sigma}} = 0.908
 \end{array}$$

Ячейка 7.4

$$\begin{array}{l}
 i := 7 \qquad j := 4 \\
 \hline
 T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{i,j} & 0 & \tau_{\pi_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{\pi_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = 0 \\
 \\
 \sigma_{74_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{74_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{74_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad \Pi_{\sigma} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\
 \mu_{74_{\sigma}} := \frac{2 \cdot \sigma_{74_2} - \sigma_{74_1} - \sigma_{74_3}}{\sigma_{74_1} - \sigma_{74_3}} \quad \begin{array}{l} \Pi_{\sigma} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\ \Pi_{\sigma} := |T_{\sigma}| \quad \Pi_1 = 3 \quad \Pi_2 = 2 \quad \Pi_3 = 0 \end{array} \\
 \\
 \Pi_{74_{\sigma}} := \frac{\sigma_{74_1} + \sigma_{74_2} + \sigma_{74_3}}{\sigma_{i,j}} \\
 \\
 \sigma_{74_1} = 2 \quad \sigma_{74_2} = 1 \quad \sigma_{74_3} = 0 \quad \mu_{74_{\sigma}} = 0 \quad \Pi_{74_{\sigma}} = 3
 \end{array}$$

Ячейка 8.1

$$i := 8 \quad j := 1$$

$$T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{r_{i,j}} & 0 & \tau_{r_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{r_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = -1.427 \times 10^7$$

$$\sigma_{81} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{82} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{83} := \sigma_{\Gamma_3} \quad I_{11} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}}$$

$$\mu_{81\sigma} := \frac{2 \cdot \sigma_{82} - \sigma_{81} - \sigma_{83}}{\sigma_{81} - \sigma_{83}} \quad I_{22} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2$$

$$I_{33} := |T_{\sigma}| \quad I1 = -761.1 \quad I2 = 1.843 \times 10^5 \quad I3 = -1.427 \times 10^7$$

$$\Pi_{81\sigma} := \frac{\sigma_{81} + \sigma_{82} + \sigma_{83}}{\sigma_{i_{8,1}}}$$

$$\sigma_{81} = -171.835 \quad \sigma_{82} = -233.4 \quad \sigma_{83} = -355.865 \quad \mu_{81\sigma} = 0.331 \quad \Pi_{81\sigma} = -4.496$$

Ячейка 8.2

$$i := 8 \quad j := 2$$

$$T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{r_{i,j}} & 0 & \tau_{r_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{r_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = -7.576 \times 10^6$$

$$\sigma_{82_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{82_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{82_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad I_{11} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}}$$

$$\mu_{82\sigma} := \frac{2 \cdot \sigma_{82_2} - \sigma_{82_1} - \sigma_{82_3}}{\sigma_{82_1} - \sigma_{82_3}} \quad I_{22} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2$$

$$I_{33} := |T_{\sigma}| \quad I1 = -622.6 \quad I2 = 1.221 \times 10^5 \quad I3 = -7.576 \times 10^6$$

$$\Pi_{82\sigma} := \frac{\sigma_{82_1} + \sigma_{82_2} + \sigma_{82_3}}{\sigma_{i_{8,2}}}$$

$$\sigma_{82_1} = -132.63 \quad \sigma_{82_2} = -191.2 \quad \sigma_{82_3} = -298.77 \quad \mu_{82\sigma} = 0.295 \quad \Pi_{82\sigma} = -3.54$$

Ячейка 8.3

$$i := 8 \quad j := 3$$

$$T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{r_{i,j}} & 0 & \tau_{r_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{r_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = 16.394$$

$$\sigma_{83_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{83_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{83_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad I_{11} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}}$$

$$\mu_{83\sigma} := \frac{2 \cdot \sigma_{83_2} - \sigma_{83_1} - \sigma_{83_3}}{\sigma_{83_1} - \sigma_{83_3}} \quad I_{22} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2$$

$$I_{33} := |T_{\sigma}| \quad I1 = 143.902 \quad I2 = -144.468 \quad I3 = 16.394$$

$$\Pi_{83\sigma} := \frac{\sigma_{83_1} + \sigma_{83_2} + \sigma_{83_3}}{\sigma_{i_{8,3}}}$$

$$\sigma_{83_1} = 144.9 \quad \sigma_{83_2} = -0.13 \quad \sigma_{83_3} = -0.867 \quad \mu_{83\sigma} = -0.99 \quad \Pi_{83\sigma} = 0.907$$

Ячейка 8.4

$$\begin{array}{l}
 i_k := 8 \qquad j_w := 4 \\
 T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{r_{i,j}} & 0 & \tau_{r_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{r_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = 0 \\
 \sigma_{84_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{84_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{84_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad \begin{array}{l} I1 := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\ I2 := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\ I3 := |T_{\sigma}| \quad I1 = 3 \quad I2 = 2 \quad I3 = 0 \end{array} \\
 \mu_{84_{\sigma}} := \frac{2 \cdot \sigma_{84_2} - \sigma_{84_1} - \sigma_{84_3}}{\sigma_{84_1} - \sigma_{84_3}} \\
 \Pi_{84_{\sigma}} := \frac{\sigma_{84_1} + \sigma_{84_2} + \sigma_{84_3}}{\sigma_{i_{8,4}}} \\
 \sigma_{84_1} = 2 \qquad \sigma_{84_2} = 1 \qquad \sigma_{84_3} = 0 \qquad \mu_{84_{\sigma}} = 0 \qquad \Pi_{84_{\sigma}} = 3
 \end{array}$$

Ячейка 9.1

$$\begin{array}{l}
 i_k := 9 \qquad j_w := 1 \\
 T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{r_{i,j}} & 0 & \tau_{r_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{r_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = -9.204 \times 10^6 \\
 \sigma_{91_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{91_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{91_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad \begin{array}{l} I1 := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\ I2 := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\ I3 := |T_{\sigma}| \quad I1 = -685.6 \quad I2 = 1.445 \times 10^5 \quad I3 = -9.204 \times 10^6 \end{array} \\
 \mu_{91_{\sigma}} := \frac{2 \cdot \sigma_{91_2} - \sigma_{91_1} - \sigma_{91_3}}{\sigma_{91_1} - \sigma_{91_3}} \\
 \Pi_{91_{\sigma}} := \frac{\sigma_{91_1} + \sigma_{91_2} + \sigma_{91_3}}{\sigma_{i_{9,1}}} \\
 \sigma_{91_1} = -120.19 \quad \sigma_{91_2} = -224.9 \quad \sigma_{91_3} = -340.51 \quad \mu_{91_{\sigma}} = 0.049 \quad \Pi_{91_{\sigma}} = -3.541
 \end{array}$$

Ячейка 9.2

$$\begin{array}{l}
 i_k := 9 \qquad j_w := 2 \\
 T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{r_{i,j}} & 0 & \tau_{r_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{r_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = 2.794 \times 10^3 \\
 \sigma_{92_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{92_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{92_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad \begin{array}{l} I1 := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\ I2 := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\ I3 := |T_{\sigma}| \quad I1 = -119.489 \quad I2 = 2.642 \times 10^3 \quad I3 = 2.794 \times 10^3 \end{array} \\
 \mu_{92_{\sigma}} := \frac{2 \cdot \sigma_{92_2} - \sigma_{92_1} - \sigma_{92_3}}{\sigma_{92_1} - \sigma_{92_3}} \\
 \Pi_{92_{\sigma}} := \frac{\sigma_{92_1} + \sigma_{92_2} + \sigma_{92_3}}{\sigma_{i_{9,2}}} \\
 \sigma_{92_1} = 1.011 \quad \sigma_{92_2} = -30.812 \quad \sigma_{92_3} = -89.688 \quad \mu_{92_{\sigma}} = 0.298 \quad \Pi_{92_{\sigma}} = -0.669
 \end{array}$$

Ячейка 9.3

$$i_{\lambda} := 9 \quad j_{\lambda} := 3$$

$$T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{r_{i,j}} & 0 & \tau_{r_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{r_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = 18.883$$

$$\sigma_{93_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{93_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{93_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad I_{\lambda} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}}$$

$$\mu_{93_{\sigma}} := \frac{2 \cdot \sigma_{93_2} - \sigma_{93_1} - \sigma_{93_3}}{\sigma_{93_1} - \sigma_{93_3}} \quad I_{\lambda} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2$$

$$I_{\lambda} := |T_{\sigma}| \quad I_1 = 143.347 \quad I_2 = -166.463 \quad I_3 = 18.883$$

$$\Pi_{93_{\sigma}} := \frac{\sigma_{93_1} + \sigma_{93_2} + \sigma_{93_3}}{\sigma_{i_{9,3}}}$$

$$\sigma_{93_1} = 144.5 \quad \sigma_{93_2} = -0.127 \quad \sigma_{93_3} = -1.025 \quad \mu_{93_{\sigma}} = -0.988 \quad \Pi_{93_{\sigma}} = 0.895$$

Ячейка 9.4

$$i_{\lambda} := 9 \quad j_{\lambda} := 4$$

$$T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{r_{i,j}} & 0 & \tau_{r_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{r_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = 0$$

$$\sigma_{94_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{94_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{94_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad I_{\lambda} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}}$$

$$\mu_{94_{\sigma}} := \frac{2 \cdot \sigma_{94_2} - \sigma_{94_1} - \sigma_{94_3}}{\sigma_{94_1} - \sigma_{94_3}} \quad I_{\lambda} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2$$

$$I_{\lambda} := |T_{\sigma}| \quad I_1 = 3 \quad I_2 = 2 \quad I_3 = 0$$

$$\Pi_{94_{\sigma}} := \frac{\sigma_{94_1} + \sigma_{94_2} + \sigma_{94_3}}{\sigma_{i_{9,4}}}$$

$$\sigma_{94_1} = 2 \quad \sigma_{94_2} = 1 \quad \sigma_{94_3} = 0 \quad \mu_{94_{\sigma}} = 0 \quad \Pi_{94_{\sigma}} = 3$$

Ячейка 10.1

$$i_{\lambda} := 10 \quad j_{\lambda} := 1$$

$$T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{r_{i,j}} & 0 & \tau_{r_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{r_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = -4.13 \times 10^4$$

$$\sigma_{101_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{101_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{101_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad I_{\lambda} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}}$$

$$\mu_{101_{\sigma}} := \frac{2 \cdot \sigma_{101_2} - \sigma_{101_1} - \sigma_{101_3}}{\sigma_{101_1} - \sigma_{101_3}} \quad I_{\lambda} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2$$

$$I_{\lambda} := |T_{\sigma}| \quad I_1 = -41.45 \quad I_2 = -3.407 \times 10^3 \quad I_3 = -4.13 \times 10^4$$

$$\Pi_{101_{\sigma}} := \frac{\sigma_{101_1} + \sigma_{101_2} + \sigma_{101_3}}{\sigma_{i_{10,1}}}$$

$$\sigma_{101_1} = 27.7 \quad \sigma_{101_2} = 17.256 \quad \sigma_{101_3} = -86.406 \quad \mu_{101_{\sigma}} = 0.817 \quad \Pi_{101_{\sigma}} = -0.194$$

Ячейка 10.2

$$i_{\lambda} := 10 \quad j_{\omega} := 2$$

$$T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{r_{i,j}} & 0 & \tau_{r_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{r_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = 1.36 \times 10^3$$

$$\sigma_{102_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{102_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{102_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad \overset{\text{I1}}{\text{I1}} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}}$$

$$\mu_{102_{\sigma}} := \frac{2 \cdot \sigma_{102_2} - \sigma_{102_1} - \sigma_{102_3}}{\sigma_{102_1} - \sigma_{102_3}} \quad \overset{\text{I2}}{\text{I2}} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2$$

$$\overset{\text{I3}}{\text{I3}} := |T_{\sigma}| \quad \text{I1} = -58.519 \quad \text{I2} = 467.404 \quad \text{I3} = 1.36 \times 10^3$$

$$\Pi_{102_{\sigma}} := \frac{\sigma_{102_1} + \sigma_{102_2} + \sigma_{102_3}}{\sigma_{i_{10,2}}}$$

$$\sigma_{102_1} = 2.251 \quad \sigma_{102_2} = -12.523 \quad \sigma_{102_3} = -48.247 \quad \mu_{102_{\sigma}} = 0.415 \quad \Pi_{102_{\sigma}} = -0.326$$

Ячейка 10.3

$$i_{\lambda} := 10 \quad j_{\omega} := 3$$

$$T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{r_{i,j}} & 0 & \tau_{r_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{r_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = -17.172$$

$$\sigma_{103_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{103_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{103_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad \overset{\text{I1}}{\text{I1}} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}}$$

$$\mu_{103_{\sigma}} := \frac{2 \cdot \sigma_{103_2} - \sigma_{103_1} - \sigma_{103_3}}{\sigma_{103_1} - \sigma_{103_3}} \quad \overset{\text{I2}}{\text{I2}} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2$$

$$\overset{\text{I3}}{\text{I3}} := |T_{\sigma}| \quad \text{I1} = 141.669 \quad \text{I2} = -335.711 \quad \text{I3} = -17.172$$

$$\Pi_{103_{\sigma}} := \frac{\sigma_{103_1} + \sigma_{103_2} + \sigma_{103_3}}{\sigma_{i_{10,3}}}$$

$$\sigma_{103_1} = 144 \quad \sigma_{103_2} = 0.05 \quad \sigma_{103_3} = -2.381 \quad \mu_{103_{\sigma}} = -0.967 \quad \Pi_{103_{\sigma}} = 0.878$$

Ячейка 10.4

$$i_{\lambda} := 10 \quad j_{\omega} := 4$$

$$T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{r_{i,j}} & 0 & \tau_{r_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{r_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = 0$$

$$\sigma_{104_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{104_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{104_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad \overset{\text{I1}}{\text{I1}} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}}$$

$$\mu_{104_{\sigma}} := \frac{2 \cdot \sigma_{104_2} - \sigma_{104_1} - \sigma_{104_3}}{\sigma_{104_1} - \sigma_{104_3}} \quad \overset{\text{I2}}{\text{I2}} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2$$

$$\overset{\text{I3}}{\text{I3}} := |T_{\sigma}| \quad \text{I1} = 3 \quad \text{I2} = 2 \quad \text{I3} = 0$$

$$\Pi_{104_{\sigma}} := \frac{\sigma_{104_1} + \sigma_{104_2} + \sigma_{104_3}}{\sigma_{i_{10,4}}}$$

$$\sigma_{104_1} = 2 \quad \sigma_{104_2} = 1 \quad \sigma_{104_3} = 0 \quad \mu_{104_{\sigma}} = 0 \quad \Pi_{104_{\sigma}} = 3$$

Ячейка 11.1

$$j_{\lambda} := 11 \quad j_{\mu} := 1$$

$$T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{r_{i,j}} & 0 & \tau_{r_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{r_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = 0$$

$$\sigma_{111_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{111_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{111_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad \mathbb{I}_{\mu\sigma} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}}$$

$$\mu_{111\sigma} := \frac{2\sigma_{111_2} - \sigma_{111_1} - \sigma_{111_3}}{\sigma_{111_1} - \sigma_{111_3}} \quad \mathbb{I}_{\mu\sigma} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2$$

$$\mathbb{I}_{\mu\sigma} := |T_{\sigma}| \quad \mathbb{I} = 3 \quad \mathbb{I} = 2 \quad \mathbb{I} = 0$$

$$\Pi_{111\sigma} := \frac{\sigma_{111_1} + \sigma_{111_2} + \sigma_{111_3}}{\sigma_{i_{11,1}}}$$

$$\sigma_{111_1} = 2 \quad \sigma_{111_2} = 1 \quad \sigma_{111_3} = 0 \quad \mu_{111\sigma} = 0 \quad \Pi_{111\sigma} = 3$$

Ячейка 11.2

$$j_{\lambda} := 11 \quad j_{\mu} := 2$$

$$T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{r_{i,j}} & 0 & \tau_{r_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{r_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = 0$$

$$\sigma_{112_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{112_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{112_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad \mathbb{I}_{\mu\sigma} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}}$$

$$\mu_{112\sigma} := \frac{2\sigma_{112_2} - \sigma_{112_1} - \sigma_{112_3}}{\sigma_{112_1} - \sigma_{112_3}} \quad \mathbb{I}_{\mu\sigma} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2$$

$$\mathbb{I}_{\mu\sigma} := |T_{\sigma}| \quad \mathbb{I} = 3 \quad \mathbb{I} = 2 \quad \mathbb{I} = 0$$

$$\Pi_{112\sigma} := \frac{\sigma_{112_1} + \sigma_{112_2} + \sigma_{112_3}}{\sigma_{i_{11,2}}}$$

$$\sigma_{112_1} = 2 \quad \sigma_{112_2} = 1 \quad \sigma_{112_3} = 0 \quad \mu_{112\sigma} = 0 \quad \Pi_{112\sigma} = 3$$

Ячейка 11.3

$$j_{\lambda} := 11 \quad j_{\mu} := 3$$

$$T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{r_{i,j}} & 0 & \tau_{r_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{\theta_{i,j}} & 0 \\ \tau_{r_{i,j}} & 0 & \sigma_{z_{i,j}} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\Gamma} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = 0$$

$$\sigma_{113_1} := \sigma_{\Gamma_1} \quad \sigma_{113_2} := \sigma_{\Gamma_2} \quad \sigma_{113_3} := \sigma_{\Gamma_3} \quad \mathbb{I}_{\mu\sigma} := T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}}$$

$$\mu_{113\sigma} := \frac{2\sigma_{113_2} - \sigma_{113_1} - \sigma_{113_3}}{\sigma_{113_1} - \sigma_{113_3}} \quad \mathbb{I}_{\mu\sigma} := T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2$$

$$\mathbb{I}_{\mu\sigma} := |T_{\sigma}| \quad \mathbb{I} = 3 \quad \mathbb{I} = 2 \quad \mathbb{I} = 0$$

$$\Pi_{113\sigma} := \frac{\sigma_{113_1} + \sigma_{113_2} + \sigma_{113_3}}{\sigma_{i_{11,3}}}$$

$$\sigma_{113_1} = 2 \quad \sigma_{113_2} = 1 \quad \sigma_{113_3} = 0 \quad \mu_{113\sigma} = 0 \quad \Pi_{113\sigma} = 3$$

Ячейка 11.4

$$\begin{aligned}
 & \lambda := 11 \quad \lambda := 4 \\
 & T_{\sigma} := \begin{pmatrix} \sigma_{i,j} & 0 & \tau_{\sigma_{i,j}} \\ 0 & \sigma_{0,i,j} & 0 \\ \tau_{\sigma_{i,j}} & 0 & \sigma_{i,j} \end{pmatrix} \quad \sigma_{\tau} := \text{reverse}(\text{csort}(\text{eigenvals}(T_{\sigma}), 1)) \quad |T_{\sigma}| = 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_{114_1} &:= \sigma_{\tau_1} & \sigma_{114_2} &:= \sigma_{\tau_2} & \sigma_{114_3} &:= \sigma_{\tau_3} & \Pi_{114_1} &:= T_{\sigma_{1,1}} + T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{3,3}} \\
 \mu_{114_{\sigma}} &:= \frac{2 \cdot \sigma_{114_2} - \sigma_{114_1} - \sigma_{114_3}}{\sigma_{114_1} - \sigma_{114_3}} & \Pi_{114_2} &:= T_{\sigma_{1,1}} \cdot T_{\sigma_{2,2}} + T_{\sigma_{2,2}} \cdot T_{\sigma_{3,3}} + T_{\sigma_{3,3}} \cdot T_{\sigma_{1,1}} - (T_{\sigma_{1,2}})^2 - (T_{\sigma_{1,3}})^2 - (T_{\sigma_{2,3}})^2 \\
 & & \Pi_{114_3} &:= |T_{\sigma}| & \Pi_1 &:= 3 & \Pi_2 &:= 2 & \Pi_3 &:= 0
 \end{aligned}$$

$$\Pi_{114_{\sigma}} := \frac{\sigma_{114_1} + \sigma_{114_2} + \sigma_{114_3}}{\sigma_{11,4}}$$

$\sigma_{114_1} = 2$ $\sigma_{114_2} = 1$ $\sigma_{114_3} = 0$ $\mu_{114_{\sigma}} = 0$ $\Pi_{114_{\sigma}} = 3$

$$\begin{aligned}
 \sigma_1 &:= \begin{pmatrix} \sigma_{11_1} & \sigma_{12_1} & \sigma_{13_1} & \sigma_{14_1} \\ \sigma_{21_1} & \sigma_{22_1} & \sigma_{23_1} & \sigma_{24_1} \\ \sigma_{31_1} & \sigma_{32_1} & \sigma_{33_1} & \sigma_{34_1} \\ \sigma_{41_1} & \sigma_{42_1} & \sigma_{43_1} & \sigma_{44_1} \\ \sigma_{51_1} & \sigma_{52_1} & \sigma_{53_1} & \sigma_{54_1} \\ \sigma_{61_1} & \sigma_{62_1} & \sigma_{63_1} & \sigma_{64_1} \\ \sigma_{71_1} & \sigma_{72_1} & \sigma_{73_1} & \sigma_{74_1} \\ \sigma_{81_1} & \sigma_{82_1} & \sigma_{83_1} & \sigma_{84_1} \\ \sigma_{91_1} & \sigma_{92_1} & \sigma_{93_1} & \sigma_{94_1} \\ \sigma_{101_1} & \sigma_{102_1} & \sigma_{103_1} & \sigma_{104_1} \\ \sigma_{111_1} & \sigma_{112_1} & \sigma_{113_1} & \sigma_{114_1} \end{pmatrix} & \sigma_2 &:= \begin{pmatrix} \sigma_{11_2} & \sigma_{12_2} & \sigma_{13_2} & \sigma_{14_2} \\ \sigma_{21_2} & \sigma_{22_2} & \sigma_{23_2} & \sigma_{24_2} \\ \sigma_{31_2} & \sigma_{32_2} & \sigma_{33_2} & \sigma_{34_2} \\ \sigma_{41_2} & \sigma_{42_2} & \sigma_{43_2} & \sigma_{44_2} \\ \sigma_{51_2} & \sigma_{52_2} & \sigma_{53_2} & \sigma_{54_2} \\ \sigma_{61_2} & \sigma_{62_2} & \sigma_{63_2} & \sigma_{64_2} \\ \sigma_{71_2} & \sigma_{72_2} & \sigma_{73_2} & \sigma_{74_2} \\ \sigma_{81_2} & \sigma_{82_2} & \sigma_{83_2} & \sigma_{84_2} \\ \sigma_{91_2} & \sigma_{92_2} & \sigma_{93_2} & \sigma_{94_2} \\ \sigma_{101_2} & \sigma_{102_2} & \sigma_{103_2} & \sigma_{104_2} \\ \sigma_{111_2} & \sigma_{112_2} & \sigma_{113_2} & \sigma_{114_2} \end{pmatrix} & \sigma_3 &:= \begin{pmatrix} \sigma_{11_3} & \sigma_{12_3} & \sigma_{13_3} & \sigma_{14_3} \\ \sigma_{21_3} & \sigma_{22_3} & \sigma_{23_3} & \sigma_{24_3} \\ \sigma_{31_3} & \sigma_{32_3} & \sigma_{33_3} & \sigma_{34_3} \\ \sigma_{41_3} & \sigma_{42_3} & \sigma_{43_3} & \sigma_{44_3} \\ \sigma_{51_3} & \sigma_{52_3} & \sigma_{53_3} & \sigma_{54_3} \\ \sigma_{61_3} & \sigma_{62_3} & \sigma_{63_3} & \sigma_{64_3} \\ \sigma_{71_3} & \sigma_{72_3} & \sigma_{73_3} & \sigma_{74_3} \\ \sigma_{81_3} & \sigma_{82_3} & \sigma_{83_3} & \sigma_{84_3} \\ \sigma_{91_3} & \sigma_{92_3} & \sigma_{93_3} & \sigma_{94_3} \\ \sigma_{101_3} & \sigma_{102_3} & \sigma_{103_3} & \sigma_{104_3} \\ \sigma_{111_3} & \sigma_{112_3} & \sigma_{113_3} & \sigma_{114_3} \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

$\sigma_1 =$		1	2	3	$\sigma_2 =$		1	2	3	$\sigma_3 =$		1	2	3	4
	1	-139.282	-139.282	17.922		1	-221.9	-221.9	2.251		1	-248.118	-248.118	-46.512	0
	2	-115.232	-138.436	143.2		2	-200.4	-238.7	4.919		2	-299.068	-357.464	-6.428	0
	3	-182.393	-159.767	153.5		3	-193.1	-196.6	0.865		3	-265.107	-351.133	-12.199	0
	4	-201.834	-130.682	155.3		4	-248.9	-174.6	0.395		4	-317.466	-311.018	-7.236	0
	5	-207.31	-99.045	148.2		5	-263.6	-131.9	-0.058		5	-346.39	-273.555	-2.255	0
	6	-197.495	-123.779	143		6	-249.8	-151.2	-0.275		6	-351.405	-285.621	-1.733	0
	7	-181.057	-129.997	143.3		7	-238.4	-185.6	-0.036		7	-347.643	-290.303	-0.823	0
	8	-171.835	-132.63	144.9		8	-233.4	-191.2	-0.13		8	-355.865	-298.77	-0.867	0
	9	-120.19	1.011	144.5		9	-224.9	-30.812	-0.127		9	-340.51	-89.688	-1.025	0
	10	27.7	2.251	144		10	17.256	-12.523	0.05		10	-86.406	-48.247	-2.381	0
11	2	2	2	11	1	1	1	11	0	0	0	0			

$$\begin{aligned}
 \mu_{\sigma} &:= \begin{pmatrix} \mu_{11_{\sigma}} & \mu_{12_{\sigma}} & \mu_{13_{\sigma}} & \mu_{14_{\sigma}} \\ \mu_{21_{\sigma}} & \mu_{22_{\sigma}} & \mu_{23_{\sigma}} & \mu_{24_{\sigma}} \\ \mu_{31_{\sigma}} & \mu_{32_{\sigma}} & \mu_{33_{\sigma}} & \mu_{34_{\sigma}} \\ \mu_{41_{\sigma}} & \mu_{42_{\sigma}} & \mu_{43_{\sigma}} & \mu_{44_{\sigma}} \\ \mu_{51_{\sigma}} & \mu_{52_{\sigma}} & \mu_{53_{\sigma}} & \mu_{54_{\sigma}} \\ \mu_{61_{\sigma}} & \mu_{62_{\sigma}} & \mu_{63_{\sigma}} & \mu_{64_{\sigma}} \\ \mu_{71_{\sigma}} & \mu_{72_{\sigma}} & \mu_{73_{\sigma}} & \mu_{74_{\sigma}} \\ \mu_{81_{\sigma}} & \mu_{82_{\sigma}} & \mu_{83_{\sigma}} & \mu_{84_{\sigma}} \\ \mu_{91_{\sigma}} & \mu_{92_{\sigma}} & \mu_{93_{\sigma}} & \mu_{94_{\sigma}} \\ \mu_{101_{\sigma}} & \mu_{102_{\sigma}} & \mu_{103_{\sigma}} & \mu_{104_{\sigma}} \\ \mu_{111_{\sigma}} & \mu_{112_{\sigma}} & \mu_{113_{\sigma}} & \mu_{114_{\sigma}} \end{pmatrix} & \Pi_{\sigma} &:= \begin{pmatrix} \Pi_{11_{\sigma}} & \Pi_{12_{\sigma}} & \Pi_{13_{\sigma}} & \Pi_{14_{\sigma}} \\ \Pi_{21_{\sigma}} & \Pi_{22_{\sigma}} & \Pi_{23_{\sigma}} & \Pi_{24_{\sigma}} \\ \Pi_{31_{\sigma}} & \Pi_{32_{\sigma}} & \Pi_{33_{\sigma}} & \Pi_{34_{\sigma}} \\ \Pi_{41_{\sigma}} & \Pi_{42_{\sigma}} & \Pi_{43_{\sigma}} & \Pi_{44_{\sigma}} \\ \Pi_{51_{\sigma}} & \Pi_{52_{\sigma}} & \Pi_{53_{\sigma}} & \Pi_{54_{\sigma}} \\ \Pi_{61_{\sigma}} & \Pi_{62_{\sigma}} & \Pi_{63_{\sigma}} & \Pi_{64_{\sigma}} \\ \Pi_{71_{\sigma}} & \Pi_{72_{\sigma}} & \Pi_{73_{\sigma}} & \Pi_{74_{\sigma}} \\ \Pi_{81_{\sigma}} & \Pi_{82_{\sigma}} & \Pi_{83_{\sigma}} & \Pi_{84_{\sigma}} \\ \Pi_{91_{\sigma}} & \Pi_{92_{\sigma}} & \Pi_{93_{\sigma}} & \Pi_{94_{\sigma}} \\ \Pi_{101_{\sigma}} & \Pi_{102_{\sigma}} & \Pi_{103_{\sigma}} & \Pi_{104_{\sigma}} \\ \Pi_{111_{\sigma}} & \Pi_{112_{\sigma}} & \Pi_{113_{\sigma}} & \Pi_{114_{\sigma}} \end{pmatrix} & \kappa_{\sigma} &:= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \Pi_{\sigma} & \eta &:= \begin{cases} \text{for } i \in 1..11 \\ \text{for } j \in 1..4 \\ \eta_{i,j} \leftarrow \frac{3 \cdot \sigma_{0,i,j}}{\sigma_{i,j}} \end{cases}
 \end{aligned}$$

	1	2	3	4
1	-0.518	-0.518	0.514	
2	0.073	0.084	-0.848	
3	0.741	0.615	-0.842	
4	0.186	0.513	-0.906	
5	0.191	0.623	-0.971	
6	0.32	0.661	-0.98	
7	0.316	0.306	-0.989	
8	0.331	0.295	-0.99	
9	0.049	0.298	-0.988	
10	0.817	0.415	-0.967	
11	0	0	0	

 $\mu_\sigma =$

	1	2	3	4
1	-2.766	-2.766	-0.147	
2	-3.463	-3.428	0.775	
3	-4.403	-3.759	0.776	
4	-5.824	-3.439	0.832	
5	-6.077	-2.812	0.885	
6	-5.335	-3.224	0.896	
7	-4.804	-3.472	0.908	
8	-4.496	-3.54	0.907	
9	-3.541	-0.669	0.895	
10	-0.194	-0.326	0.878	
11	3	3	3	

 $\Pi_\sigma =$

	1	2	3	4
1	-1.597	-1.597	-0.085	1.732
2	-1.999	-1.979	0.448	1.732
3	-2.542	-2.17	0.448	1.732
4	-3.363	-1.986	0.48	1.732
5	-3.508	-1.624	0.511	1.732
6	-3.08	-1.861	0.517	1.732
7	-2.774	-2.005	0.524	1.732
8	-2.596	-2.044	0.524	1.732
9	-2.045	-0.386	0.517	1.732
10	-0.112	-0.188	0.507	1.732
11	1.732	1.732	1.732	1.732

 $K =$

$$e_p := \begin{cases} \text{for } i \in 1..11 \\ \text{for } j \in 1..4 \\ e_{p,i,j} \leftarrow 1.1 \cdot e^{(0.42 \cdot \mu_{\sigma,i,j} - 0.51 \cdot \eta_{i,j})} \end{cases}$$

 $\eta =$

	1	2	3	4
1	-2.545	-2.545	-0.399	3
2	-3.507	-3.47	0.828	3
3	-4.462	-3.741	0.793	3
4	-5.786	-3.398	0.833	3
5	-6.083	-2.806	0.888	3
6	-5.315	-2.515	0.902	3
7	-4.81	-3.012	0.906	3
8	-4.474	-3.421	0.89	3
9	-3.319	-0.711	0.882	3
10	-0.442	-0.399	0.863	3
11	3	3	3	3

 $e_p =$

	1	2	3	4
1	3.24	3.24	1.672	0.238
2	6.785	6.69	0.505	0.238
3	14.616	9.599	0.515	0.238
4	22.745	7.721	0.492	0.238
5	26.507	5.979	0.465	0.238
6	18.922	5.237	0.46	0.238
7	14.605	5.813	0.457	0.238
8	12.381	7.128	0.461	0.238
9	6.104	1.791	0.463	0.238
10	1.942	1.605	0.472	0.238
11	0.238	0.238	0.238	0.238

$$\Psi := \begin{cases} \text{for } i \in 1..11 \\ \text{for } j \in 1..4 \\ \Psi_{i,j} \leftarrow \frac{\epsilon_{i,j}}{e_{p,i,j}} \end{cases}$$

 $\Psi =$

	1	2	3	4
1	0.522	0.615	0.919	4.198
2	0.108	0.276	0.904	4.198
3	0.018	0.094	0.851	4.198
4	$6.924 \cdot 10^{-3}$	0.094	0.849	4.198
5	$6.632 \cdot 10^{-3}$	0.121	0.753	4.198
6	0.016	0.129	0.811	4.198
7	0.028	0.127	0.808	4.198
8	0.044	0.088	0.704	4.198
9	0.176	0.38	0.668	4.198
10	0.52	0.459	0.477	4.198
11	4.198	4.198	4.198	4.198

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Расчетные формулы для определения компонентов напряженного состояния

№	a		b		c		d		p	m	R	Aa
	r	z	r	z	r	z	r	z				
1	0	0	18,66	0	0	18,4	18,66	18,4	4,380282	8,760563	7,36	18,66
2	18,66	0	38,86	0	18,66	18,4	38,86	18,4	13,50235	9,483568	7,36	20,2
3	38,86	0	58,52	0	38,86	18,4	58,52	18,4	22,85915	9,230047	7,36	19,66
4	58,52	0	96,16	119,46	58,52	18,4	96,16	121,72	36,30986	17,67136	4,132	125,2496
5	96,16	119,46	145,46	121,72	96,16	121,72	143,32	130,05	56,46714	22,64319	2,118	49,35177
6	145,46	121,72	179,65	126,03	143,32	130,05	175,85	135,89	75,61972	15,66197	3,638	34,48059
7	179,65	126,03	198,19	130,17	175,85	135,89	190,19	142,47	87,30986	7,71831	4,432	18,99661
8	0	18,4	18,66	18,4	0	38,03	18,54	38,03	4,366197	8,732394	7,852	18,66
9	18,66	18,4	38,86	18,4	18,54	38,03	38,86	38,03	13,48826	9,511737	7,852	20,2
10	38,86	18,4	58,52	18,4	38,86	38,03	57,65	39,34	22,75704	9,025822	8,114	19,66
11	58,52	18,4	96,16	121,72	57,65	39,34	95,17	126,83	36,09155	17,64319	5,21	109,9627
12	96,16	121,72	143,32	130,05	95,17	126,83	138,42	138,25	55,52465	21,223	2,662	47,89003
13	143,32	130,05	175,85	135,89	138,42	138,25	159,41	146,55	72,41784	12,56338	3,772	33,05006
14	175,85	135,89	190,19	142,47	159,41	146,55	179,65	156,9	82,75822	8,117371	5,018	15,77758
15	0	38,03	18,54	38,03	0	57,73	19,1	57,97	4,41784	8,835681	7,928	18,54
16	18,54	38,03	38,86	38,03	19,1	57,97	39,04	58,71	13,56103	9,450704	8,124	20,32
17	38,86	38,03	57,65	39,34	39,04	58,71	58,49	58,96	22,77465	8,976526	8,06	18,83561
18	57,65	39,34	95,17	126,83	58,49	58,96	94,28	132,58	35,86737	17,20892	5,074	95,19585
19	95,17	126,83	138,42	138,25	94,28	132,58	127,61	144,94	53,46009	17,97653	2,488	44,7323
20	138,42	138,25	159,41	146,55	127,61	144,94	146,83	153,08	67,16784	9,438967	2,844	22,57144
21	159,41	146,55	179,65	156,9	146,83	153,08	167,01	160,95	78,63146	9,488263	2,116	22,7328
22	0	57,73	19,1	57,97	-0,8	76,76	19,38	77,01	4,422535	9,220657	7,614	19,10151
23	19,1	57,97	39,04	58,71	19,38	77,01	39,31	77,25	13,71244	9,359155	7,516	19,95373
24	39,04	58,71	58,49	58,96	39,31	77,25	58,76	78,73	22,95775	9,131455	7,662	19,45161
25	58,49	58,96	94,28	132,58	58,76	78,73	90,44	138,79	35,44249	15,83803	5,196	81,85859
26	94,28	132,58	127,61	144,94	90,44	138,79	117,51	156,43	50,4507	14,1784	3,54	35,54797
27	127,61	144,94	146,83	153,08	117,51	156,43	130,67	166,69	61,34038	7,600939	5,02	20,87266
28	146,83	153,08	167,01	160,95	130,67	166,69	141,56	176,34	68,78756	7,293427	5,8	21,68032
29	-0,8	76,76	19,38	77,01	-0,97	95,75	18,96	95,75	4,292254	9,415493	7,546	20,18155
30	19,38	77,01	39,31	77,25	18,96	95,75	38,4	96,25	13,62089	9,241784	7,548	19,93145
31	39,31	77,25	58,76	78,73	38,4	96,25	58,34	98,21	22,86502	9,246479	7,696	19,50623
32	58,76	78,73	90,44	138,79	58,34	98,21	86,95	143,89	34,56455	14,15258	4,916	67,90306
33	90,44	138,79	117,51	156,43	86,95	143,89	107,63	170,71	47,24531	11,20892	3,876	32,31028
34	117,51	156,43	130,67	166,69	107,63	170,71	121,66	185,97	56,04108	6,382629	6,712	16,88692
35	130,67	166,69	141,56	176,34	121,66	185,97	135,23	199,89	62,10329	5,741784	8,566	14,55042

Ac	Ba	Bc	C	D	da	dc	dd	dc	Grz	Er	Ez	Et	Ei
18,66	18,4	18,4	26,20602	26,20602	1,570796	1,570796	1,570796	1,570796	0,0009	2,1703	1,9961	-4,1663	4,1676
20,2	18,4	18,4	27,32398	27,32398	1,570796	1,570796	1,570796	1,570796	0,0009	2,2496	1,9961	-4,2456	4,2482
19,66	18,4	18,4	28,92723	28,92723	1,570796	1,570796	1,570796	1,570796	0,0009	2,2225	1,9961	-4,2185	4,2206
109,9627	18,4	2,26	107,842	127,4069	1,407336	2,792231	0,349361	2,836355	1,1735	2,8719	1,4188	-4,2907	4,4165
47,89003	2,26	8,600494	49,3	48,33439	1,568697	1,746626	1,647432	1,365141	0,1534	3,1199	0,7505	-3,8703	4,1112
33,05006	8,600494	10,56691	36,55173	33,53119	1,600385	1,496966	1,761015	1,328342	0,1737	2,7512	1,2914	-4,0427	4,1366
15,77758	10,56691	14,67276	23,06066	19,52857	1,638489	1,633137	1,717263	1,213832	0,2166	2,0436	1,4889	-3,5324	3,5571
18,54	19,63	19,63037	27,08381	27,00127	1,570796	1,570796	1,570909	1,564683	0,0048	2,1670	2,0608	-4,2278	4,2284
20,32	19,63037	19,63	28,25313	28,16695	1,575044	1,564683	1,570796	1,570796	0,0041	2,2525	2,0608	-4,3133	4,3149
18,83561	19,63	20,95807	27,78223	28,13446	1,570796	1,640402	1,542714	1,529273	0,0469	2,2001	2,0936	-4,2937	4,2959
95,19585	20,95807	5,205017	90,93671	114,4565	1,356065	2,694943	0,596493	2,600864	0,9957	2,8704	1,6506	-4,5209	4,6116
44,7323	5,205017	9,552487	48,25755	45,37784	1,57258	1,637584	1,851266	1,207002	0,2536	3,0551	0,9791	-4,0342	4,2185
22,57144	9,552487	19,5936	37,50433	23,04643	1,66088	1,40873	2,189773	0,752897	0,5693	2,5308	1,3276	-3,8584	3,9446
22,7328	19,5936	17,86943	31,04923	21,35088	1,915645	1,04796	1,728953	1,370137	0,3694	2,0940	1,6130	-3,7070	3,7339
19,10151	19,7	19,94786	27,0522	27,61184	1,570796	1,583361	1,530155	1,598873	0,0279	2,1788	2,0704	-4,2492	4,2508
19,95373	19,94786	20,68078	28,07243	29,11894	1,550847	1,635968	1,524998	1,5795	0,0452	2,2461	2,0948	-4,3409	4,3435
19,45161	20,68078	19,63797	28,86129	28,69498	1,51053	1,592353	1,515156	1,683189	0,0770	2,1946	2,0869	-4,2815	4,2850
81,85859	19,63797	5,818471	77,14765	100,1771	1,330467	2,731878	0,606066	2,582902	1,0018	2,8454	1,6241	-4,4696	4,5616
35,54797	5,818471	12,71268	44,50268	37,15273	1,557146	1,772348	2,232297	0,812334	0,5808	2,8891	0,9115	-3,8005	3,9918
20,87266	12,71268	14,17382	31,84073	17,04667	1,811157	0,954794	2,262185	0,856351	0,6525	2,2448	0,9723	-3,2171	3,3328
21,66032	14,17382	13,27298	33,04156	16,28251	1,822448	0,850641	2,459669	0,782773	0,7711	2,2501	0,7495	-2,9996	3,1631
20,18155	19,04681	19,04206	27,36922	27,33684	1,591289	1,541117	1,543704	1,598066	0,0287	2,2214	2,0300	-4,2514	4,2540
19,93145	19,04206	18,54197	28,85899	27,93139	1,534081	1,597543	1,544193	1,622453	0,0404	2,2364	2,0170	-4,2534	4,2569
19,50623	18,54197	19,77184	28,50276	28,10122	1,551617	1,661305	1,481194	1,597305	0,0719	2,2117	2,0363	-4,2480	4,2520
67,90306	19,77184	7,301349	64,50963	85,98623	1,289656	2,669696	1,039192	2,135282	0,7510	2,7624	1,6479	-4,4103	4,4850
32,31028	7,301349	15,29804	37,67534	33,29347	1,609059	1,594518	1,714372	1,204807	0,2160	2,6517	1,2641	-3,9158	4,0060
16,88692	15,29804	21,12765	29,51076	21,9642	1,734841	1,511891	1,779443	1,100564	0,2966	2,0283	1,6134	-3,6417	3,6631
14,55042	21,12765	29,74146	36,79053	23,84954	1,849193	1,425051	1,872612	0,915727	0,4297	1,9870	1,7579	-3,7448	3,7662
19,93	18,99076	18,74471	27,66424	27,4058	1,568438	1,561844	1,593205	1,580776	0,0144	2,2424	2,0210	-4,2634	4,2659
19,44643	18,74471	19,02178	27,50223	27,05435	1,577882	1,574103	1,59294	1,53498	0,0234	2,2237	2,0213	-4,2450	4,2475
20,0361	19,02178	19,48453	28,86038	28,31011	1,550906	1,620918	1,494373	1,625185	0,0591	2,2242	2,0407	-4,2649	4,2686
53,89966	19,48453	6,179814	51,74115	70,99649	1,235323	2,560492	1,159664	2,056089	0,6666	2,6499	1,5925	-4,2424	4,3120
33,86702	6,179814	17,3647	33,03279	36,25441	1,575022	1,884624	1,262101	1,543073	0,2410	2,4167	1,3548	-3,7715	3,8315
20,72941	17,3647	21,28141	23,38807	29,83009	1,528526	1,79291	1,180595	1,795829	0,2754	1,8536	1,9039	-3,7575	3,7698
19,43994	21,28141	24,38589	22,10762	33,51169	1,293912	1,931759	1,03525	2,033314	0,4696	1,7478	2,1478	-3,8966	3,9220

36	-0,97	95,75	18,98	95,75	-1,01	114,38	19,17	114,63	4,242958	9,415493	7,502	19,93
37	18,96	95,75	38,4	96,25	19,17	114,63	39,35	115,61	13,60094	9,300469	7,648	19,44643
38	38,4	96,25	58,34	98,21	39,35	115,61	59,05	117,58	22,90376	9,305164	7,746	20,0361
39	58,34	98,21	90,44	138,79	59,05	117,58	86,95	143,89	34,59859	14,08451	4,894	51,74115
40	86,95	143,89	107,63	170,71	84,16	154,18	104,24	192,88	44,9507	9,568075	6,492	33,86702
41	107,63	170,71	121,66	185,97	104,24	192,88	118,67	212,28	53,07512	6,680751	9,896	20,72941
42	121,66	185,97	135,23	199,89	118,67	212,28	136	221,51	60,04225	7,253521	9,586	19,43994
43	-1,01	114,38	19,17	114,63	-1,74	132,62	18,92	133,11	4,147887	9,568854	7,344	20,18155
44	19,17	114,63	39,35	115,61	18,92	133,11	39,84	133,85	13,76526	9,647887	7,344	20,20378
45	39,35	115,61	59,05	117,58	39,84	133,85	60,27	136,8	23,2993	9,420188	7,492	19,79825
46	59,05	117,58	86,95	143,89	60,27	136,8	84,16	154,18	34,08803	12,15728	5,902	38,34874
47	84,16	154,18	104,24	192,88	83,63	166,81	105,26	217,97	44,28286	9,79108	7,544	43,59927
48	104,24	192,88	118,67	212,28	105,26	217,97	119,1	238,32	52,49648	6,63615	10,228	24,17819
49	118,67	212,28	136	221,51	119,1	238,32	136,33	243	59,87089	8,112676	9,506	19,63471
50	-1,74	132,62	18,92	133,11	-2,43	150,34	20,01	150,63	4,079812	10,11737	7,048	20,66581
51	18,92	133,11	39,84	133,85	20,01	150,63	42,16	152,11	14,19386	10,11033	7,156	20,93308
52	39,84	133,85	60,27	136,8	42,16	152,11	62,83	155,36	24,07277	9,647887	7,364	20,64188
53	60,27	136,8	84,16	154,18	62,83	155,36	83,63	166,81	34,14202	10,49061	6,238	29,54313
54	83,63	166,81	105,26	217,97	85,08	185,15	104,48	245,09	44,41901	9,631455	9,092	55,5446
55	105,26	217,97	119,1	238,32	104,48	245,09	120,35	262,63	52,72183	6,974178	10,288	24,61033
56	119,1	238,32	136,33	243	120,35	262,63	137,52	265,73	60,24648	8,075117	9,408	17,85428
57	-2,43	150,34	20,01	150,63	-2,51	164,88	21,23	164,88	4,280563	10,84038	5,758	22,44187
58	20,01	150,63	42,16	152,11	21,23	164,88	43,2	166,65	14,85915	10,36681	5,758	22,19939
59	42,16	152,11	62,83	155,36	43,2	166,65	66,24	171,61	25,16784	10,26056	6,158	20,92394
60	62,83	155,36	83,63	166,81	66,24	171,61	88,44	185,79	35,11033	9,624413	7,046	23,74326
61	83,63	166,81	104,48	245,09	88,44	185,79	107,9	276,55	44,8885	9,931925	10,088	81,00914
62	104,48	245,09	120,35	262,63	107,9	276,55	122,6	286,84	53,44249	7,178056	11,134	23,65393
63	120,35	262,63	137,52	265,73	122,6	286,84	137,28	290,26	60,76878	7,476526	9,748	17,4476
64	-2,51	164,88	21,23	164,88	-2,46	178,15	21,46	179,33	4,42723	11,18779	5,544	23,74
65	21,23	164,88	43,2	166,65	21,46	179,33	44,79	180,81	15,33803	10,6338	5,722	22,04118
66	43,2	166,65	66,24	171,61	44,79	180,81	68,42	185,83	26,13263	10,9554	5,676	23,56784
67	66,24	171,61	88,44	185,79	68,42	185,83	92,55	206,24	36,81338	10,4061	6,934	24,6802
68	88,44	185,79	107,9	276,55	92,55	206,24	107,9	304,48	46,33685	8,640845	9,676	93,26258
69	107,9	276,55	122,6	286,84	107,9	304,48	121,13	308,89	53,93545	6,556338	9,996	17,94364
70	122,6	286,84	137,28	290,26	121,13	308,89	137,28	314,76	60,83216	7,237089	9,31	15,07312

20,18155	18,63004	18,88117	27,31076	27,60569	1,572261	1,581037	1,547286	1,581919	0,0153	2,2424	2,0152	-4,2575	4,2601
20,20378	18,88117	19,38329	26,80108	28,46352	1,544663	1,630444	1,473241	1,645542	0,0760	2,2301	2,0344	-4,2645	4,2690
19,79825	19,38329	19,38301	25,75617	29,68824	1,460334	1,719496	1,434489	1,705415	0,1458	2,2308	2,0472	-4,2777	4,2847
38,34874	19,38301	6,179814	37,88398	53,89986	1,145454	2,363511	1,414841	1,872225	0,5255	2,6451	1,5880	-4,2331	4,2973
43,59927	10,66153	22,42788	28,70682	51,95156	1,344347	2,396197	0,830358	2,333011	0,8107	2,2584	1,8708	-4,1290	4,1676
24,17819	22,42788	26,47935	18,74045	43,011	0,725091	2,350328	0,75269	2,285004	0,8641	1,8992	2,2717	-4,1709	4,2108
19,63471	26,47935	21,63371	20,68201	38,32398	0,626667	1,947025	1,045808	2,404526	0,7732	1,9615	2,2603	-4,2418	4,2751
20,66581	18,2546	18,48169	27,58384	27,34991	1,589069	1,554509	1,580611	1,569657	0,0144	2,2604	1,9939	-4,2543	4,2576
20,93308	18,48169	18,24658	26,90046	28,22512	1,546754	1,592627	1,508581	1,646179	0,0563	2,2667	1,9939	-4,2606	4,2657
20,64188	18,24658	19,25688	25,17413	29,77688	1,479205	1,741058	1,364002	1,733855	0,1785	2,2429	2,0138	-4,2567	4,2657
29,54313	19,25688	10,66153	27,60599	44,38649	1,035829	2,263132	1,206622	2,062101	0,5833	2,4979	1,7753	-4,2732	4,3161
55,5446	12,64112	25,11072	33,23277	67,18909	1,234498	2,899655	0,359367	2,7036	1,1115	2,2815	2,0208	-4,3022	4,3477
24,61033	25,11072	26,04355	14,66723	47,80809	1,234498	2,58498	0,580732	2,518574	0,9496	1,8925	2,3249	-4,2175	4,2621
17,85428	26,04355	21,49253	23,83665	35,43436	1,012832	1,852528	1,290221	2,075539	0,4649	2,0934	2,2519	-4,3454	4,3641
22,44187	17,73343	17,56387	27,43529	28,23867	1,580625	1,5448	1,495739	1,656844	0,0641	2,3143	1,9527	-4,2670	4,2746
22,19939	17,56387	18,40679	25,97686	30,01829	1,504972	1,699649	1,377702	1,732531	0,1587	2,3136	1,9680	-4,2815	4,2923
20,92394	18,40679	18,73572	23,7143	31,48365	1,362421	1,853129	1,277774	1,851267	0,2931	2,2667	1,9966	-4,2633	4,2776
23,74326	18,73572	12,64112	21,36261	38,03012	0,917235	2,211075	1,109523	2,157803	0,6452	2,3505	1,8307	-4,1811	4,2175
63,0013	18,39723	27,13121	38,52771	81,00914	1,100556	2,907474	0,34177	2,712841	1,1999	2,2650	2,2074	-4,4724	4,5170
23,65393	27,13121	24,34212	16,1114	47,14047	1,100556	2,377385	0,884081	2,595723	0,8992	1,9422	2,3308	-4,2730	4,3138
17,4476	24,34212	22,76113	25,312	33,0243	1,26673	1,800793	1,339667	1,888323	0,2990	2,0888	2,2416	-4,3303	4,3427
23,74	14,54022	14,30213	26,64962	27,77062	1,566748	1,565294	1,485391	1,669125	0,0713	2,3833	1,7506	-4,1339	4,1528
22,04118	14,30213	14,57715	24,51811	28,1854	1,482284	1,736693	1,419	1,70892	0,1521	2,3376	1,7506	-4,0882	4,1084
23,56784	14,57715	16,60393	22,64511	30,98542	1,425183	1,854243	1,15191	1,933597	0,3493	2,3283	1,8178	-4,1461	4,1705
24,6802	16,60393	19,18688	18,04029	38,51515	0,927326	2,389695	0,81176	2,220991	0,7886	2,2643	1,9525	-4,2168	4,2516
93,26258	19,18688	31,64535	61,98332	112,3917	1,258165	3,056392	0,123899	2,989569	1,3834	2,2958	2,3113	-4,6071	4,6569
17,94364	31,64535	24,31433	18,67536	45,5126	1,258165	2,289607	0,8674	2,498809	0,7671	1,9707	2,4100	-4,3808	4,4171
15,07312	24,31433	24,53117	25,85031	32,40435	1,315993	1,892354	1,351693	1,739636	0,2703	2,0118	2,2771	-4,2888	4,3021
23,94909	13,27009	14,45183	27,15343	27,98883	1,568955	1,623855	1,50559	1,586712	0,0468	2,4148	1,7127	-4,1275	4,1493
23,3789	14,45183	14,24899	25,16764	28,44009	1,515552	1,650065	1,396624	1,763007	0,1518	2,3640	1,7443	-4,1084	4,1300
24,15734	14,24899	14,38613	23,33972	31,68471	1,375273	1,891946	1,209346	1,934959	0,3476	2,3938	1,7362	-4,1301	4,1614
31,60419	14,38613	21,34326	18,02004	43,49084	0,98655	2,424988	0,57839	2,473185	0,9258	2,3424	1,9364	-4,2788	4,3211
99,43199	21,34326	27,93	71,96609	120,6145	1,270218	3,006255	0,154997	2,909409	1,3325	2,1565	2,2696	-4,4261	4,4765
13,94564	27,93	22,09895	22,96213	34,9415	0,79885	1,892547	1,315614	2,114954	0,5626	1,8804	2,3022	-4,1826	4,2120
17,1837	22,09895	24,5	24,65662	31,54408	1,425436	1,85265	1,222174	1,799684	0,2863	1,9792	2,2311	-4,2103	4,2241

71	-2,46	178,15	21,46	179,33	-2,16	191,74	19,69	191,74	4,287559	10,74413	5,2	23,94909
72	21,46	179,33	44,79	180,81	19,69	191,74	42,13	194,1	15,03169	10,74413	5,14	23,3789
73	44,79	180,81	68,42	185,83	42,13	194,1	66,94	199,42	26,0892	11,37089	5,376	24,15734
74	68,42	185,83	92,55	206,24	66,94	199,42	94,75	224,33	37,87089	12,19249	6,336	31,60419
75	92,55	206,24	107,9	304,48	94,75	224,33	107,17	326,53	47,22653	6,518779	8,028	99,43199
76	107,9	304,48	121,13	308,89	107,17	326,53	121,13	336,08	53,67723	6,382629	9,848	13,94564
77	121,13	308,89	137,28	314,76	121,13	336,08	136,67	339,87	60,58803	7,438967	10,46	17,1837
78	-2,16	191,74	19,69	191,74	-0,98	208,87	18,8	210,05	4,149061	9,7723	7,088	21,85
79	19,69	191,74	42,13	194,1	18,8	210,05	40,07	210,64	14,16549	10,26056	6,97	22,56376
80	42,13	194,1	66,94	199,42	40,07	210,64	60,74	212,12	24,63338	10,67606	5,848	25,37397
81	66,94	199,42	94,75	224,33	60,74	212,12	94,18	230,85	37,1608	14,37793	3,844	37,33503
82	94,75	224,33	107,17	326,53	94,18	230,85	104,96	352,99	47,07277	5,446009	6,596	102,9519
83	107,17	326,53	121,13	336,08	104,96	352,99	117,46	361,07	52,90141	6,211268	10,29	16,91402
84	121,13	336,08	136,67	339,87	117,46	361,07	136,67	363,14	60,08568	8,157277	9,652	15,99549
85	-0,98	208,87	18,8	210,05	-0,39	229,25	17,32	229,54	4,078638	8,800469	7,974	19,81517
86	18,8	210,05	40,07	210,64	17,32	229,54	37,7	229,54	13,36737	9,776995	7,678	21,27818
87	40,07	210,64	60,74	212,12	37,7	229,54	57,2	228,36	22,97066	9,429577	7,028	20,72292
88	60,74	212,12	87,95	224,62	57,2	228,36	78,8	230,82	33,41432	11,45775	4,488	29,94385
89	87,95	224,62	104,96	352,99	78,8	230,82	99,08	374,3	43,51995	8,753521	5,502	129,4921
90	104,96	352,99	117,46	361,07	99,08	374,3	115,25	380,92	51,26174	6,730047	8,232	14,8841
91	117,46	361,07	136,67	363,14	115,25	380,92	136,67	381,51	59,39554	9,537559	7,644	19,32121
92	-0,39	229,25	17,32	229,54	-1,95	241,37	17,64	243,21	3,828638	8,755869	5,158	17,71237
93	17,32	229,54	37,7	229,54	17,64	243,21	36,62	243,21	12,82629	9,239437	5,468	20,36
94	37,7	229,54	57,2	228,36	36,62	243,21	56,83	241,37	22,10681	9,321596	5,336	19,53567
95	57,2	228,36	78,8	230,82	56,83	241,37	75,21	242,6	31,46009	9,384977	4,958	21,73983
96	78,8	230,82	99,08	374,3	75,21	242,6	95,49	392,81	40,91315	9,521127	6,058	144,9061
97	99,08	374,3	115,25	380,92	95,49	392,81	114,37	397,4	49,78756	8,2277	6,998	17,47264
98	115,25	380,92	136,67	381,51	114,37	397,4	135,81	399,95	58,93192	10,06103	6,984	21,42812

21,85	13,59331	12,53559	26,66169	25,96674	1,534463	1,592868	1,712468	1,478416	0,0954	2,3744	1,6487	-4,0230	4,0487
22,56376	12,53559	13,55359	27,37654	25,40476	1,606629	1,533909	1,663552	1,436609	0,0933	2,3744	1,6371	-4,0114	4,0378
25,37397	13,55359	13,67035	27,56006	28,93017	1,564999	1,584487	1,468041	1,67165	0,0791	2,4311	1,6819	-4,1130	4,1389
37,33503	13,67035	18,22328	26,50254	46,64246	1,278119	2,192766	0,719331	2,393887	0,7481	2,5008	1,8462	-4,3471	4,3919
102,9519	18,22328	22,06208	81,22158	121,1752	1,344638	3,141506	0,154028	2,953501	1,3863	1,8747	2,0629	-3,9576	4,0174
16,91402	22,06208	27,19	22,49558	34,25774	1,287858	2,137675	0,970823	1,892547	0,5081	1,8536	2,2873	-4,1408	4,1688
15,99549	27,19	25,11741	26,74631	34,65908	1,216138	1,810013	1,355888	1,89513	0,3159	2,0067	2,3476	-4,3543	4,3708
19,81517	17,17059	18,33162	26,84559	27,83124	1,526827	1,699158	1,55978	1,522227	0,0790	2,2796	1,9584	-4,2380	4,2451
21,27818	18,33162	16,66779	28,26113	27,79488	1,534343	1,549959	1,666973	1,551672	0,0584	2,3283	1,9416	-4,2699	4,2780
20,72292	16,66779	14,13259	29,11847	25,90468	1,520855	1,518367	1,953471	1,327873	0,2508	2,3680	1,7661	-4,1341	4,1587
38,32814	14,13259	6,544868	36,13536	41,59162	1,463904	1,627212	1,147428	2,214041	0,4259	2,6657	1,3465	-4,0122	4,1012
122,6148	6,544868	26,55213	96,55777	129,0645	1,504429	2,96836	0,17136	2,93733	1,3134	1,6949	1,8865	-3,5813	3,6436
14,8841	26,55213	25,25805	23,39694	36,0402	0,975712	2,061308	1,142772	2,024953	0,5419	1,8264	2,3312	-4,1575	4,1894
19,32121	25,25805	23,27	28,60881	31,20473	1,488362	1,532322	1,463454	1,810013	0,1516	2,0989	2,2672	-4,3661	4,3729
17,71237	20,38854	19,54611	27,14583	27,60686	1,504344	1,616112	1,630214	1,554591	0,0554	2,1748	2,0762	-4,2510	4,2535
20,36	19,54611	19,04802	29,57655	27,14903	1,60255	1,495005	1,695542	1,473782	0,0973	2,2800	2,0384	-4,3184	4,3244
19,53567	19,04802	16,62135	28,88422	24,6462	1,605914	1,385612	1,845858	1,427653	0,1982	2,2439	1,9499	-4,1938	4,2050
21,73983	16,62135	11,05271	30,97661	25,99718	1,455533	1,489574	2,432662	1,026166	0,5633	2,4387	1,5014	-3,9401	4,0006
144,9061	11,05271	22,10635	124,9394	150,0932	1,531212	2,025913	0,409641	2,740625	0,9345	2,1695	1,7051	-3,8746	3,9237
17,47264	22,10635	19,97265	22,64635	29,76523	1,273672	1,690152	1,293091	2,033758	0,3429	1,9066	2,1080	-4,0146	4,0305
21,42812	19,97265	18,37	27,83783	28,05027	1,573333	1,487455	1,543259	1,678139	0,0758	2,2552	2,0339	-4,2892	4,2940
19,67622	12,21998	13,67374	22,61154	22,80269	1,631039	1,536438	1,453741	1,610574	0,0773	2,1697	1,6405	-3,8103	3,8259
18,98	13,67374	13,7128	24,27494	23,65077	1,557614	1,594201	1,649638	1,491955	0,0627	2,2235	1,6989	-3,9224	3,9367
20,29359	13,7128	13,01526	25,37832	22,49235	1,645881	1,401161	1,690022	1,481925	0,1298	2,2323	1,6745	-3,9068	3,9256
18,42111	13,01526	12,31489	24,37177	22,95948	1,52546	1,609185	1,799788	1,388384	0,1633	2,2391	1,6010	-3,8401	3,8648
151,5728	12,31489	18,85493	133,8457	162,8475	1,487308	2,711581	0,32577	2,809608	1,1453	2,2535	1,8014	-4,0549	4,1100
19,42994	18,85493	16,50348	23,06143	27,70188	1,410068	1,617713	1,385656	1,906033	0,2284	2,1075	1,9456	-4,0531	4,0636
21,59111	16,50348	18,46004	27,38215	28,01525	1,586351	1,635829	1,49902	1,55173	0,0546	2,3087	1,9436	-4,2523	4,2596

№	p	m	R	Aa
1	= (B3+D3+F3+H3)/(4*2, 13)	= (ABS(H3-F3)+ABS(D3-B3))/(2*2, 13)	= ((G3-C3)+(I3-E3))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E3-C3)^2+(D3-B3)^2)
2	= (B4+D4+F4+H4)/(4*2, 13)	= (ABS(H4-F4)+ABS(D4-B4))/(2*2, 13)	= ((G4-C4)+(I4-E4))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E4-C4)^2+(D4-B4)^2)
3	= (B5+D5+F5+H5)/(4*2, 13)	= (ABS(H5-F5)+ABS(D5-B5))/(2*2, 13)	= ((G5-C5)+(I5-E5))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E5-C5)^2+(D5-B5)^2)
4	= (B6+D6+F6+H6)/(4*2, 13)	= (ABS(H6-F6)+ABS(D6-B6))/(2*2, 13)	= ((G6-C6)+(I6-E6))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E6-C6)^2+(D6-B6)^2)
5	= (B7+D7+F7+H7)/(4*2, 13)	= (ABS(H7-F7)+ABS(D7-B7))/(2*2, 13)	= ((G7-C7)+(I7-E7))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E7-C7)^2+(D7-B7)^2)
6	= (B8+D8+F8+H8)/(4*2, 13)	= (ABS(H8-F8)+ABS(D8-B8))/(2*2, 13)	= ((G8-C8)+(I8-E8))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E8-C8)^2+(D8-B8)^2)
7	= (B9+D9+F9+H9)/(4*2, 13)	= (ABS(H9-F9)+ABS(D9-B9))/(2*2, 13)	= ((G9-C9)+(I9-E9))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E9-C9)^2+(D9-B9)^2)
8	= (B10+D10+F10+H10)/(4*2, 13)	= (ABS(H10-F10)+ABS(D10-B10))/(2*2, 13)	= ((G10-C10)+(I10-E10))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E10-C10)^2+(D10-B10)^2)
9	= (B11+D11+F11+H11)/(4*2, 13)	= (ABS(H11-F11)+ABS(D11-B11))/(2*2, 13)	= ((G11-C11)+(I11-E11))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E11-C11)^2+(D11-B11)^2)
10	= (B12+D12+F12+H12)/(4*2, 13)	= (ABS(H12-F12)+ABS(D12-B12))/(2*2, 13)	= ((G12-C12)+(I12-E12))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E12-C12)^2+(D12-B12)^2)
11	= (B13+D13+F13+H13)/(4*2, 13)	= (ABS(H13-F13)+ABS(D13-B13))/(2*2, 13)	= ((G13-C13)+(I13-E13))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E13-C13)^2+(D13-B13)^2)
12	= (B14+D14+F14+H14)/(4*2, 13)	= (ABS(H14-F14)+ABS(D14-B14))/(2*2, 13)	= ((G14-C14)+(I14-E14))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E14-C14)^2+(D14-B14)^2)
13	= (B15+D15+F15+H15)/(4*2, 13)	= (ABS(H15-F15)+ABS(D15-B15))/(2*2, 13)	= ((G15-C15)+(I15-E15))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E15-C15)^2+(D15-B15)^2)
14	= (B16+D16+F16+H16)/(4*2, 13)	= (ABS(H16-F16)+ABS(D16-B16))/(2*2, 13)	= ((G16-C16)+(I16-E16))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E16-C16)^2+(D16-B16)^2)
15	= (B17+D17+F17+H17)/(4*2, 13)	= (ABS(H17-F17)+ABS(D17-B17))/(2*2, 13)	= ((G17-C17)+(I17-E17))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E17-C17)^2+(D17-B17)^2)
16	= (B18+D18+F18+H18)/(4*2, 13)	= (ABS(H18-F18)+ABS(D18-B18))/(2*2, 13)	= ((G18-C18)+(I18-E18))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E18-C18)^2+(D18-B18)^2)
17	= (B19+D19+F19+H19)/(4*2, 13)	= (ABS(H19-F19)+ABS(D19-B19))/(2*2, 13)	= ((G19-C19)+(I19-E19))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E19-C19)^2+(D19-B19)^2)
18	= (B20+D20+F20+H20)/(4*2, 13)	= (ABS(H20-F20)+ABS(D20-B20))/(2*2, 13)	= ((G20-C20)+(I20-E20))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E20-C20)^2+(D20-B20)^2)
19	= (B21+D21+F21+H21)/(4*2, 13)	= (ABS(H21-F21)+ABS(D21-B21))/(2*2, 13)	= ((G21-C21)+(I21-E21))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E21-C21)^2+(D21-B21)^2)
20	= (B22+D22+F22+H22)/(4*2, 13)	= (ABS(H22-F22)+ABS(D22-B22))/(2*2, 13)	= ((G22-C22)+(I22-E22))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E22-C22)^2+(D22-B22)^2)
21	= (B23+D23+F23+H23)/(4*2, 13)	= (ABS(H23-F23)+ABS(D23-B23))/(2*2, 13)	= ((G23-C23)+(I23-E23))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E23-C23)^2+(D23-B23)^2)
22	= (B24+D24+F24+H24)/(4*2, 13)	= (ABS(H24-F24)+ABS(D24-B24))/(2*2, 13)	= ((G24-C24)+(I24-E24))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E24-C24)^2+(D24-B24)^2)
23	= (B25+D25+F25+H25)/(4*2, 13)	= (ABS(H25-F25)+ABS(D25-B25))/(2*2, 13)	= ((G25-C25)+(I25-E25))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E25-C25)^2+(D25-B25)^2)
24	= (B26+D26+F26+H26)/(4*2, 13)	= (ABS(H26-F26)+ABS(D26-B26))/(2*2, 13)	= ((G26-C26)+(I26-E26))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E26-C26)^2+(D26-B26)^2)
25	= (B27+D27+F27+H27)/(4*2, 13)	= (ABS(H27-F27)+ABS(D27-B27))/(2*2, 13)	= ((G27-C27)+(I27-E27))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E27-C27)^2+(D27-B27)^2)
26	= (B28+D28+F28+H28)/(4*2, 13)	= (ABS(H28-F28)+ABS(D28-B28))/(2*2, 13)	= ((G28-C28)+(I28-E28))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E28-C28)^2+(D28-B28)^2)
27	= (B29+D29+F29+H29)/(4*2, 13)	= (ABS(H29-F29)+ABS(D29-B29))/(2*2, 13)	= ((G29-C29)+(I29-E29))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E29-C29)^2+(D29-B29)^2)
28	= (B30+D30+F30+H30)/(4*2, 13)	= (ABS(H30-F30)+ABS(D30-B30))/(2*2, 13)	= ((G30-C30)+(I30-E30))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E30-C30)^2+(D30-B30)^2)
29	= (B31+D31+F31+H31)/(4*2, 13)	= (ABS(H31-F31)+ABS(D31-B31))/(2*2, 13)	= ((G31-C31)+(I31-E31))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E31-C31)^2+(D31-B31)^2)
30	= (B32+D32+F32+H32)/(4*2, 13)	= (ABS(H32-F32)+ABS(D32-B32))/(2*2, 13)	= ((G32-C32)+(I32-E32))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E32-C32)^2+(D32-B32)^2)
31	= (B33+D33+F33+H33)/(4*2, 13)	= (ABS(H33-F33)+ABS(D33-B33))/(2*2, 13)	= ((G33-C33)+(I33-E33))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E33-C33)^2+(D33-B33)^2)
32	= (B34+D34+F34+H34)/(4*2, 13)	= (ABS(H34-F34)+ABS(D34-B34))/(2*2, 13)	= ((G34-C34)+(I34-E34))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E34-C34)^2+(D34-B34)^2)
33	= (B35+D35+F35+H35)/(4*2, 13)	= (ABS(H35-F35)+ABS(D35-B35))/(2*2, 13)	= ((G35-C35)+(I35-E35))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E35-C35)^2+(D35-B35)^2)
34	= (B36+D36+F36+H36)/(4*2, 13)	= (ABS(H36-F36)+ABS(D36-B36))/(2*2, 13)	= ((G36-C36)+(I36-E36))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E36-C36)^2+(D36-B36)^2)
35	= (B37+D37+F37+H37)/(4*2, 13)	= (ABS(H37-F37)+ABS(D37-B37))/(2*2, 13)	= ((G37-C37)+(I37-E37))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E37-C37)^2+(D37-B37)^2)
36	= (B38+D38+F38+H38)/(4*2, 13)	= (ABS(H38-F38)+ABS(D38-B38))/(2*2, 13)	= ((G38-C38)+(I38-E38))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E38-C38)^2+(D38-B38)^2)
37	= (B39+D39+F39+H39)/(4*2, 13)	= (ABS(H39-F39)+ABS(D39-B39))/(2*2, 13)	= ((G39-C39)+(I39-E39))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E39-C39)^2+(D39-B39)^2)
38	= (B40+D40+F40+H40)/(4*2, 13)	= (ABS(H40-F40)+ABS(D40-B40))/(2*2, 13)	= ((G40-C40)+(I40-E40))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E40-C40)^2+(D40-B40)^2)
39	= (B41+D41+F41+H41)/(4*2, 13)	= (ABS(H41-F41)+ABS(D41-B41))/(2*2, 13)	= ((G41-C41)+(I41-E41))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E41-C41)^2+(D41-B41)^2)
40	= (B42+D42+F42+H42)/(4*2, 13)	= (ABS(H42-F42)+ABS(D42-B42))/(2*2, 13)	= ((G42-C42)+(I42-E42))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E42-C42)^2+(D42-B42)^2)
41	= (B43+D43+F43+H43)/(4*2, 13)	= (ABS(H43-F43)+ABS(D43-B43))/(2*2, 13)	= ((G43-C43)+(I43-E43))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E43-C43)^2+(D43-B43)^2)
42	= (B44+D44+F44+H44)/(4*2, 13)	= (ABS(H44-F44)+ABS(D44-B44))/(2*2, 13)	= ((G44-C44)+(I44-E44))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E44-C44)^2+(D44-B44)^2)
43	= (B45+D45+F45+H45)/(4*2, 13)	= (ABS(H45-F45)+ABS(D45-B45))/(2*2, 13)	= ((G45-C45)+(I45-E45))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E45-C45)^2+(D45-B45)^2)
44	= (B46+D46+F46+H46)/(4*2, 13)	= (ABS(H46-F46)+ABS(D46-B46))/(2*2, 13)	= ((G46-C46)+(I46-E46))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E46-C46)^2+(D46-B46)^2)
45	= (B47+D47+F47+H47)/(4*2, 13)	= (ABS(H47-F47)+ABS(D47-B47))/(2*2, 13)	= ((G47-C47)+(I47-E47))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E47-C47)^2+(D47-B47)^2)
46	= (B48+D48+F48+H48)/(4*2, 13)	= (ABS(H48-F48)+ABS(D48-B48))/(2*2, 13)	= ((G48-C48)+(I48-E48))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E48-C48)^2+(D48-B48)^2)
47	= (B49+D49+F49+H49)/(4*2, 13)	= (ABS(H49-F49)+ABS(D49-B49))/(2*2, 13)	= ((G49-C49)+(I49-E49))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E49-C49)^2+(D49-B49)^2)
48	= (B50+D50+F50+H50)/(4*2, 13)	= (ABS(H50-F50)+ABS(D50-B50))/(2*2, 13)	= ((G50-C50)+(I50-E50))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E50-C50)^2+(D50-B50)^2)
49	= (B51+D51+F51+H51)/(4*2, 13)	= (ABS(H51-F51)+ABS(D51-B51))/(2*2, 13)	= ((G51-C51)+(I51-E51))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E51-C51)^2+(D51-B51)^2)
50	= (B52+D52+F52+H52)/(4*2, 13)	= (ABS(H52-F52)+ABS(D52-B52))/(2*2, 13)	= ((G52-C52)+(I52-E52))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E52-C52)^2+(D52-B52)^2)
51	= (B53+D53+F53+H53)/(4*2, 13)	= (ABS(H53-F53)+ABS(D53-B53))/(2*2, 13)	= ((G53-C53)+(I53-E53))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E53-C53)^2+(D53-B53)^2)
52	= (B54+D54+F54+H54)/(4*2, 13)	= (ABS(H54-F54)+ABS(D54-B54))/(2*2, 13)	= ((G54-C54)+(I54-E54))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E54-C54)^2+(D54-B54)^2)
53	= (B55+D55+F55+H55)/(4*2, 13)	= (ABS(H55-F55)+ABS(D55-B55))/(2*2, 13)	= ((G55-C55)+(I55-E55))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E55-C55)^2+(D55-B55)^2)
54	= (B56+D56+F56+H56)/(4*2, 13)	= (ABS(H56-F56)+ABS(D56-B56))/(2*2, 13)	= ((G56-C56)+(I56-E56))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E56-C56)^2+(D56-B56)^2)
55	= (B57+D57+F57+H57)/(4*2, 13)	= (ABS(H57-F57)+ABS(D57-B57))/(2*2, 13)	= ((G57-C57)+(I57-E57))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E57-C57)^2+(D57-B57)^2)
56	= (B58+D58+F58+H58)/(4*2, 13)	= (ABS(H58-F58)+ABS(D58-B58))/(2*2, 13)	= ((G58-C58)+(I58-E58))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E58-C58)^2+(D58-B58)^2)
57	= (B59+D59+F59+H59)/(4*2, 13)	= (ABS(H59-F59)+ABS(D59-B59))/(2*2, 13)	= ((G59-C59)+(I59-E59))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E59-C59)^2+(D59-B59)^2)
58	= (B60+D60+F60+H60)/(4*2, 13)	= (ABS(H60-F60)+ABS(D60-B60))/(2*2, 13)	= ((G60-C60)+(I60-E60))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E60-C60)^2+(D60-B60)^2)
59	= (B61+D61+F61+H61)/(4*2, 13)	= (ABS(H61-F61)+ABS(D61-B61))/(2*2, 13)	= ((G61-C61)+(I61-E61))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E61-C61)^2+(D61-B61)^2)
60	= (B62+D62+F62+H62)/(4*2, 13)	= (ABS(H62-F62)+ABS(D62-B62))/(2*2, 13)	= ((G62-C62)+(I62-E62))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E62-C62)^2+(D62-B62)^2)
61	= (B63+D63+F63+H63)/(4*2, 13)	= (ABS(H63-F63)+ABS(D63-B63))/(2*2, 13)	= ((G63-C63)+(I63-E63))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E63-C63)^2+(D63-B63)^2)
62	= (B64+D64+F64+H64)/(4*2, 13)	= (ABS(H64-F64)+ABS(D64-B64))/(2*2, 13)	= ((G64-C64)+(I64-E64))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E64-C64)^2+(D64-B64)^2)
63	= (B65+D65+F65+H65)/(4*2, 13)	= (ABS(H65-F65)+ABS(D65-B65))/(2*2, 13)	= ((G65-C65)+(I65-E65))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E65-C65)^2+(D65-B65)^2)
64	= (B66+D66+F66+H66)/(4*2, 13)	= (ABS(H66-F66)+ABS(D66-B66))/(2*2, 13)	= ((G66-C66)+(I66-E66))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E66-C66)^2+(D66-B66)^2)
65	= (B67+D67+F67+H67)/(4*2, 13)	= (ABS(H67-F67)+ABS(D67-B67))/(2*2, 13)	= ((G67-C67)+(I67-E67))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E67-C67)^2+(D67-B67)^2)
66	= (B68+D68+F68+H68)/(4*2, 13)	= (ABS(H68-F68)+ABS(D68-B68))/(2*2, 13)	= ((G68-C68)+(I68-E68))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E68-C68)^2+(D68-B68)^2)
67	= (B69+D69+F69+H69)/(4*2, 13)	= (ABS(H69-F69)+ABS(D69-B69))/(2*2, 13)	= ((G69-C69)+(I69-E69))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E69-C69)^2+(D69-B69)^2)
68	= (B70+D70+F70+H70)/(4*2, 13)	= (ABS(H70-F70)+ABS(D70-B70))/(2*2, 13)	= ((G70-C70)+(I70-E70))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E70-C70)^2+(D70-B70)^2)
69	= (B71+D71+F71+H71)/(4*2, 13)	= (ABS(H71-F71)+ABS(D71-B71))/(2*2, 13)	= ((G71-C71)+(I71-E71))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E71-C71)^2+(D71-B71)^2)
70	= (B72+D72+F72+H72)/(4*2, 13)	= (ABS(H72-F72)+ABS(D72-B72))/(2*2, 13)	= ((G72-C72)+(I72-E72))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E72-C72)^2+(D72-B72)^2)
71	= (B73+D73+F73+H73)/(4*2, 13)	= (ABS(H73-F73)+ABS(D73-B73))/(2*2, 13)	= ((G73-C73)+(I73-E73))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E73-C73)^2+(D73-B73)^2)
72	= (B74+D74+F74+H74)/(4*2, 13)	= (ABS(H74-F74)+ABS(D74-B74))/(2*2, 13)	= ((G74-C74)+(I74-E74))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E74-C74)^2+(D74-B74)^2)
73	= (B75+D75+F75+H75)/(4*2, 13)	= (ABS(H75-F75)+ABS(D75-B75))/(2*2, 13)	= ((G75-C75)+(I75-E75))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E75-C75)^2+(D75-B75)^2)
74	= (B76+D76+F76+H76)/(4*2, 13)	= (ABS(H76-F76)+ABS(D76-B76))/(2*2, 13)	= ((G76-C76)+(I76-E76))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E76-C76)^2+(D76-B76)^2)
75	= (B77+D77+F77+H77)/(4*2, 13)	= (ABS(H77-F77)+ABS(D77-B77))/(2*2, 13)	= ((G77-C77)+(I77-E77))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E77-C77)^2+(D77-B77)^2)
76	= (B78+D78+F78+H78)/(4*2, 13)	= (ABS(H78-F78)+ABS(D78-B78))/(2*2, 13)	= ((G78-C78)+(I78-E78))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E78-C78)^2+(D78-B78)^2)
77	= (B79+D79+F79+H79)/(4*2, 13)	= (ABS(H79-F79)+ABS(D79-B79))/(2*2, 13)	= ((G79-C79)+(I79-E79))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E79-C79)^2+(D79-B79)^2)
78	= (B80+D80+F80+H80)/(4*2, 13)	= (ABS(H80-F80)+ABS(D80-B80))/(2*2, 13)	= ((G80-C80)+(I80-E80))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E80-C80)^2+(D80-B80)^2)
79	= (B81+D81+F81+H81)/(4*2, 13)	= (ABS(H81-F81)+ABS(D81-B81))/(2*2, 13)	= ((G81-C81)+(I81-E81))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E81-C81)^2+(D81-B81)^2)
80	= (B82+D82+F82+H82)/(4*2, 13)	= (ABS(H82-F82)+ABS(D82-B82))/(2*2, 13)	= ((G82-C82)+(I82-E82))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E82-C82)^2+(D82-B82)^2)
81	= (B83+D83+F83+H83)/(4*2, 13)	= (ABS(H83-F83)+ABS(D83-B83))/(2*2, 13)	= ((G83-C83)+(I83-E83))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E83-C83)^2+(D83-B83)^2)
82	= (B84+D84+F84+H84)/(4*2, 13)	= (ABS(H84-F84)+ABS(D84-B84))/(2*2, 13)	= ((G84-C84)+(I84-E84))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E84-C84)^2+(D84-B84)^2)
83	= (B85+D85+F85+H85)/(4*2, 13)	= (ABS(H85-F85)+ABS(D85-B85))/(2*2, 13)	= ((G85-C85)+(I85-E85))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E85-C85)^2+(D85-B85)^2)
84	= (B86+D86+F86+H86)/(4*2, 13)	= (ABS(H86-F86)+ABS(D86-B86))/(2*2, 13)	= ((G86-C86)+(I86-E86))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E86-C86)^2+(D86-B86)^2)
85	= (B87+D87+F87+H87)/(4*2, 13)	= (ABS(H87-F87)+ABS(D87-B87))/(2*2, 13)	= ((G87-C87)+(I87-E87))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E87-C87)^2+(D87-B87)^2)
86	= (B88+D88+F88+H88)/(4*2, 13)	= (ABS(H88-F88)+ABS(D88-B88))/(2*2, 13)	= ((G88-C88)+(I88-E88))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E88-C88)^2+(D88-B88)^2)
87	= (B89+D89+F89+H89)/(4*2, 13)	= (ABS(H89-F89)+ABS(D89-B89))/(2*2, 13)	= ((G89-C89)+(I89-E89))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E89-C89)^2+(D89-B89)^2)
88	= (B90+D90+F90+H90)/(4*2, 13)	= (ABS(H90-F90)+ABS(D90-B90))/(2*2, 13)	= ((G90-C90)+(I90-E90))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E90-C90)^2+(D90-B90)^2)
89	= (B91+D91+F91+H91)/(4*2, 13)	= (ABS(H91-F91)+ABS(D91-B91))/(2*2, 13)	= ((G91-C91)+(I91-E91))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E91-C91)^2+(D91-B91)^2)
90	= (B92+D92+F92+H92)/(4*2, 13)	= (ABS(H92-F92)+ABS(D92-B92))/(2*2, 13)	= ((G92-C92)+(I92-E92))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E92-C92)^2+(D92-B92)^2)
91	= (B93+D93+F93+H93)/(4*2, 13)	= (ABS(H93-F93)+ABS(D93-B93))/(2*2, 13)	= ((G93-C93)+(I93-E93))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E93-C93)^2+(D93-B93)^2)
92	= (B94+D94+F94+H94)/(4*2, 13)	= (ABS(H94-F94)+ABS(D94-B94))/(2*2, 13)	= ((G94-C94)+(I94-E94))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E94-C94)^2+(D94-B94)^2)
93	= (B95+D95+F95+H95)/(4*2, 13)	= (ABS(H95-F95)+ABS(D95-B95))/(2*2, 13)	= ((G95-C95)+(I95-E95))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E95-C95)^2+(D95-B95)^2)
94	= (B96+D96+F96+H96)/(4*2, 13)	= (ABS(H96-F96)+ABS(D96-B96))/(2*2, 13)	= ((G96-C96)+(I96-E96))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E96-C96)^2+(D96-B96)^2)
95	= (B97+D97+F97+H97)/(4*2, 13)	= (ABS(H97-F97)+ABS(D97-B97))/(2*2, 13)	= ((G97-C97)+(I97-E97))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E97-C97)^2+(D97-B97)^2)
96	= (B98+D98+F98+H98)/(4*2, 13)	= (ABS(H98-F98)+ABS(D98-B98))/(2*2, 13)	= ((G98-C98)+(I98-E98))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E98-C98)^2+(D98-B98)^2)
97	= (B99+D99+F99+H99)/(4*2, 13)	= (ABS(H99-F99)+ABS(D99-B99))/(2*2, 13)	= ((G99-C99)+(I99-E99))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E99-C99)^2+(D99-B99)^2)
98	= (B100+D100+F100+H100)/(4*2, 13)	= (ABS(H100-F100)+ABS(D100-B100))/(2*2, 13)	= ((G100-C100)+(I100-E100))/(2*2, 5)	= KOPEHb((E100-C100)^2+(D100-B100)^2)

№	D	da	dc	dd
1	=КОРЕНЫ((13-C3)*2+(H3-B3)/2)	=ACOS((M3*2+O3*2-Q3*2)/(2*M3*Q3))	=ACOS((N3*2+O3*2-R3*2)/(2*N3*Q3))	=ACOS((P3*2+O3*2-S3*2)/(2*P3*Q3))
2	=КОРЕНЫ((14-C4)*2+(H4-B4)/2)	=ACOS((M4*2+O4*2-Q4*2)/(2*M4*Q4))	=ACOS((N4*2+O4*2-R4*2)/(2*N4*Q4))	=ACOS((P4*2+O4*2-S4*2)/(2*P4*Q4))
3	=КОРЕНЫ((15-C5)*2+(H5-B5)/2)	=ACOS((M5*2+O5*2-Q5*2)/(2*M5*Q5))	=ACOS((N5*2+O5*2-R5*2)/(2*N5*Q5))	=ACOS((P5*2+O5*2-S5*2)/(2*P5*Q5))
4	=КОРЕНЫ((16-C6)*2+(H6-B6)/2)	=ACOS((M6*2+O6*2-Q6*2)/(2*M6*Q6))	=ACOS((N6*2+O6*2-R6*2)/(2*N6*Q6))	=ACOS((P6*2+O6*2-S6*2)/(2*P6*Q6))
5	=КОРЕНЫ((17-C7)*2+(H7-B7)/2)	=ACOS((M7*2+O7*2-Q7*2)/(2*M7*Q7))	=ACOS((N7*2+O7*2-R7*2)/(2*N7*Q7))	=ACOS((P7*2+O7*2-S7*2)/(2*P7*Q7))
6	=КОРЕНЫ((18-C8)*2+(H8-B8)/2)	=ACOS((M8*2+O8*2-Q8*2)/(2*M8*Q8))	=ACOS((N8*2+O8*2-R8*2)/(2*N8*Q8))	=ACOS((P8*2+O8*2-S8*2)/(2*P8*Q8))
7	=КОРЕНЫ((19-C9)*2+(H9-B9)/2)	=ACOS((M9*2+O9*2-Q9*2)/(2*M9*Q9))	=ACOS((N9*2+O9*2-R9*2)/(2*N9*Q9))	=ACOS((P9*2+O9*2-S9*2)/(2*P9*Q9))
8	=КОРЕНЫ((10-C10)*2+(H10-B10)/2)	=ACOS((M10*2+O10*2-Q10*2)/(2*M10*Q10))	=ACOS((N10*2+O10*2-R10*2)/(2*N10*Q10))	=ACOS((P10*2+O10*2-S10*2)/(2*P10*Q10))
9	=КОРЕНЫ((11-C11)*2+(H11-B11)/2)	=ACOS((M11*2+O11*2-Q11*2)/(2*M11*Q11))	=ACOS((N11*2+O11*2-R11*2)/(2*N11*Q11))	=ACOS((P11*2+O11*2-S11*2)/(2*P11*Q11))
10	=КОРЕНЫ((12-C12)*2+(H12-B12)/2)	=ACOS((M12*2+O12*2-Q12*2)/(2*M12*Q12))	=ACOS((N12*2+O12*2-R12*2)/(2*N12*Q12))	=ACOS((P12*2+O12*2-S12*2)/(2*P12*Q12))
11	=КОРЕНЫ((13-C13)*2+(H13-B13)/2)	=ACOS((M13*2+O13*2-Q13*2)/(2*M13*Q13))	=ACOS((N13*2+O13*2-R13*2)/(2*N13*Q13))	=ACOS((P13*2+O13*2-S13*2)/(2*P13*Q13))
12	=КОРЕНЫ((14-C14)*2+(H14-B14)/2)	=ACOS((M14*2+O14*2-Q14*2)/(2*M14*Q14))	=ACOS((N14*2+O14*2-R14*2)/(2*N14*Q14))	=ACOS((P14*2+O14*2-S14*2)/(2*P14*Q14))
13	=КОРЕНЫ((15-C15)*2+(H15-B15)/2)	=ACOS((M15*2+O15*2-Q15*2)/(2*M15*Q15))	=ACOS((N15*2+O15*2-R15*2)/(2*N15*Q15))	=ACOS((P15*2+O15*2-S15*2)/(2*P15*Q15))
14	=КОРЕНЫ((16-C16)*2+(H16-B16)/2)	=ACOS((M16*2+O16*2-Q16*2)/(2*M16*Q16))	=ACOS((N16*2+O16*2-R16*2)/(2*N16*Q16))	=ACOS((P16*2+O16*2-S16*2)/(2*P16*Q16))
15	=КОРЕНЫ((17-C17)*2+(H17-B17)/2)	=ACOS((M17*2+O17*2-Q17*2)/(2*M17*Q17))	=ACOS((N17*2+O17*2-R17*2)/(2*N17*Q17))	=ACOS((P17*2+O17*2-S17*2)/(2*P17*Q17))
16	=КОРЕНЫ((18-C18)*2+(H18-B18)/2)	=ACOS((M18*2+O18*2-Q18*2)/(2*M18*Q18))	=ACOS((N18*2+O18*2-R18*2)/(2*N18*Q18))	=ACOS((P18*2+O18*2-S18*2)/(2*P18*Q18))
17	=КОРЕНЫ((19-C19)*2+(H19-B19)/2)	=ACOS((M19*2+O19*2-Q19*2)/(2*M19*Q19))	=ACOS((N19*2+O19*2-R19*2)/(2*N19*Q19))	=ACOS((P19*2+O19*2-S19*2)/(2*P19*Q19))
18	=КОРЕНЫ((20-C20)*2+(H20-B20)/2)	=ACOS((M20*2+O20*2-Q20*2)/(2*M20*Q20))	=ACOS((N20*2+O20*2-R20*2)/(2*N20*Q20))	=ACOS((P20*2+O20*2-S20*2)/(2*P20*Q20))
19	=КОРЕНЫ((21-C21)*2+(H21-B21)/2)	=ACOS((M21*2+O21*2-Q21*2)/(2*M21*Q21))	=ACOS((N21*2+O21*2-R21*2)/(2*N21*Q21))	=ACOS((P21*2+O21*2-S21*2)/(2*P21*Q21))
20	=КОРЕНЫ((22-C22)*2+(H22-B22)/2)	=ACOS((M22*2+O22*2-Q22*2)/(2*M22*Q22))	=ACOS((N22*2+O22*2-R22*2)/(2*N22*Q22))	=ACOS((P22*2+O22*2-S22*2)/(2*P22*Q22))
21	=КОРЕНЫ((23-C23)*2+(H23-B23)/2)	=ACOS((M23*2+O23*2-Q23*2)/(2*M23*Q23))	=ACOS((N23*2+O23*2-R23*2)/(2*N23*Q23))	=ACOS((P23*2+O23*2-S23*2)/(2*P23*Q23))
22	=КОРЕНЫ((24-C24)*2+(H24-B24)/2)	=ACOS((M24*2+O24*2-Q24*2)/(2*M24*Q24))	=ACOS((N24*2+O24*2-R24*2)/(2*N24*Q24))	=ACOS((P24*2+O24*2-S24*2)/(2*P24*Q24))
23	=КОРЕНЫ((25-C25)*2+(H25-B25)/2)	=ACOS((M25*2+O25*2-Q25*2)/(2*M25*Q25))	=ACOS((N25*2+O25*2-R25*2)/(2*N25*Q25))	=ACOS((P25*2+O25*2-S25*2)/(2*P25*Q25))
24	=КОРЕНЫ((26-C26)*2+(H26-B26)/2)	=ACOS((M26*2+O26*2-Q26*2)/(2*M26*Q26))	=ACOS((N26*2+O26*2-R26*2)/(2*N26*Q26))	=ACOS((P26*2+O26*2-S26*2)/(2*P26*Q26))
25	=КОРЕНЫ((27-C27)*2+(H27-B27)/2)	=ACOS((M27*2+O27*2-Q27*2)/(2*M27*Q27))	=ACOS((N27*2+O27*2-R27*2)/(2*N27*Q27))	=ACOS((P27*2+O27*2-S27*2)/(2*P27*Q27))
26	=КОРЕНЫ((28-C28)*2+(H28-B28)/2)	=ACOS((M28*2+O28*2-Q28*2)/(2*M28*Q28))	=ACOS((N28*2+O28*2-R28*2)/(2*N28*Q28))	=ACOS((P28*2+O28*2-S28*2)/(2*P28*Q28))
27	=КОРЕНЫ((29-C29)*2+(H29-B29)/2)	=ACOS((M29*2+O29*2-Q29*2)/(2*M29*Q29))	=ACOS((N29*2+O29*2-R29*2)/(2*N29*Q29))	=ACOS((P29*2+O29*2-S29*2)/(2*P29*Q29))
28	=КОРЕНЫ((30-C30)*2+(H30-B30)/2)	=ACOS((M30*2+O30*2-Q30*2)/(2*M30*Q30))	=ACOS((N30*2+O30*2-R30*2)/(2*N30*Q30))	=ACOS((P30*2+O30*2-S30*2)/(2*P30*Q30))
29	=КОРЕНЫ((31-C31)*2+(H31-B31)/2)	=ACOS((M31*2+O31*2-Q31*2)/(2*M31*Q31))	=ACOS((N31*2+O31*2-R31*2)/(2*N31*Q31))	=ACOS((P31*2+O31*2-S31*2)/(2*P31*Q31))
30	=КОРЕНЫ((32-C32)*2+(H32-B32)/2)	=ACOS((M32*2+O32*2-Q32*2)/(2*M32*Q32))	=ACOS((N32*2+O32*2-R32*2)/(2*N32*Q32))	=ACOS((P32*2+O32*2-S32*2)/(2*P32*Q32))
31	=КОРЕНЫ((33-C33)*2+(H33-B33)/2)	=ACOS((M33*2+O33*2-Q33*2)/(2*M33*Q33))	=ACOS((N33*2+O33*2-R33*2)/(2*N33*Q33))	=ACOS((P33*2+O33*2-S33*2)/(2*P33*Q33))
32	=КОРЕНЫ((34-C34)*2+(H34-B34)/2)	=ACOS((M34*2+O34*2-Q34*2)/(2*M34*Q34))	=ACOS((N34*2+O34*2-R34*2)/(2*N34*Q34))	=ACOS((P34*2+O34*2-S34*2)/(2*P34*Q34))
33	=КОРЕНЫ((35-C35)*2+(H35-B35)/2)	=ACOS((M35*2+O35*2-Q35*2)/(2*M35*Q35))	=ACOS((N35*2+O35*2-R35*2)/(2*N35*Q35))	=ACOS((P35*2+O35*2-S35*2)/(2*P35*Q35))
34	=КОРЕНЫ((36-C36)*2+(H36-B36)/2)	=ACOS((M36*2+O36*2-Q36*2)/(2*M36*Q36))	=ACOS((N36*2+O36*2-R36*2)/(2*N36*Q36))	=ACOS((P36*2+O36*2-S36*2)/(2*P36*Q36))
35	=КОРЕНЫ((37-C37)*2+(H37-B37)/2)	=ACOS((M37*2+O37*2-Q37*2)/(2*M37*Q37))	=ACOS((N37*2+O37*2-R37*2)/(2*N37*Q37))	=ACOS((P37*2+O37*2-S37*2)/(2*P37*Q37))
36	=КОРЕНЫ((38-C38)*2+(H38-B38)/2)	=ACOS((M38*2+O38*2-Q38*2)/(2*M38*Q38))	=ACOS((N38*2+O38*2-R38*2)/(2*N38*Q38))	=ACOS((P38*2+O38*2-S38*2)/(2*P38*Q38))
37	=КОРЕНЫ((39-C39)*2+(H39-B39)/2)	=ACOS((M39*2+O39*2-Q39*2)/(2*M39*Q39))	=ACOS((N39*2+O39*2-R39*2)/(2*N39*Q39))	=ACOS((P39*2+O39*2-S39*2)/(2*P39*Q39))
38	=КОРЕНЫ((40-C40)*2+(H40-B40)/2)	=ACOS((M40*2+O40*2-Q40*2)/(2*M40*Q40))	=ACOS((N40*2+O40*2-R40*2)/(2*N40*Q40))	=ACOS((P40*2+O40*2-S40*2)/(2*P40*Q40))
39	=КОРЕНЫ((41-C41)*2+(H41-B41)/2)	=ACOS((M41*2+O41*2-Q41*2)/(2*M41*Q41))	=ACOS((N41*2+O41*2-R41*2)/(2*N41*Q41))	=ACOS((P41*2+O41*2-S41*2)/(2*P41*Q41))
40	=КОРЕНЫ((42-C42)*2+(H42-B42)/2)	=ACOS((M42*2+O42*2-Q42*2)/(2*M42*Q42))	=ACOS((N42*2+O42*2-R42*2)/(2*N42*Q42))	=ACOS((P42*2+O42*2-S42*2)/(2*P42*Q42))
41	=КОРЕНЫ((43-C43)*2+(H43-B43)/2)	=ACOS((M43*2+O43*2-Q43*2)/(2*M43*Q43))	=ACOS((N43*2+O43*2-R43*2)/(2*N43*Q43))	=ACOS((P43*2+O43*2-S43*2)/(2*P43*Q43))
42	=КОРЕНЫ((44-C44)*2+(H44-B44)/2)	=ACOS((M44*2+O44*2-Q44*2)/(2*M44*Q44))	=ACOS((N44*2+O44*2-R44*2)/(2*N44*Q44))	=ACOS((P44*2+O44*2-S44*2)/(2*P44*Q44))
43	=КОРЕНЫ((45-C45)*2+(H45-B45)/2)	=ACOS((M45*2+O45*2-Q45*2)/(2*M45*Q45))	=ACOS((N45*2+O45*2-R45*2)/(2*N45*Q45))	=ACOS((P45*2+O45*2-S45*2)/(2*P45*Q45))
44	=КОРЕНЫ((46-C46)*2+(H46-B46)/2)	=ACOS((M46*2+O46*2-Q46*2)/(2*M46*Q46))	=ACOS((N46*2+O46*2-R46*2)/(2*N46*Q46))	=ACOS((P46*2+O46*2-S46*2)/(2*P46*Q46))
45	=КОРЕНЫ((47-C47)*2+(H47-B47)/2)	=ACOS((M47*2+O47*2-Q47*2)/(2*M47*Q47))	=ACOS((N47*2+O47*2-R47*2)/(2*N47*Q47))	=ACOS((P47*2+O47*2-S47*2)/(2*P47*Q47))
46	=КОРЕНЫ((48-C48)*2+(H48-B48)/2)	=ACOS((M48*2+O48*2-Q48*2)/(2*M48*Q48))	=ACOS((N48*2+O48*2-R48*2)/(2*N48*Q48))	=ACOS((P48*2+O48*2-S48*2)/(2*P48*Q48))
47	=КОРЕНЫ((49-C49)*2+(H49-B49)/2)	=ACOS((M49*2+O49*2-Q49*2)/(2*M49*Q49))	=ACOS((N49*2+O49*2-R49*2)/(2*N49*Q49))	=ACOS((P49*2+O49*2-S49*2)/(2*P49*Q49))
48	=КОРЕНЫ((50-C50)*2+(H50-B50)/2)	1.23449750089376	=ACOS((N50*2+O50*2-R50*2)/(2*N50*Q50))	=ACOS((P50*2+O50*2-S50*2)/(2*P50*Q50))
49	=КОРЕНЫ((51-C51)*2+(H51-B51)/2)	=ACOS((M51*2+O51*2-Q51*2)/(2*M51*Q51))	=ACOS((N51*2+O51*2-R51*2)/(2*N51*Q51))	=ACOS((P51*2+O51*2-S51*2)/(2*P51*Q51))
50	=КОРЕНЫ((52-C52)*2+(H52-B52)/2)	=ACOS((M52*2+O52*2-Q52*2)/(2*M52*Q52))	=ACOS((N52*2+O52*2-R52*2)/(2*N52*Q52))	=ACOS((P52*2+O52*2-S52*2)/(2*P52*Q52))
51	=КОРЕНЫ((53-C53)*2+(H53-B53)/2)	=ACOS((M53*2+O53*2-Q53*2)/(2*M53*Q53))	=ACOS((N53*2+O53*2-R53*2)/(2*N53*Q53))	=ACOS((P53*2+O53*2-S53*2)/(2*P53*Q53))
52	=КОРЕНЫ((54-C54)*2+(H54-B54)/2)	=ACOS((M54*2+O54*2-Q54*2)/(2*M54*Q54))	=ACOS((N54*2+O54*2-R54*2)/(2*N54*Q54))	=ACOS((P54*2+O54*2-S54*2)/(2*P54*Q54))
53	=КОРЕНЫ((55-C55)*2+(H55-B55)/2)	=ACOS((M55*2+O55*2-Q55*2)/(2*M55*Q55))	=ACOS((N55*2+O55*2-R55*2)/(2*N55*Q55))	=ACOS((P55*2+O55*2-S55*2)/(2*P55*Q55))
54	=КОРЕНЫ((56-C56)*2+(H56-B56)/2)	=ACOS((M56*2+O56*2-Q56*2)/(2*M56*Q56))	=ACOS((N56*2+O56*2-R56*2)/(2*N56*Q56))	=ACOS((P56*2+O56*2-S56*2)/(2*P56*Q56))
55	=КОРЕНЫ((57-C57)*2+(H57-B57)/2)	1.100560893972	=ACOS((N57*2+O57*2-R57*2)/(2*N57*Q57))	=ACOS((P57*2+O57*2-S57*2)/(2*P57*Q57))
56	=КОРЕНЫ((58-C58)*2+(H58-B58)/2)	=ACOS((M58*2+O58*2-Q58*2)/(2*M58*Q58))	=ACOS((N58*2+O58*2-R58*2)/(2*N58*Q58))	=ACOS((P58*2+O58*2-S58*2)/(2*P58*Q58))
57	=КОРЕНЫ((59-C59)*2+(H59-B59)/2)	=ACOS((M59*2+O59*2-Q59*2)/(2*M59*Q59))	=ACOS((N59*2+O59*2-R59*2)/(2*N59*Q59))	=ACOS((P59*2+O59*2-S59*2)/(2*P59*Q59))
58	=КОРЕНЫ((60-C60)*2+(H60-B60)/2)	=ACOS((M60*2+O60*2-Q60*2)/(2*M60*Q60))	=ACOS((N60*2+O60*2-R60*2)/(2*N60*Q60))	=ACOS((P60*2+O60*2-S60*2)/(2*P60*Q60))
59	=КОРЕНЫ((61-C61)*2+(H61-B61)/2)	=ACOS((M61*2+O61*2-Q61*2)/(2*M61*Q61))	=ACOS((N61*2+O61*2-R61*2)/(2*N61*Q61))	=ACOS((P61*2+O61*2-S61*2)/(2*P61*Q61))
60	=КОРЕНЫ((62-C62)*2+(H62-B62)/2)	=ACOS((M62*2+O62*2-Q62*2)/(2*M62*Q62))	=ACOS((N62*2+O62*2-R62*2)/(2*N62*Q62))	=ACOS((P62*2+O62*2-S62*2)/(2*P62*Q62))
61	=КОРЕНЫ((63-C63)*2+(H63-B63)/2)	=ACOS((M63*2+O63*2-Q63*2)/(2*M63*Q63))	=ACOS((N63*2+O63*2-R63*2)/(2*N63*Q63))	=ACOS((P63*2+O63*2-S63*2)/(2*P63*Q63))
62	=КОРЕНЫ((64-C64)*2+(H64-B64)/2)	1.25818490212883	=ACOS((N64*2+O64*2-R64*2)/(2*N64*Q64))	=ACOS((P64*2+O64*2-S64*2)/(2*P64*Q64))
63	=КОРЕНЫ((65-C65)*2+(H65-B65)/2)	=ACOS((M65*2+O65*2-Q65*2)/(2*M65*Q65))	=ACOS((N65*2+O65*2-R65*2)/(2*N65*Q65))	=ACOS((P65*2+O65*2-S65*2)/(2*P65*Q65))
64	=КОРЕНЫ((66-C66)*2+(H66-B66)/2)	=ACOS((M66*2+O66*2-Q66*2)/(2*M66*Q66))	=ACOS((N66*2+O66*2-R66*2)/(2*N66*Q66))	=ACOS((P66*2+O66*2-S66*2)/(2*P66*Q66))
65	=КОРЕНЫ((67-C67)*2+(H67-B67)/2)	=ACOS((M67*2+O67*2-Q67*2)/(2*M67*Q67))	=ACOS((N67*2+O67*2-R67*2)/(2*N67*Q67))	=ACOS((P67*2+O67*2-S67*2)/(2*P67*Q67))
66	=КОРЕНЫ((68-C68)*2+(H68-B68)/2)	=ACOS((M68*2+O68*2-Q68*2)/(2*M68*Q68))	=ACOS((N68*2+O68*2-R68*2)/(2*N68*Q68))	=ACOS((P68*2+O68*2-S68*2)/(2*P68*Q68))
67	=КОРЕНЫ((69-C69)*2+(H69-B69)/2)	=ACOS((M69*2+O69*2-Q69*2)/(2*M69*Q69))	=ACOS((N69*2+O69*2-R69*2)/(2*N69*Q69))	=ACOS((P69*2+O69*2-S69*2)/(2*P69*Q69))
68	=КОРЕНЫ((70-C70)*2+(H70-B70)/2)	=ACOS((M70*2+O70*2-Q70*2)/(2*M70*Q70))	=ACOS((N70*2+O70*2-R70*2)/(2*N70*Q70))	=ACOS((P70*2+O70*2-S70*2)/(2*P70*Q70))
69	=КОРЕНЫ((71-C71)*2+(H71-B71)/2)	=ACOS((M71*2+O71*2-Q71*2)/(2*M71*Q71))	=ACOS((N71*2+O71*2-R71*2)/(2*N71*Q71))	=ACOS((P71*2+O71*2-S71*2)/(2*P71*Q71))
70	=КОРЕНЫ((72-C72)*2+(H72-B72)/2)	=ACOS((M72*2+O72*2-Q72*2)/(2*M72*Q72))	=ACOS((N72*2+O72*2-R72*2)/(2*N72*Q72))	=ACOS((P72*2+O72*2-S72*2)/(2*P72*Q72))
71	=КОРЕНЫ((73-C73)*2+(H73-B73)/2)	=ACOS((M73*2+O73*2-Q73*2)/(2*M73*Q73))	=ACOS((N73*2+O73*2-R73*2)/(2*N73*Q73))	=ACOS((P73*2+O73*2-S73*2)/(2*P73*Q73))
72	=КОРЕНЫ((74-C74)*2+(H74-B74)/2)	=ACOS((M74*2+O74*2-Q74*2)/(2*M74*Q74))	=ACOS((N74*2+O74*2-R74*2)/(2*N74*Q74))	=ACOS((P74*2+O74*2-S74*2)/(2*P74*Q74))
73	=КОРЕНЫ((75-C75)*2+(H75-B75)/2)	=ACOS((M75*2+O75*2-Q75*2)/(2*M75*Q75))	=ACOS((N75*2+O75*2-R75*2)/(2*N75*Q75))	=ACOS((P75*2+O75*2-S75*2)/(2*P75*Q75))
74	=КОРЕНЫ((76-C76)*2+(H76-B76)/2)	=ACOS((M76*2+O76*2-Q76*2)/(2*M76*Q76))	=ACOS((N76*2+O76*2-R76*2)/(2*N76*Q76))	=ACOS((P76*2+O76*2-S76*2)/(2*P76*Q76))
75	=КОРЕНЫ((77-C77)*2+(H77-B77)/2)	=ACOS((M77*2+O77*2-Q77*2)/(2*M77*Q77))	=ACOS((N77*2+O77*2-R77*2)/(2*N77*Q77))	=ACOS((P77*2+O77*2-S77*2)/(2*P77*Q77))
76	=КОРЕНЫ((78-C78)*2+(H78-B78)/2)	=ACOS((M78*2+O78*2-Q78*2)/(2*M78*Q78))	=ACOS((N78*2+O78*2-R78*2)/(2*N78*Q78))	=ACOS((P78*2+O78*2-S78*2)/(2*P78*Q78))
77	=КОРЕНЫ((79-C79)*2+(H79-B79)/2)	=ACOS((M79*2+O79*2-Q79*2)/(2*M79*Q79))	=ACOS((N79*2+O79*2-R79*2)/(2*N79*Q79))	=ACOS((P79*2+O79*2-S79*2)/(2*P79*Q79))
78	=КОРЕНЫ((80-C80)*2+(H80-B80)/2)	=ACOS((M80*2+O80*2-Q80*2)/(2*M80*Q80))	=ACOS((N80*2+O80*2-R80*2)/(2*N80*Q80))	=ACOS((P80*2+O80*2-S80*2)/(2*P80*Q80))
79	=КОРЕНЫ((81-C81)*2+(H81-B81)/2)	=ACOS((M81*2+O81*2-Q81*2)/(2*M81*Q81))	=ACOS((N81*2+O81*2-R81*2)/(2*N81*Q81))	=ACOS((P81*2+O81*2-S81*2)/(2*P81*Q81))
80	=КОРЕНЫ((82-C82)*2+(H82-B82)/2)	=ACOS((M82*2+O82*2-Q82*2)/(2*M82*Q82))	=ACOS((N82*2+O82*2-R82*2)/(2*N82*Q82))	=ACOS((P82*2+O82*2-S82*2)/(2*P82*Q82))
81	=КОРЕНЫ((83-C83)*2+(H83-B83)/2)	=ACOS((M83*2+O83*2-Q83*2)/(2*M83*Q83))	=ACOS((N83*2+O83*2-R83*2)/(2*N83*Q83))	=ACOS((P83*2+O83*2-S83*2)/(2*P83*Q83))
82	=КОРЕНЫ((84-C84)*2+(H84-B84)/2)	=ACOS((M84*2+O84*2-Q84*2)/(2*M84*Q84))	=ACOS((N84*2+O84*2-R84*2)/(2*N84*Q84))	=ACOS((P84*2+O84*2-S84*2)/(2*P84*Q84))
83	=КОРЕНЫ((85-C85)*2+(H85-B85)/2)	=ACOS((M85*2+O85*2-Q85*2)/(2*M85*Q85))	=ACOS((N85*2+O85*2-R85*2)/(2*N85*Q85))	=ACOS((P85*2+O85*2-S85*2)/(2*P85*Q85))
84	=КОРЕНЫ((86-C86)*2+(H86-B86)/2)	=ACOS((M86*2+O86*2-Q86*2)/(2*M86*Q86))	=ACOS((N86*2+O86*2-R86*2)/(2*N86*Q86))	=ACOS((P86*2+O86*2-S86*2)/(2*P86*Q86))
85	=КОРЕНЫ((87-C87)*2+(H87-B87)/2)	=ACOS((M87*2+O87*2-Q87*2)/(2*M87*Q87))	=ACOS((N87*2+O87*2-R87*2)/(2*N87*Q87))	=ACOS((P87*2+O87*2-S87*2)/(2*P87*Q87))
86	=КОРЕНЫ((88-C88)*2+(H88-B88)/2)	=ACOS((M88*2+O88*2-Q88*2)/(2*M88*Q88))	=ACOS((N88*2+O88*2-R88*2)/(2*N88*Q88))	=ACOS((P88*2+O88*2-S88*2)/(2*P88*Q88))
87	=КОРЕНЫ((89-C89)*2+(H89-B89)/2)	=ACOS((M89*2+O89*2-Q89*2)/(2*M89*Q89))	=ACOS((N89*2+O89*2-R89*2)/(2*N89*Q89))	=ACOS((P89*2+O89*2-S89*2)/(2*P89*Q89))
88	=КОРЕНЫ((90-C90)*2+(H90-B90)/2)	=ACOS((M90*2+O90*2-Q90*2)/(2*M90*Q90))	=ACOS((N90*2+O90*2-R90*2)/(2*N90*Q90))	=ACOS((P90*2+O90*2-S90*2)/(2*P90*Q90))
89	=КОРЕНЫ((91-C91)*2+(H91-B91)/2)	=ACOS((M91*2+O91*2-Q91*2)/(2*M91*Q91))	=ACOS((N91*2+O91*2-R91*2)/(2*N91*Q91))	=ACOS((P91*2+O91*2-S9

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Справка по внедрению результатов диссертационной работы в учебный
процесс

Затверджую:
Перший проректор Донбаської
державної машинобудівної академії

А.М. Фесенко

« » _____ 2015 р.

ДОВІДКА ПРО ВИКОРИСТАННЯ

Матеріали дисертаційної роботи, виконаної аспірантом кафедри «Обробка металів тиском» Шкірою Олексієм Віталійовичем на тему «Удосконалення технологічних процесів штампування деталей з фланцем на основі нових способів комбінованого видавлювання», що містять:

- математичні залежності силових параметрів для процесів комбінованого тристороннього видавлювання;
- рекомендації щодо використання технологічних схем комбінованого тристороннього видавлювання при виготовленні якісних деталей типу стрижня та втулки з фланцем;
- рекомендації щодо проектування інструменту та технологічного процесу штампування деталей типу втулок з фланцем,

використовуються на кафедрі «Обробка металів тиском» Донбаської державної машинобудівної академії в рамках викладання наступних спеціальних дисциплін: «Теорія процесів кування та штампування»: Модуль 1 – Технологічні схеми процесів холодного об'ємного штампування (лекційні матеріали та практична робота (модуль 1)), а також при виконанні курсових і дипломних проектів студентами та магістрами спеціальності «Обробка металів тиском».

Завідуючий кафедрою
«Обробка металів тиском»,
д.т.н., проф.



I.S. Aliev

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Акт по внедрению результатов диссертационной работы

Україна		(02.02.079-210)
МОТОР СІЧ		МОТОР СІЧ
69068, м. Запоріжжя, пр. Моторобудівників, 15 Факс: (061) 720-50-00 E-mail: motor@motorsich.com www.motorsich.com		69068, г. Запорожье, пр. Моторостроителей, 15 Факс: (061) 720-50-00 E-mail: motor@motorsich.com www.motorsich.com
На № <u>22.04.15 № УГТ-12/11-10238</u>		
		«Затверджую» Технічний директор, к.т.н. П.Д. Жеманюк

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Комісія у складі: головного технолога, к.т.н. Мозгового В.Ф. і зас. начальника управління головного технолога, д.т.н., проф. Качана О.Я. складала цей акт в тім, що за науково-технічними дослідженнями під керівництвом докторанта кафедри «Обробка металів тиском» Донбаської державної машинобудівної академії Алієвої Л.І. впроваджено на АТ «Мотор Січ» наступні результати:

- рекомендації з розробки штампового оснащення на основі використання схем деформування комбінованим та поперечним видавлюванням в роз'ємних матрицях;
- способи деформування деталей із використанням схем комбінованої течії і складної кінематики руху інструменту;
- методики розрахунку силових режимів процесів деформування комбінованим видавлюванням деталей в роз'ємних матрицях, що дозволяють розрахувати питоме навантаження на інструмент та розрахувати його стійкість;
- методики розрахунку граничного формоутворення на основі оцінки ресурсу пластичності в процесах комбінованого деформування,
- методи оцінки рівня сил контактної тертя в процесах пластичного деформування, які дозволили встановити ефективність технологічного змащення.

Нові технологічні рекомендації забезпечують розширення номенклатури деталей, зменшення величини припусків на розміри деталей за рахунок підвищення їх точності.

Це в цілому дозволило знизити матеріальні витрати на виробництво поковок на 10–15 %.

Реальний економічний ефект становив 500 тис. грн. за рівнем цін 2015 року. Очікуваний економічний ефект від впровадження складає 1300 тис. грн. за рівнем цін на 2015 рік.

Акт призначений для спеціалізованих вчених рад з захисту докторських та кандидатських дисертацій та не є основою для висунення фінансових вимог.

Розрахунок економічного ефекту не наводиться, так як містить елементи комерційної таємниці АТ «Мотор Січ».

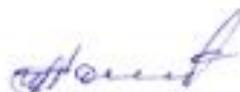
Головний технолог, к.т.н.



В.Ф. Мозговой

Зас. начальника

Управління Головного технолога,
д.т.н., проф.



О.Я. Качан

