

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ПРЕССОВЫХ ОПЕРАЦИЙ

Монография

Рекомендовано к изданию ученым советом федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Оренбург
2019

УДК 621.77+681.5
ББК 34.62+32.965
К 65

Рецензент – доктор технических наук, профессор А.Н. Поляков

К 65 Конструкторско-технологическая подготовка прессовых операций :
монография / А.И. Сергеев, А.И. Сердюк, А.В. Щеголев, М.В. Овечкин,
А.С. Русяев, Л.В. Галина; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2019.
– 165 с.
ISBN

В монографии представлены результаты исследований по теме конструкторско-технологической подготовки прессовых операций. Описана модель оценки эффективности жизненного цикла наукоемких изделий, проведен анализ литературы и САПР по проблемной области. Представлено проектирование полуфабриката на основе геометрии изделия, описаны обеспечения САПР. Выполнено эксплуатационно-техническое проектирование.

Материалы исследования будут полезны для предприятий (организаций, фирм, компаний), заинтересованных в повышении эффективности конструкторско-технологической подготовки прессовых операций, а также эффективном управлении информационной поддержкой наукоемких изделий. Рекомендованы для студентов, аспирантов, обучающихся на технических специальностях, а также инженерно-технических работников.

УДК 621.77+681.5
ББК 34.62+32.965

© Сергеев А.И.,
Сердюк А.И.,
Щеголев А.В.,
Овечкин М.В.,
Русяев А.С.,
Галина Л.В., 2019
© ОГУ, 2019

ISBN

Содержание

Введение	5
1 Разработка модели оценки эффективности жизненного цикла наукоемких изделий	6
1.1 Анализ литературы по проблемной области	10
1.2 Анализ систем в области автоматизированного проектирования вытяжного инструмента	13
2 Проектирование полуфабриката на основе геометрии изделия.....	32
2.1 Общий подход и технологии проектирования.....	32
2.2 Нахождение объемов тел вращения	41
2.3 Проверка вычисления объема тестового образца «Изделие_A1».....	56
2.4 Автоматизация процесса профилирования пуансонов вытяжки с утонением .	60
2.5 Моделирование процессов автоматизированного проектирования инструментов холодного выдавливания.....	70
3 Разработка обеспечений САПР.....	73
3.1 Методическое обеспечение	73
3.2 Информационное обеспечение	78
3.3 Особенности холодных прессовых операций	81
3.4 Проектирование операций вырубки.....	86
3.5 Эксплуатационно-техническое проектирование	93
3.6 Расчёт параметров оптимальной укладки круглой заготовки на операции вырубки из прямоугольного листа	99
4 UML-диаграмма классов программы расчета вытяжного инструмента цилиндрических изделий.....	108
4.1 Математическая постановка задачи	108
4.2 Проектирование программного средства	112
5 Автоматизация расчета инструмента заключительной вытяжки с утонением цельнотянутых цилиндрических изделий.....	115

6 Программный модуль автоматизированного проектирования процесса обжима полых цилиндрических деталей	121
6.1 Постановка задачи проектирования операций холодного обжима	122
6.2 Программное обеспечение автоматизированного проектирования процесса обжима.....	124
Список использованных источников	132
Приложение А (справочное) Код основных процедур.....	138

Введение

Широкое применение технологических процессов изготовления цилиндрических цельнотянутых изделий с фигурной, сферической и плоской донной частью методом глубокой вытяжки из листового проката обусловлено рядом следующих факторов:

- обширная номенклатура производимых изделий от предметов бытового применения до изделий промышленного назначения, испытывающих высокие давления и скорости деформаций;
- высокая износостойкость оборудования и технологического инструмента;
- необходимая точность, экономичность и сравнительно небольшая станкостоемость изготовления изделий и технологического инструмента;
- высокий коэффициент использования металла [1].

В рамках поставленной Президентом задачи по диверсификации производства предприятиями оборонно-промышленного комплекса [42] актуальна задача оценки эффективности жизненного цикла наукоемкой продукции, в состав которой входят изделия прессового производства [15, 14]. Процессы холодной обработки металлов давлением, к которым относится глубокая вытяжка, позволяют не только осуществлять формообразование изделий с заданной точностью, но и получать за счёт деформационного упрочнения высокие прочностные характеристики [23]. Это позволяет изготавливать изделия значительно меньшей массы.

Монография выполнена при финансовой поддержке Правительства Оренбургской области в рамках проекта № 37 от 14.08.2019 г. «Внедрение в хозяйственный оборот машиностроительных предприятий Оренбургской области методологии конструкторско-технологической подготовки прессовых операций».

1 Разработка модели оценки эффективности жизненного цикла наукоемких изделий

Сегодня повсеместная компьютеризация деятельности проектных организаций поднимает проектную работу на качественно новый уровень, при котором резко повышаются темы и качество проектирования, более обоснованно решаются многие сложные инженерные задачи, которые раньше рассматривались лишь упрощенно. Всё это происходит, главным образом, благодаря использованию высокоэффективных специализированных САПР. Мировой опыт развития САПР показывает, что настоящими средствами автоматизации проектно-конструкторских работ являются именно специализированные САПР, а не универсальные графические пакеты, которые так и остались до настоящего времени по своей сути «электронными кульманами» [17].

В сфере автоматизации проектирования рынок поделен между такими универсальными продуктами как AutoCAD, SolidWorks, NX, Creo Elements, CATIA, КОМПАС, T-Flex. Однако, рынок специализированных САПР, которые предназначены для применения в узкоспециализированных отраслях остается довольно широким.

В работе [13] отмечается две основные причины:

- высокая стоимость приобретения САПР и высокая стоимость обучения сотрудников, умеющих применять весь заложенный в таких системах функционал;
- отсутствие адаптации для проектирования специфичных для узкоспециализированных отраслей изделий в универсальной САПР приводит к снижению скорости проектирования.

Решением отмеченных проблем является разработка специализированных САПР, которая может вестись по двум направлениям. Первое – разработка прикладной библиотеки или исполняемого приложения с применением прикладного программного интерфейса (API – application programming interface) или других средств расширения функциональных возможностей САПР. Достоинством такого подхода является относительно невысокая стоимость разработанного модуля и возможность

получения электронных проектных документов в формате, используемой в организации САПР, что позволяет легко интегрироваться в единую информационную инфраструктуру. Недостаток, заключается в том, что в случае отсутствия на предприятии «базовой» САПР, для которой разрабатывается таким образом подсистема, затраты резко возрастают.

Второе направление – разработка собственной системы проектирования. В этом случае будет создана САПР, которая предназначена для решения конкретных узкоспециализированных областей с максимальной эффективностью. Естественно, создание подобной САПР является очень затратным по времени и финансам. В ходе реализации такого проекта потребуется разработка сложных алгоритмов геометрического моделирования, как правило, трехмерных объектов. Однако, существуют стандартные библиотеки (геометрические ядра) сторонних разработчиков, которые могут помочь в решении этой задачи [17].

Универсальные САПР, даже в какой-то конкретной области, например, машиностроение, строительство, электрика, позволяют в большинстве случаев создавать конструкции, пусть даже очень сложные, но уже рассчитанные ранее.

К специализированным областям можно отнести проектирование прессовых операций, которые выгодно отличаются от обработки металлов резанием высокой производительностью и экономичностью, что обуславливает их повсеместное распространение.

Одной из основных характеристик, оказывающих значительное влияние на процессы обработки металлов давлением, является степень деформации. Для разных операций степень деформации рассчитывается по разному: в случае растяжения или сжатия стержня как отношение длин до и после операции, в операциях вытяжки – как отношение площади кольца полуфабриката до вытяжки к площади полученного кольца после вытяжки. Известно, что назначение высокой степени деформации может привести к дефектам или разрушению полуфабрикатов или изделия. Снижение степени деформации приводит к тому, что приходится вводить дополнительные технологические операции. Ошибки в назначении размеров штампового инструмента могут привести к катастрофическим последствиям.

Рассмотрим пример. Пусть необходимо выполнить две операции вытяжки с утонением. Диаметры пуансонов и матриц соответствующих вытяжек приведены в таблице.

Таблица 1 – Размеры штампового инструмента, в миллиметрах

Диаметр матрицы первой вытяжки с утонением, D_m^1	Диаметр пуансона первой вытяжки с утонением, d_p^1	Диаметр матрицы второй вытяжки с утонением, D_m^2	Диаметр пуансона второй вытяжки с утонением, d_p^2
181	173	175	170

Определим степень деформации второй вытяжки с утонением

$$K = 1 - \frac{S_2}{S_1} \cdot 100, \quad (1)$$

где S_1 , S_2 – площадь кольца полуфабриката после первой и второй вытяжек, соответственно, мм^2 .

$$S_1 = \pi \left(\frac{D_m^1}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_p^1}{2} \right)^2 = \pi \left(\frac{181}{2} \right)^2 - \left(\frac{173}{2} \right)^2 = 2224,25 \text{ мм}^2. \quad (2)$$

$$S_2 = \pi \left(\frac{D_m^2}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_p^2}{2} \right)^2 = \pi \left(\frac{175}{2} \right)^2 - \left(\frac{170}{2} \right)^2 = 1354,81 \text{ мм}^2. \quad (3)$$

Тогда степень деформации составит

$$K = 1 - \frac{1354,81}{2224,25} \cdot 100 = 39,01 \text{ \%}.$$

Проанализируем как изменится степень деформации при уменьшении диаметра матрицы второй вытяжки с утонением на 1 мм и составит $D_m^3 = 174 \text{ мм}$.

$$S_3 = \pi \frac{D_m^2}{2} - \frac{d_p^2}{2} = \pi \frac{174^2}{2} - \frac{170^2}{2} = 1080,71 \text{ мм}^2.$$

Определим степень деформации

$$K' = 1 - \frac{1080,71}{2224,25} \cdot 100 = 51,41 \text{ \%}.$$

Определим процент изменения степени деформации относительно K

$$\Delta K = \frac{K' - K}{K} \cdot 100 = \frac{51,41 - 39,01}{39,01} \cdot 100 = 31,52 \text{ \%}. \quad (4)$$

Определим процент ошибки расчета в 1 мм относительно D_m^2 .

$$\Delta D_m = \frac{D_m^2 - D_m^3}{D_m^2} \cdot 100 = \frac{175 - 174}{175} \cdot 100 = 0,57 \text{ \%}. \quad (5)$$

Приведенный пример наглядно демонстрирует, что ошибка при назначении размера матрицы второй вытяжки с утонением в 0,57 % приводит к увеличению степени деформации более чем на 30 % в относительном выражении и более чем на 20 % в абсолютном выражении, что неизбежно приведет к разрушению полуфабриката.

Помимо приведённого примера существуют и другие задачи, незначительные, на первый взгляд ошибки решения которых, приводят к существенным материальным и временным затратам подготовки прессовых операций. К таким задачам относятся определение формы штампового инструмента, назначение зазоров на вхождение пуансона, расчет количества операций и другие.

Решение отмеченных задач возможно только с помощью разработки, именно, специализированных подсистем автоматизации проектирования прессовых операций, позволяющих на основе проверенных математических зависимостей и отлаженных алгоритмов оптимизации получать трехмерные модели штампового ин-

струмента. Применение специализированных систем инженерного анализа процессов обработки металлов давлением позволяет выполнить виртуальную проверку результатов, полученных в специализированной подсистеме САПР.

Далее представлен анализ литературных источников и систем в области автоматизированного проектирования вытяжного инструмента.

1.1 Анализ литературы по проблемной области

1.1.1 Анализ периодических изданий

В работе Л.Д. Оленина [30] изложена концепция безотходной технологии производства точных заготовок, в том числе под холодное выдавливание, основа которой - безотходное разделение проката хрупким сколом в сочетании с однопереходной осадкой или высадкой головок увеличенного объема, приведены сведения о разработках и достижениях в этой области. На основе опыта освоения холодного выдавливания изделий автостроения сформулированы минимально необходимые требования к заготовкам для последующего холодного выдавливания изделий сложной формы с глубокими полостями.

Напряжения на торцевой поверхности пуансона при холодном выдавливании детали типа стакана на основе моделирования подынтегральных уравнений регрессии определены в исследованиях, проведенных А.М. Дмитриевым [5]. Сравнение результатов данного процесса при реактивном и активном действиях сил трения в контакте заготовки и матрицы показало, что стойкость пуансонов в последнем случае больше в 1,5 раза.

В работе [6] А.М. Дмитриевым приведено аналитическое исследование напряжения в опасном сечении пуансона, выдавливающего ступенчатую полость цилиндрической детали. Установлено, что стойкость пуансонов при выдавливании с активно направленными силами контактного трения увеличивается примерно в 1,5 раза.

В статье Т.В. Поповой [33] рассматриваются факторы, влияющие на эффективность технологических смазок при холодной штамповке. В данной работе это геометрические параметры заготовки и степень ее деформирования. Эти факторы выбраны как наиболее оптимальные, на основе литературных источников. Также рассмотрены условия применения смазки для наиболее эффективной деформации.

Исследования В.Б. Мамаева [21] посвящены влиянию сил контактного трения при объемной штамповке. Показана необходимость определения коэффициента трения с учетом особенностей технологических операций и условий в особых зонах штампуемой заготовки.

На основе полученных экспериментальных данных, указанных в работе [9] по упрочнению стальных заготовок при холодной объемной штамповке осуществлен выбор технологических параметров процесса, позволивших обеспечить заданный комплекс механических характеристик, включающий в себя одновременно высокие показатели прочности и пластичности.

1.1.2 Анализ учебных изданий

В книге И.Л. Константинова [16] изложена технологияковки и горячей объемной штамповки металлов и сплавов. Последовательно рассмотрены вопросы об исходных материалах и режимахковки и штамповки; приведены операцииковки, входящие в технологический процессковки на молотах и прессах; описаны процессы штамповки в открытых и закрытых штампах на молотах, кривошипных горячештамповочных прессах, гидравлических прессах, винтовых прессах и на горизонтально-ковочных машинах. Кроме того, рассмотрены процессы получения поковок и заготовок на специализированных машинах, отделочные операции, контроль поковок и перспективы развития кузнечно-штамповочного производства.

В справочнике [12] даны сведения по объемной холодной штамповке на прессах и холодно-высадочных автоматах, холодному деформированию изделий из металлических порошковых материалов. Приведены методики расчета и конструиро-

вания штампов для объемной штамповки, выполняемой на кривошипных и гидравлических прессах, а также на основании единого метода определения деформирующих сил давлений на стенки штампов приведены расчетные зависимости, примеры расчетов для регулирования и оптимизации течения металла в условиях штамповки выдавливанием. Рассмотрены специализированные процессы и оборудование, даны рекомендации по выбору смазок.

В учебном пособии «Основы проектирования технологий листовой штамповки»[43]рассматриваются основы проектирования технологических процессов изготовления деталей посредством холодной листовой штамповки. Подробно излагается методология разработки технологических процессов в условиях единичного, серийного и массового производства листоштамповочных изделий. Приводятся практические рекомендации по проектированию схемы технологического процесса, конструированию штамповой оснастки, выбору материалов для изготовления деталей штампов.

В учебном пособии С.А. Медведевой [22] рассмотрены сущность, организация и планирование технической подготовки производства, функционирующего в современных условиях рыночной экономики. Изложены содержание и стадии подготовки к производству нового продукта, основные нормы и нормативы производственной деятельности, сущность и значение производственной мощности, раскрыт процесс планирования научно-технической и организационной деятельности предприятия.

Системное описание принципов работы с программным комплексом DEFORM-3D, направленным на проведение конечно-элементного анализа различных процессов металлообработки приведено в работе коллектива авторов [31]. Пособие затрагивает вопросы создания инструмента и заготовки, их разбиения конечными элементами, назначения механических свойств, граничных условий, управления работы процессора. Приведены примеры решения задач с применением программного комплекса.

1.2 Анализ систем в области автоматизированного проектирования вытяжного инструмента

1.2.1 КОМПАС Пресс-формы 3D [35]

Система Пресс-формы 3D предназначена для автоматизации проектно-конструкторских и технологических работ проектирования пресс-форм для литья изделий под давлением из пластмассы, и формирования комплекта технической документации, необходимой для выпуска пресс-формы (рисунок 1).

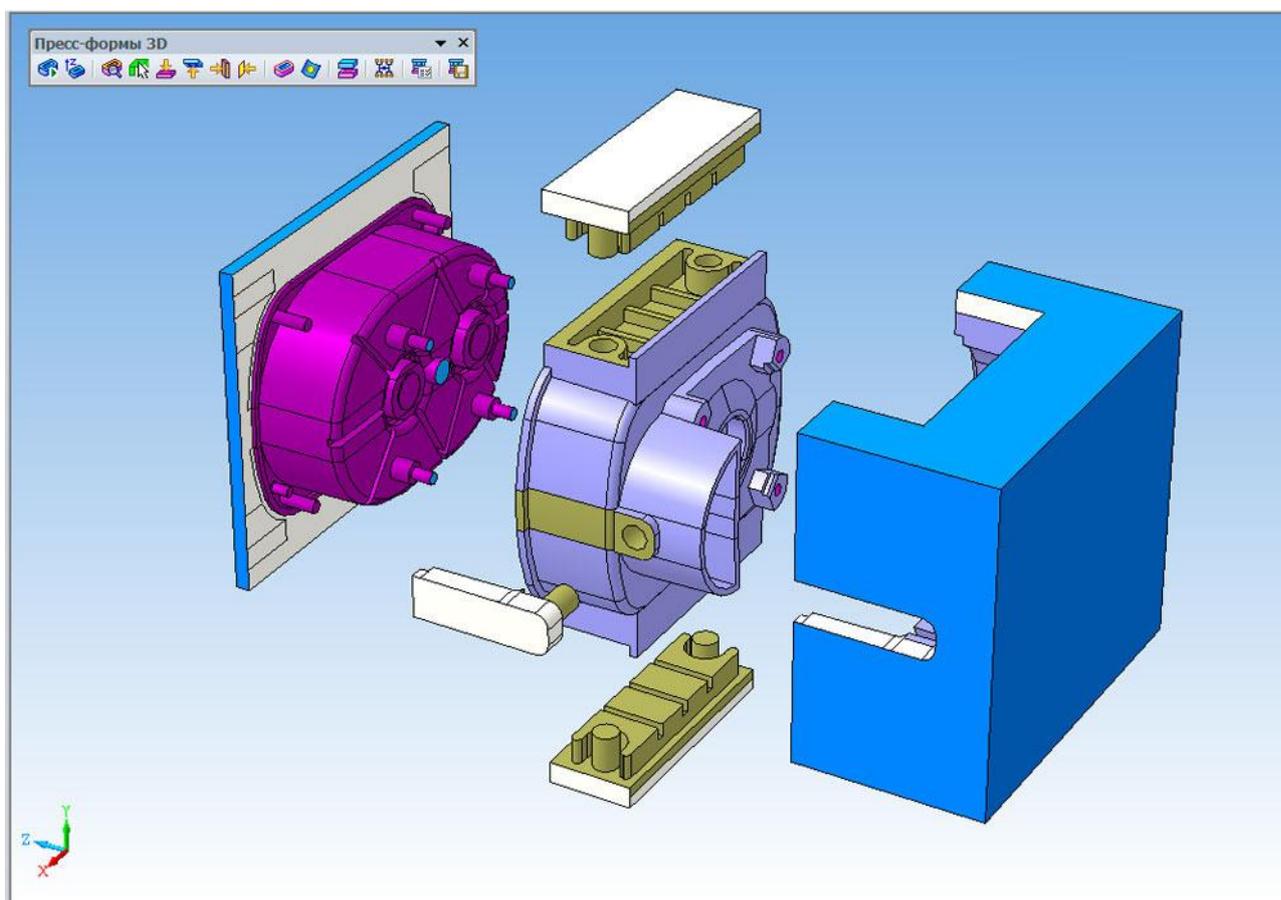


Рисунок 1 - Система Пресс-формы 3D

В системе использован более чем десятилетний опыт, приобретенный при разработке и эксплуатации систем Форма-П и КОМПАС-ФОРМА.

Система обеспечивает:

- анализ 3D-модели детали и проектирование формообразующих элементов пресс-формы;
- проектирование пакета пресс-формы в автоматическом или интерактивном режиме;
- контроль конструктивной допустимости деталей пресс-формы как необходимое условие работоспособности пресс-формы;
- автоматическое формирование в соответствии с ЕСКД комплекта документации, необходимой для выпуска пресс-формы (3D-моделей, сборочных чертежей, спецификаций, детализовок).

Система содержит:

- базу данных оборудования, которая включает более 60 модели термопластавтоматов;
- базу знаний конструкций пресс-форм с возможностью ее расширения с учетом дополнительных требований пользователя;
- параметрические библиотеки чертежей конструктивных элементов пресс-форм.

Система позволяет:

- Проектировать пресс-формы конструкций «съём толкателями», «съём плитой» и их комбинации.
- проектировать пресс-формы с одной или двумя параллельными плоскостями раскрытия;
- проектировать пресс-формы с боковым разъемом (ползунами);
- проектировать пресс-формы с «типичным» или «колонка-крепление» способом центрирования подвижной и неподвижной частей;
- изменять конструкции и конструктивные особенности элементов пресс-формы с целью полной адаптации технологии изготовления и возможностей инструментального производства.

Пресс-формы 3D – это средство повышения производительности труда конструкторов оснастки, повышения качества проектирования и, как следствие, повышения конкурентоспособности продукции предприятия.

1.2.2 Комплекс AutoCAD Inventor Tooling Suite [48]

Комплекс AutoCAD Inventor Tooling Suite включает в себя все функциональные возможности AutoCAD Inventor Suite и содержит дополнительный функционал для проектирования литейных форм и инструментальной оснастки.

AutoCAD Inventor Tooling Suite помогает автоматизировать ключевые процессы проектирования пресс-форм для изготовления пластмассовых изделий. Следовательно, можно быстро создавать и проверять пресс-формы, избегая при этом ошибок и повышая производительность.

Программа позволяет существенно упростить процесс проектирования пресс-форм для изготовления изделий из пластмассы. Тесная взаимосвязь с цифровой моделью Inventor гарантирует, что все внесенные в нее изменения автоматически отражаются на чертеже. Inventor автоматизирует целый ряд сложных операций, например, заливку отверстий и формирование поверхности разделения. В результате повышается качество продукции и ускоряется ее выпуск на рынок.

Разработчик получает доступ к обширной информации о свойствах материалов, воспользовавшись базой данных Moldflow, которая содержит сведения о пресс-формах для изготовления изделий из пластмассы. Программа позволяет интерактивно устанавливать направление разъема. Размеры разрабатываемой детали предлагаются по умолчанию, но настройки легко редактируются. Любая информация, внесенная в модель детали, учитывается в процессе проектирования форм.

1.2.3 Автоматизированное проектирование матриц и пуансонов

Проектирование матриц и пуансонов с помощью традиционных средств САПР отнимает много времени, однако функциональные возможности Inventor помогают ускорить этот процесс и снизить потребность в доработке. Благодаря Inventor можно разделить обрабатываемую деталь, чтобы затем сформировать матрицу и пуансон на основе заданной поверхности разъемов (рисунок 2). При проектировании многоместной формы можно легко задать компоновку в качестве круглой, прямоугольной или переменной.

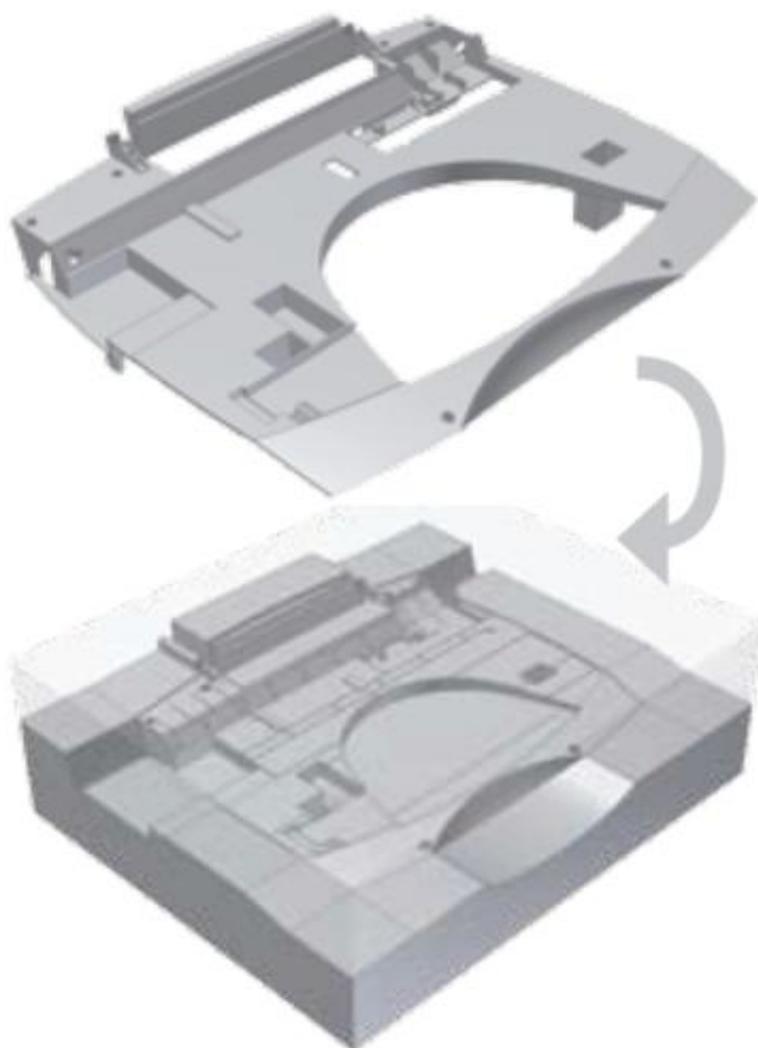


Рисунок 2 - Автоматизированное проектирование матриц и пуансонов

1.2.4 Расчеты литейных форм

Средства расчета форм для изготовления изделий из пластмассы позволяют осуществлять моделирование и оптимизировать процесс проектирования. Эти средства применяются для определения скорости потоков материала, усадки и установки параметров процесса заливки. Расчеты форм помогают оптимизировать проект и снизить число повторных операций.

1.2.5 Расчеты проливаемости

Выявление проблем, связанных с проливаемостью, на ранних этапах проектирования помогает избежать дорогостоящих ошибок. Программа позволяет приступить к расчетам модели детали еще до начала проектирования формы. Вы можете быстро сориентироваться в заливке пластмассы, образовании раковин, эффективности охлаждения, расположении литников и оптимальной области формовки.

1.2.6 Стандартные компоненты форм

Воспользуйтесь стандартными компонентами форм. В системе предусмотрен обширный набор каталогов стандартных компонентов, следовательно, вам не придется моделировать их самостоятельно. Эффективность работы повышается благодаря возможности обратиться к стандартным компонентам и сборкам форм, а также элементам матриц и пуансонов, непосредственно относящимся к проектируемой пластмассовой детали.

1.2.7 Библиотеки форм

Возможность многократного использования стандартных компонентов позволяет избежать повторного выполнения одних и тех же работ и воспользоваться всеми преимуществами испытанного подхода к проектированию. Inventor поддерживает

ет целый ряд каталогов – DME, Futaba, HASCO, LKM, Pedrotti, Polimold, Rabourdin и Strack. Пользователям предоставляется удобный доступ к стандартным компонентам, хранящимся в единой базе данных. При необходимости стандартные элементы можно адаптировать в соответствии с вашими потребностями (рисунок 3).

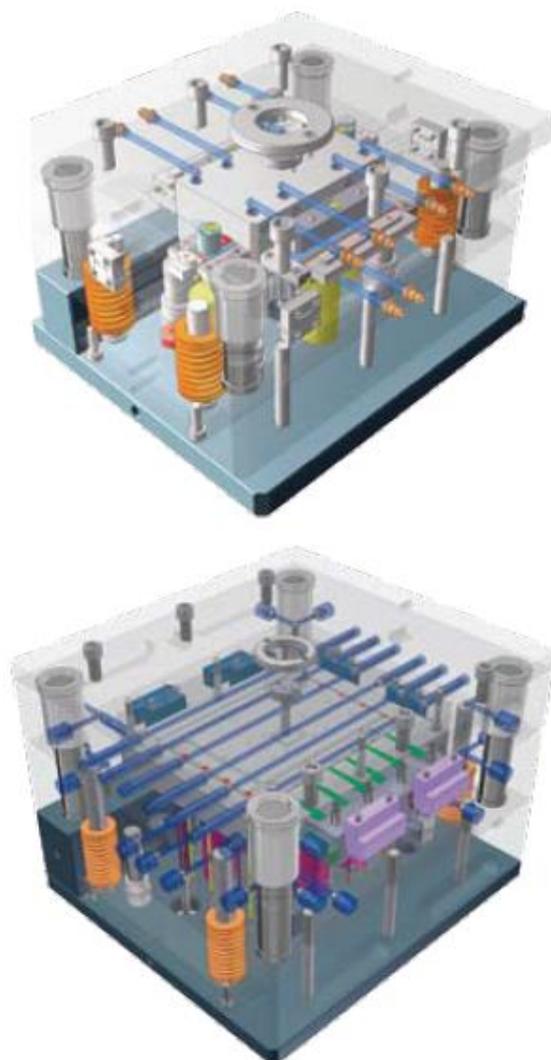


Рисунок 3 – Применение библиотек форм

После завершения процесса проектирования форм технические чертежи и спецификации автоматически создаются на основе цифровой модели. Благодаря ассоциативности выполненной в Inventor модели, все изменения автоматически заносятся в чертежи и спецификации.

Автоматическое создание чертежей и спецификаций помогает ускорить выполнение заказов. Inventor позволяет автоматически создавать 2D-чертежи форм и соответствующие спецификации, используемые при формировании документации, а также в процессе производства. Изменение 3D-модели детали ведет к автоматическому обновлению чертежей и спецификаций.

1.2.8 T-FLEX/Штампы [53]

T-FLEX/Штампы - это система автоматизированного проектирования штамповой оснастки, обладающая многовариантными средствами разработки штампов для холодной листовой штамповки любой сложности. Система включает расчетную и графическую часть, а для автоматической генерации и оформления конструкторской документации использует мощные параметрические возможности системы T-FLEX CAD (рисунок 4).

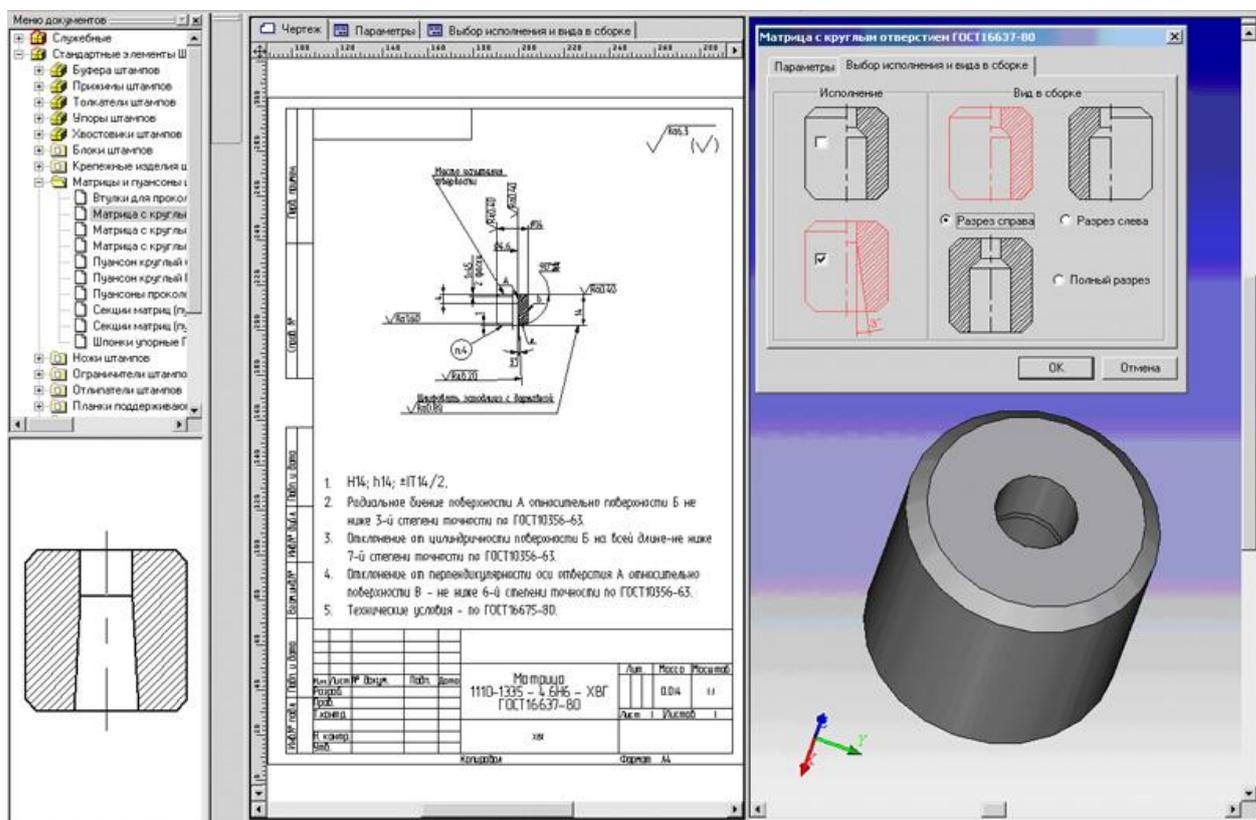


Рисунок 4 - T-FLEX/Штампы

Отличительной особенностью программы T-FLEX/Штампы от традиционных систем автоматизированного проектирования штампов является ее ориентированность на специалиста предметной области, как в ходе эксплуатации, так и в ходе разработки. Другой особенностью системы является ориентация на совмещенное проектирование основного объекта и технологической оснастки (в данном случае холодной листовой штамповки) для его изготовления.

Помимо конструкторских задач в системе T-FLEX/Штампы решаются и технологические вопросы, влияющие на проектирование штампов (проверка штампуемой детали на технологичность, получение оптимального однорядного и двухрядного раскроя, расчет развертки гнутой детали, расчет количества переходов и размеров полуфабрикатов при вытяжке осесимметричных деталей и др.) [53].

Использование T-FLEX/Штампы позволяет:

- максимально охватить номенклатуру деталей для холодной листовой штамповки;
- повысить качество проектных работ за счет сокращения ошибок проектирования;
- сократить на порядок сроки подготовки конструкторско-технологической документации;
- обеспечить совмещенное проектирование основного объекта и технологической оснастки для его изготовления;
- пополнять базу деталей, узлов и конструкций штампов холодной листовой штамповки для решения оригинальных задач [7].

1.2.9 AutoForm-DieDesigner^{plus} [49]

Приложение для быстрого создания поверхностей инструмента при разработке техпроцесса (рисунок 5).

AutoForm-DieDesigner^{plus} дает возможность инженерам, технологам и конструкторам штампов быстро создавать различные варианты всех технологических операций, необходимых для формообразования листового металла. Выбранные варианты поверхностей используются для автоматического создания инструмента, требуемого для моделирования в AutoForm-Solver^{plus} и последующего анализа результатов в AutoForm-ProcessExplorer^{plus}.



Рисунок 5 – Пример AutoForm-DieDesigner^{plus}

AutoForm-DieDesigner^{plus} в основном используется на этапе разработки технологического процесса для быстрого создания технологических переходов штампов глубокой вытяжки. Его четкая и логичная структура дает пользователям возможность разрабатывать процесс шаг за шагом, от импорта CAD-геометрии детали до полного создания формообразующих. Эти шаги включают в себя: скругление острых кромок, легкую модификацию радиусов детали, определение угла ориентации детали, заливку отверстий, модификации детали, создание прижима и надстройки (наружной и внутренней), оверкроунинг, создание заполняющей поверхности между спаренными деталями, создание гибочных и формовочных секций, развертку фланцев и анализ углов реза.

AutoForm-DieDesigner^{plus} основывается на полностью ассоциативно связанной модели всей схемы техпроцесса, которая позволяет пользователю легко изменять промежуточные операции, а также окончательную геометрию детали. Когда такие

изменения производятся, геометрия инструмента всех операций и соответствующие исходные данные для расчета автоматически и немедленно обновляются. Как только оптимальная форма технологического перехода получена, поверхности могут быть экспортированы и доведены в любой CAD системе.

Поскольку формообразующие для всего процесса задаются легко и последовательно, AutoForm-DieDesigner^{plus} значительно улучшает качество инструмента и сокращает время разработки на раннем этапе инжиниринга техпроцесса.

Главные преимущества AutoForm-DieDesigner^{plus} :

- легкое и быстрое создание рабочих поверхностей штамповой оснастки, включая модификацию детали;
- быстрая оценка множества вариантов конструкции инструмента;
- эффективный выбор лучшего варианта инструмента по отношению к технологичности, качеству и стоимости;
- существенное снижение времени на технологическое проектирование;
- удобство в глубоком понимании и проверке схемы процесса, а также ведении заготовки во время множества операций;
- немедленное моделирование техпроцесса с автоматическим обновлением инструмента (в комбинации с AutoForm-Solverplus / AutoForm-Process Explorer^{plus}).

Главные особенности AutoForm-DieDesigner^{plus} :

- легкое создание параметризованной геометрии технологических переходов;
- четкая и логичная структура, дающая пользователям разрабатывать процесс шаг за шагом, от импорта CAD геометрии детали до полного создания формообразующих поверхностей;
- легкое создание технологической надстройки, основанной на специально настроенных профилях;
- автоматическая развертка фланцев на поверхность технологической надстройки;
- точное моделирование геометрии через технологию морфинга.

1.2.10 Комплекс IMOLD [34]

Программный модуль для автоматического конструирования формообразующих поверхностей пуансона и матрицы при проектировании пресс-форм в SolidWorks, от пионера в области аналогичного программного обеспечения, компании Manusoft Technologies Pte. Ltd.

На сегодняшний день, конструкторы пресс-форм, использующие продукты SolidWorks Corp., имеют достаточно большой выбор разработанных партнерами компании специализированных приложений, которые могут помочь в работе. Заслуживают упоминания библиотеки блоков и других компонентов пресс-форм, пакеты MoldWorks и SplitWorks. Но дальше всех продвинулась сингапурская Manusoft TechnologiesPte Ltd. Она предлагает один из самых полных пакетов для проектирования пресс-форм, который наверняка будет полезен пользователям SolidWorks. Этот пакет, называемый IMOLD, состоит из ряда взаимосвязанных модулей, которые помогают конструктору шаг за шагом проектировать пресс-форму на всех этапах.

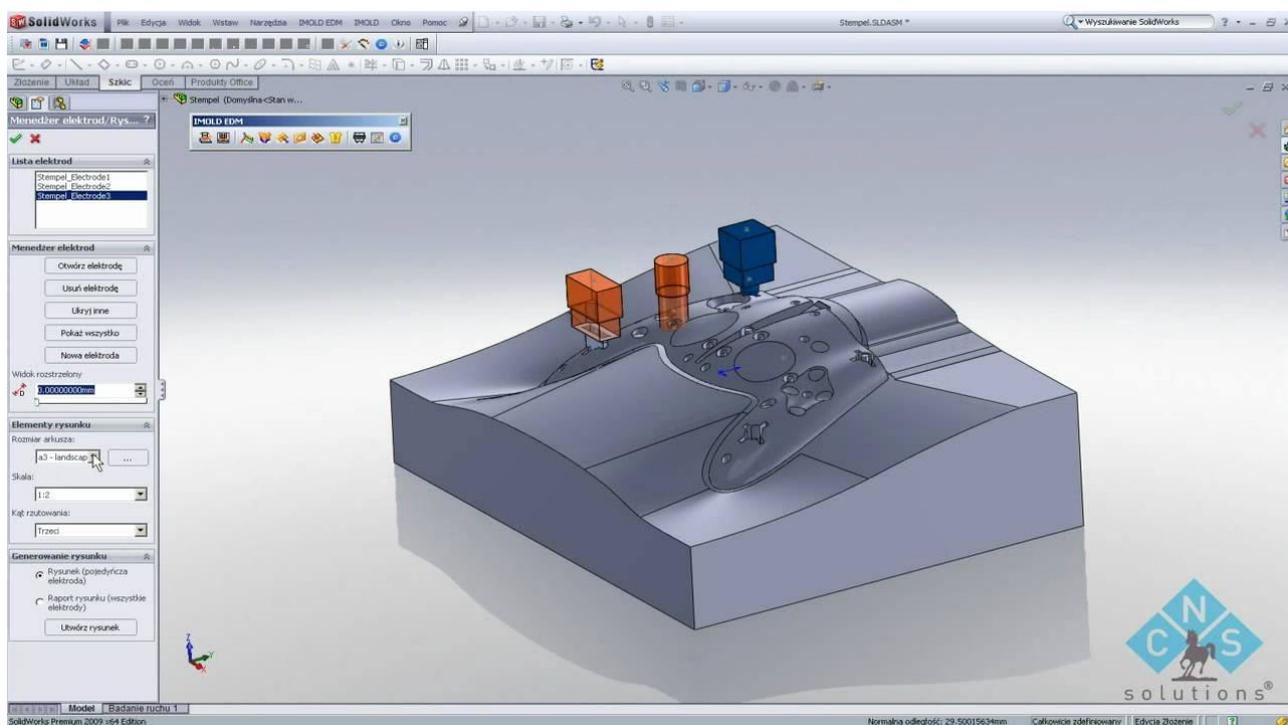


Рисунок 6 – Применение Imold в среде SolidWorks

Основные достоинства IMOLD:

- широкий набор инструментов для разработки пресс-форм;
- высокая скорость работы;
- хорошая интеграция с SolidWorks;
- возможность предварительного просмотра результатов действия большинства функций;
- система подсказок;
- стабильность в работе.

1.2.11 CimatronE DieDesign [32]

Комплекс DieDesign (рисунок 7) предназначен для проектирования всех основных типов штампов листовой штамповки: простого, совмещенного и последовательного действия – и преобразовательных штампов для обработки материала толщиной от 0,1 до 6 мм. Штампы простого и совмещенного действия обеспечивают выполнение одной или нескольких однородных (например, вырубку-пробивку) операций соответственно. В штампах последовательного действия за один ход прессы выполняются все операции формообразования, необходимые для получения готовой детали из автоматически подающейся полосы или ленты. Операции на полосе выполняются последовательно: на входе полосы в штамп — первая, на выходе — окончательная, каждой из них соответствует определенное промежуточное состояние заготовки на полосе.

Преобразовательные штампы подобны штампам последовательного действия, но предполагают работу с отдельными листовыми заготовками, которые при перемещении в положение выполнения следующей операции могут менять ориентацию или верхнюю сторону с нижней относительно прессы.

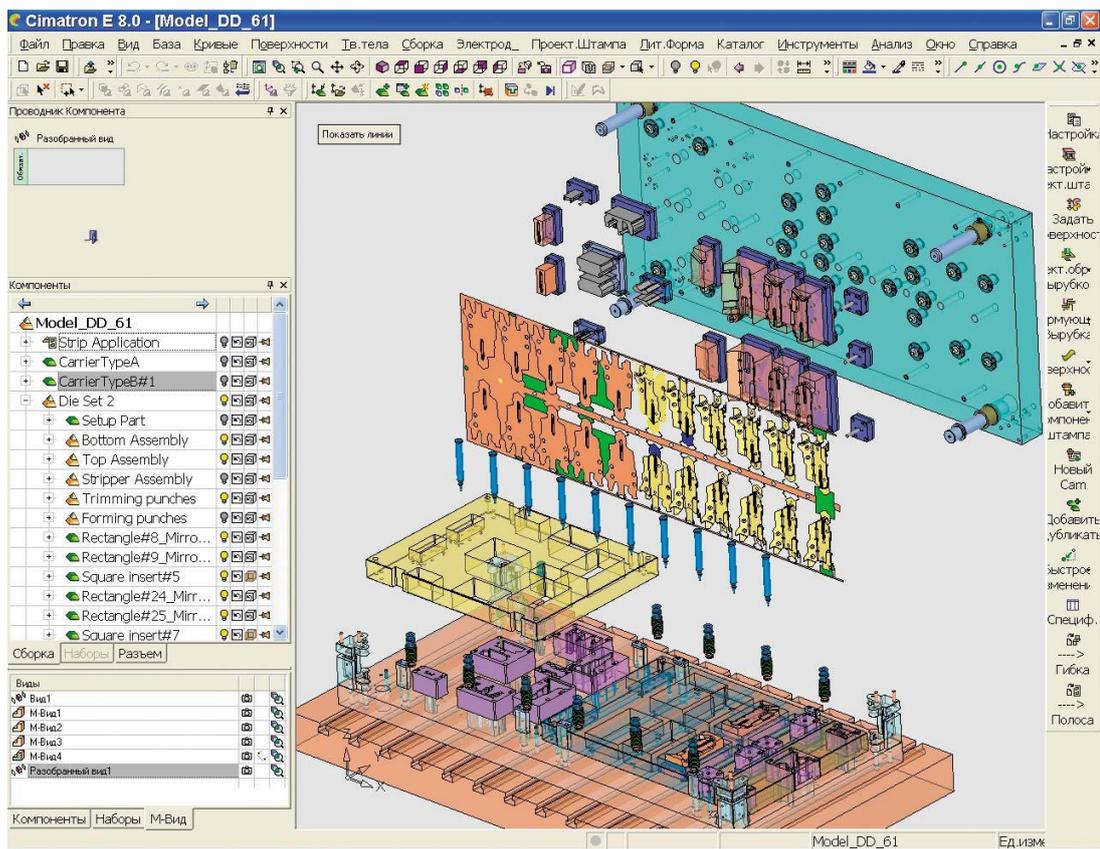


Рисунок 7 - CimatronE DieDesign

Штампы простого и совмещенного действия предназначены для выпуска деталей меньшими сериями, но являются более дешевыми, а их проектирование, по сути, представляет собой частный случай процесса проектирования более сложных типов штампов.

Процесс разработки штампов, как и любой вид инженерной деятельности, является итерационным, включающим тесты и внесение корректив при их неудовлетворительных результатах. Среди его основных этапов можно выделить такие, как прием и оценка стоимости заказа, для чего требуется рассчитать заготовку и произвести раскрой полосы, проектирование процесса формообразования (полосы) и сборки штампа, в процессе выполнения которых необходимо производить различные аналитические проверки правильности принятых решений, чтобы сократить число переделок. Для производства также являются важными этапы разработки чертежно-графической документации и комплекса управляющих программ для различных станков с ЧПУ.

CimatronE DieDesign для проектирования штампов листовой штамповки предоставляет пользователю комплекс специальных средств для быстрого и точного расчета стоимости выполнения заказа на штамповку деталей, проектирования полосы и сборки штампа, проведения необходимого анализа возможных проблем штамповки. Интегрированные с другими подсистемами CimatronE модули проектирования штампов комплексно покрывают рабочий процесс разработки и производства и предполагают организацию совместной работы группы специалистов на различных этапах рабочего процесса. Система предоставляет возможность одновременного выполнения (распараллеливания) традиционно последовательно выполняемых работ, предлагая средства автоматического выявления и отслеживания инженерных изменений во всех разработанных моделях и документах независимо от того, в какой CAD-системе разрабатывались исходные модели изделий.

1.2.12 Комплекс для математического моделирования процессов обработки металлов давлением QForm [51]

QForm (рисунок 8) – это универсальный комплекс для математического моделирования процессов обработки металлов давлением. В программе удалось соединить уникальный по своей простоте интерфейс с широкой функциональностью, благодаря чему моделировать стало намного удобней и приятней. Новые расчетные алгоритмы позволили с максимальной эффективностью использовать вычислительные мощности современных многоядерных процессоров, в результате чего скорость расчета существенно увеличилась. Работа интерфейса абсолютно не зависит от расчетного ядра, поэтому вывод результатов осуществляется очень быстро даже для самых сложных расчетов.

Работая с единственным окном программы, вы задаете исходные данные, управляете процессом расчета и просматриваете результаты. Реализованные в программе инструменты позволяют не только быстро и подробно описать моделируемый процесс, но и глубоко исследовать полученные результаты.

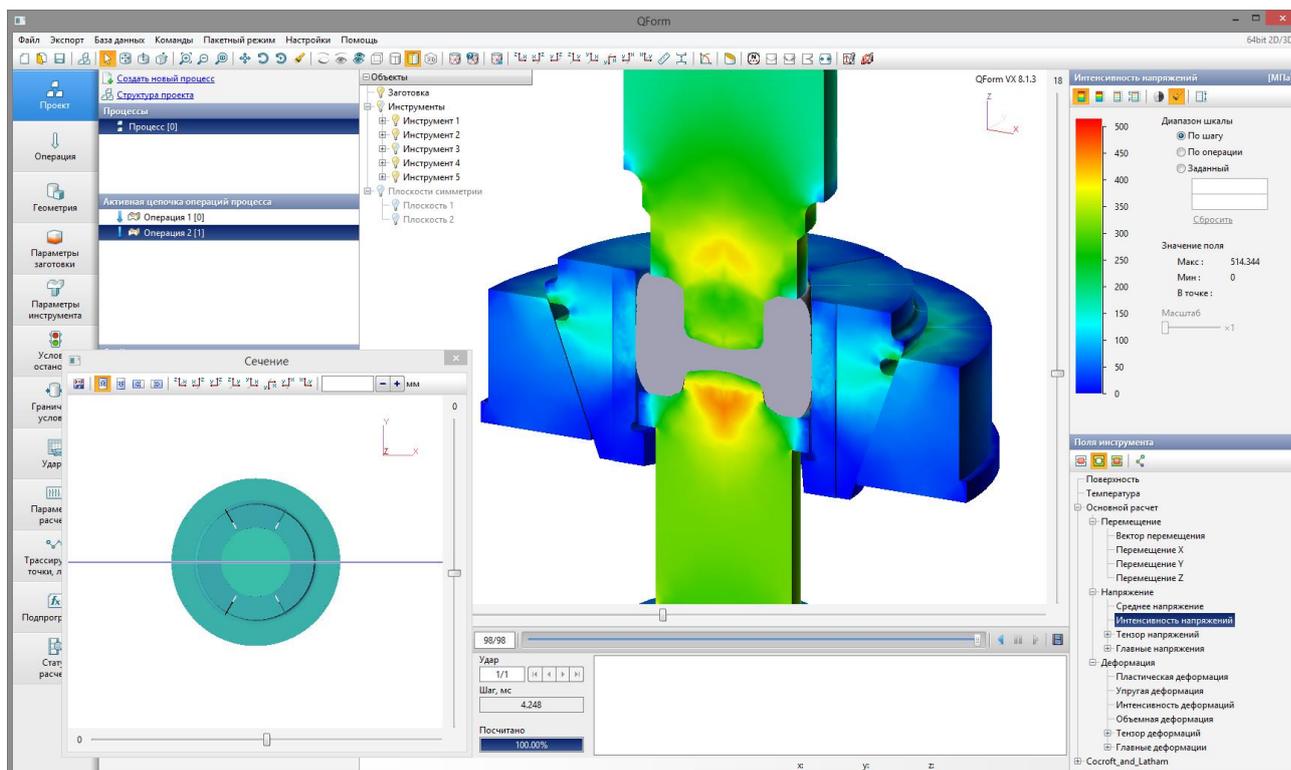


Рисунок 8 – QForm VX

В QForm можно моделировать почти все известные технологические процессы формоизменения металла. Круг решаемых задач существенно расширяется благодаря следующим возможностям:

- расчет вязкопластической и упругопластической деформации заготовки;
 - расчет совместной тепловой и механической задач системы Заготовка-Инструмент;
 - расчет сложных составных инструментов;
 - расчет деформации одновременно нескольких заготовок из разных материалов;
 - расчет износа и деформации инструмента;
 - удобный анализ энергосиловых параметров процесса;
- предсказание дефектов и текстуры деформируемой заготовки;
- удобная трассировка расчетных данных и их экспорт в виде таблиц;
 - пакетный режим расчета;
 - расчет подпружиненного инструмента и силового прижима;

- использование явного или неявного методов решения;
- написание пользовательских подпрограмм;
- задание специальных граничных условий для заготовки и инструмента;
- расчет термо-упруго-пластической задачи;
- широкие возможности управления параметрами расчета и сеткой конечных элементов;
- совместный интерфейс с известными программами моделирования процессов литья (ProCast, MagmaSoft);
- возможность импорта данных из специальных программ для расчета теплофизических свойств материалов (JMatPro);
- совместный интерфейс с программой моделирования микроструктуры и фазовых превращений (MatiLDa).

Генерация и перестройка конечно-элементной сетки в процессе расчета осуществляются в автоматическом режиме и в большинстве случаев не требует вмешательства пользователя.

QForm поставляется с большой базой данных деформируемых материалов, инструментальных материалов, оборудования и смазок. В программе описаны модели механических, гидравлических и винтовых прессов, молотов, вращательного оборудования, реализовано несколько моделей трения.

Подробное руководство пользователя, переведенное на пять языков, включает в себя не только описание всех возможностей программы, но и большое количество интересных примеров, а также теоретический курс о моделировании процессов обработки давлением в QForm.

Благодаря всем этим особенностям, программа популярна не только среди исследователей, но и среди инженеров-технологов.

1.2.13 Система конечно-элементного моделирования течения металла в процессах обработки металлов давлением DEFORM™ - 3D [50]

DEFORM™ - 3D (рисунок 9) является системой конечно-элементного моделирования, которая предназначена для анализа трехмерного (3D) течения металла при различных процессах обработки металлов давлением.

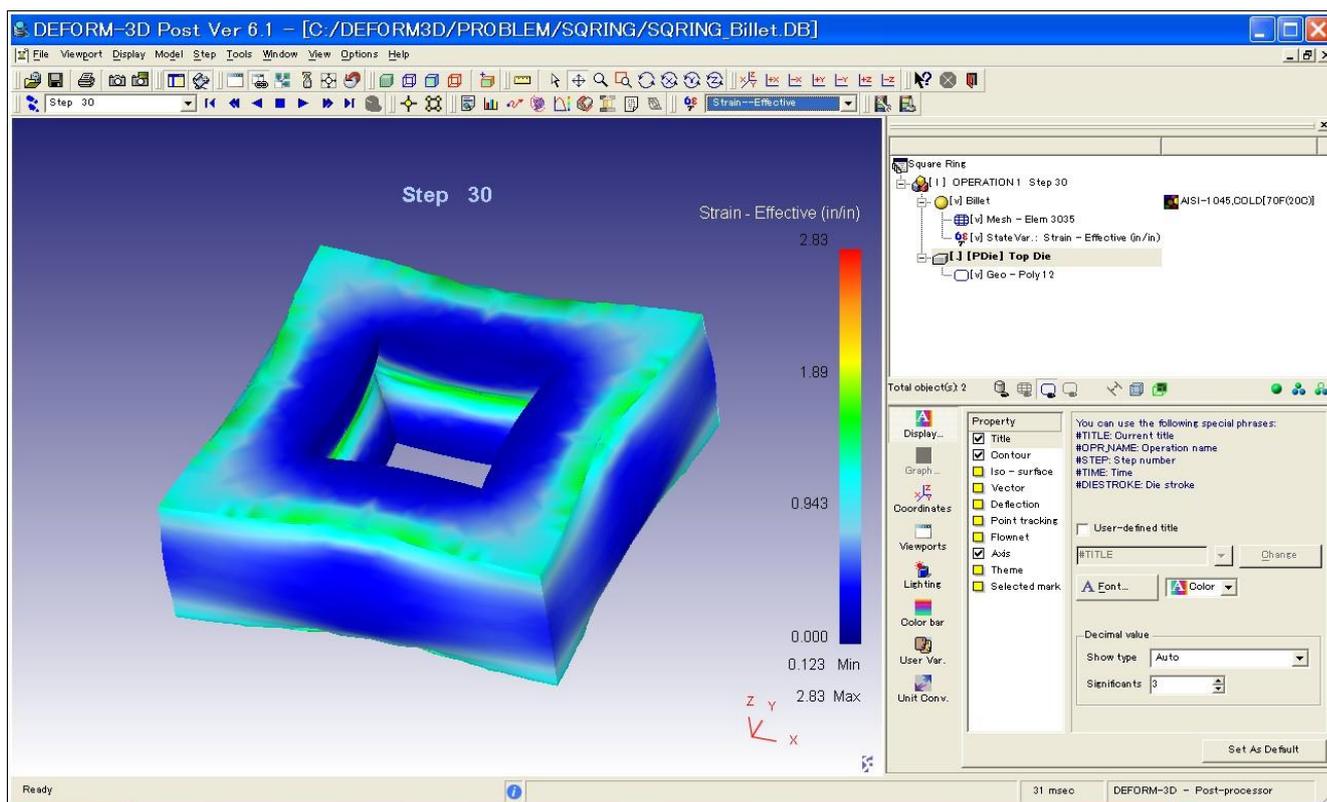


Рисунок 9 – DEFORM™ - 3D

DEFORM™ - 3D - практичный и эффективный инструмент, позволяющий прогнозировать характер формообразования при операциях обработки металлов давлением без существенных затрат на экспериментальное исследование. Операции, моделируемые в DEFORM™ - 3D:

- ковка;
- выдавливание;
- протяжка;

- механообработка;
- высадка;
- прессование;
- прокатка;
- вытяжка;
- осадка.

Основанные на методе конечных элементов, программные продукты DEFORM доказали свою эффективность и точность более чем двадцатилетним применением их на различных предприятиях. Мощный решатель системы способен анализировать течение металла и температурные показатели заготовки и инструмента при деформациях любой величины с очень высокой точностью.

Автоматический генератор сеток позволяет создать сетку конечных элементов, размеры которых, в различных частях модели, будут различаться в зависимости от специфики анализируемого процесса. Это существенно уменьшает общую размерность задачи и требования к аппаратным средствам. Кроме того, пользователь системы DEFORM™ - 3D имеет возможность в "ручном" режиме настраивать плотность сетки и соотношение размеров конечных элементов.

Несмотря на то, что DEFORM™ - 3D позволяет проводить моделирование очень сложных процессов, интерфейс этой системы крайне прост и легок в освоении. Кроме того, при помощи DEFORM™ - 3D можно легко, без помощи посторонних CAD систем, строить геометрические модели заготовок и инструмента.

При помощи системы DEFORM™ - 3D можно моделировать, так же, разделительные операции и механообработку. Таким образом, DEFORM™ - 3D является программным комплексом, позволяющим производить всеобъемлющий анализ металлообработки, начиная с операций раздела проката на заготовки, заканчивая операциями окончательной механообработкой.

DEFORM™ - 3D широко применяется в промышленности и научно-исследовательской деятельности по всему миру. Разработку и техническую поддержку системы DEFORM™ - 3D осуществляет фирма ScientificFormingTechnologies Corporation (SFTC) в течении многих лет, занимающаяся внедрением средств

моделирования технологических процессов в производство. Для обеспечения успешного применения DEFORM™ SFTC и ее представители регулярно проводят конференции, семинары пользователей и обновление версий.

1.2.14 Сопоставление возможностей программных средств

Рассмотрев возможности систем автоматизации проектирования, применяемых для построения инструментов для штамповочных и вытяжных операций, сопоставим полученные результаты с задачами, решение которых необходимо для пооперационного расчёта полуфабрикатов изделий и проектирования инструмента в технологических процессах изготовления цельнотянутых оружейных гильз и поддонов методом холодной глубокой вытяжки (таблица 2).

Из таблицы видно, что основная часть рассмотренных систем предназначена для проектирование инструмента, причем для операций штамповки. Системы анализа процессов обработки металлов давлением позволяют оценить принятые проектные или технологические решения, но предварительных расчетов тоже не выполняют.

Таким образом, по результатам выполнения анализа установлено, что для решения поставленных задач в области пооперационного расчёта полуфабрикатов изделий и проектирования инструмента в технологических процессах изготовления цельнотянутых оружейных гильз и поддонов методом холодной глубокой вытяжки необходима разработка специализированного программного средства.

Таблица 2 – Сопоставление необходимых для решения задач и возможностей рассмотренных систем

Решаемая задача	КОМПАС Прессы формы 3D	AutoCAD Inventor Tooling Suite	T-FLEX/Штаппы	AutoForm-DieDesigner ^{plus}	IMOLD	CimatronE DieDesign	Deform	QForm
Расчёт размеров круглой заготовки (кружка)	-	-	-	-	-	-	-	-
Расчёт размеров полуфабриката и инструмента последней вытяжки	-	-	-	-	-	-	-	-
Расчёт размеров полуфабриката и рабочих размеров инструмента предпоследней вытяжки	-	-	-	-	-	-	-	-
Выбор величины степени деформации на вытяжных операциях. Определение количества вытяжек	-	-	-	-	-	-	-	-
Расчёт рабочих размеров полуфабриката и инструмента промежуточных вытяжек	-	-	-	-	-	-	-	-
Расчёт рабочих размеров инструмента вытяжки с утонением через две матрицы	-	-	-	-	-	-	-	-
Профилирование инструмента вытяжки	-	-	-	-	-	-	-	-
Пооперационное проектирование инструмента	+	+	+	+	+	+	-	-
Пооперационный расчёт усилий	-	-	-	-	-	-	+	+

2 Проектирование полуфабриката на основе геометрии изделия

2.1 Общий подход и технологии проектирования

2.1.1 Выбор технологии проектирования

Традиционно (исторически) выделяют три основных модели жизненного цикла программного обеспечения (ПО) [25]:

- 1) каскадная;
- 2) поэтапная, с циклами обратной связи;
- 3) спиральная.

2.1.2 Каскадная модель жизненного цикла ПО

В изначально существовавших однородных информационных систем каждое приложение представляло собой единое целое. Для разработки такого типа приложений применялся каскадный способ. Его основной характеристикой является разбиение всей разработки на этапы, причем переход с одного этапа на следующий происходит только после того, как будет полностью завершена работа на текущем (рисунок 10). Каждый этап завершается выпуском полного комплекта документации, достаточной для того, чтобы разработка могла быть продолжена другой командой разработчиков.

Положительные стороны применения каскадного подхода заключаются в следующем:

- на каждом этапе формируется законченный набор проектной документации, отвечающий критериям полноты и согласованности;
- выполняемые в логичной последовательности этапы работ позволяют планировать сроки завершения всех работ и соответствующие затраты.



Рисунок 10 – Каскадная схема разработки ПО

Каскадный подход хорошо зарекомендовал себя при построении информационных систем, для которых в самом начале разработки можно достаточно точно и полно сформулировать все требования, с тем, чтобы предоставить разработчикам свободу реализовать их как можно лучше с технической точки зрения. В эту категорию попадают сложные расчетные системы, системы реального времени и другие подобные задачи. Однако в процессе использования этого подхода обнаружился ряд его недостатков, вызванных прежде всего тем, что реальный процесс создания ПО никогда полностью не укладывался в такую жесткую схему. В процессе создания ПО постоянно возникала потребность в возврате к предыдущим этапам и уточнении или пересмотре ранее принятых решений. В результате реальный процесс создания ПО принимал вид поэтапной модели.

2.1.3 Поэтапная модель жизненного цикла ПО

Главным преимуществом поэтапной модели (реальной каскадной модели) является возможность обхода сложного в реализации блока при не возможности нахождения решения в данный момент (рисунок 11). Однако процесс создания модулей растягивается на весь процесс проектирования, что приводит к большим рисками.



Рисунок 11 – Поэтапная схема разработки ПО

2.1.4 Спиральная модель жизненного цикла ПО

Для преодоления проблем других моделей была предложена спиральная модель (рисунок 12) делающая упор на начальные этапы жизненного цикла: анализ и проектирование. На этих этапах реализуемость технических решений проверяется путем создания прототипов. Каждый виток спирали соответствует созданию фрагмента или версии ПО, на нем уточняются цели и характеристики проекта, определяется его качество и планируются работы следующего витка спирали. Таким образом, углубляются и последовательно конкретизируются детали проекта, и в результате выбирается обоснованный вариант, который доводится до реализации.

Разработка итерациями отражает объективно существующий спиральный цикл создания системы. Неполное завершение работ на каждом этапе позволяет переходить на следующий этап, не дожидаясь полного завершения работы на текущем. При итеративном способе разработки недостающую работу можно будет выполнить на следующей итерации. Главная же задача - как можно быстрее показать пользователям системы работоспособный продукт, тем самым активизируя процесс уточнения и дополнения требований.



Рисунок 12 – Спиральная схема разработки ПО

Основная проблема спирального цикла - определение момента перехода на следующий этап. Для ее решения необходимо ввести временные ограничения на каждый из этапов жизненного цикла. Переход осуществляется в соответствии с планом, даже если не вся запланированная работа закончена. План составляется на основе статистических данных, полученных в предыдущих проектах, и личного опыта разработчиков. В качестве альтернативы возможно использование технологии HIPO.

2.1.5 HIPO-технология

HIPO (Hierarchical input process output) – иерархическая диаграмма вход-обработка-выход или технология проектирования и документирования. Фирма IBM создала методологию диаграмм IPO (вход-обработка-выход) в 1970-х.

Поверхностное восприятие нисходящего проектирования порождает у программиста ложное чувство самоуверенности. По этой причине были предприняты попытки формализовать этот процесс.

Фирма IBM создала методологию диаграмм вход-обработка-выход, то есть, HIPO, или спецификация интерфейсов. Согласно данному подходу структура программы представляется в виде диаграммы и таблиц (рисунок 13).

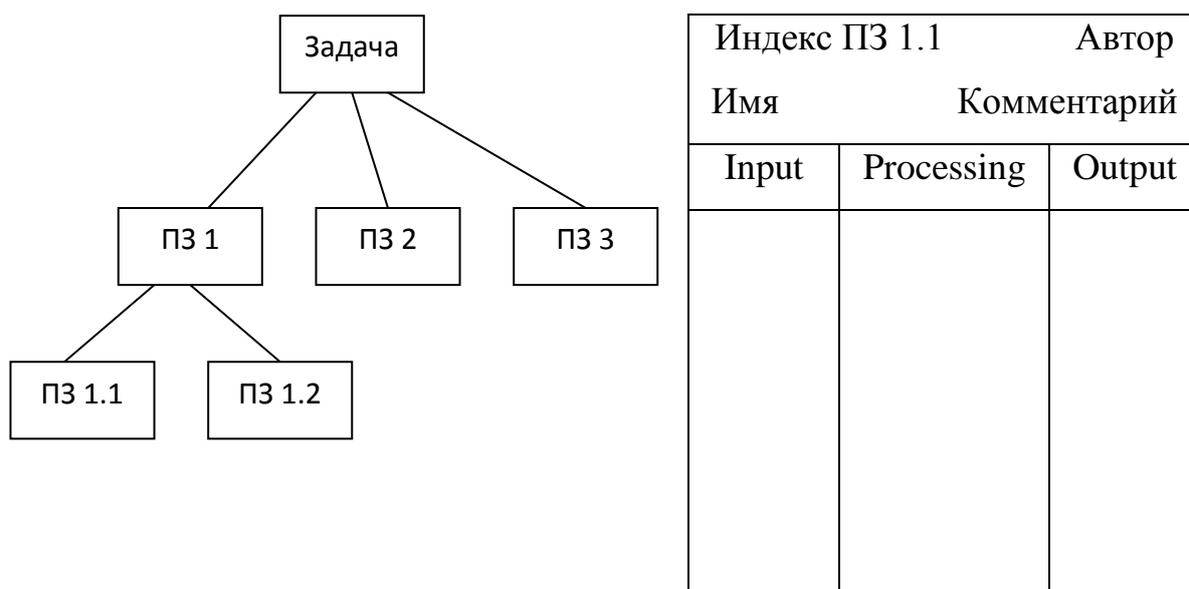


Рисунок 13 – Представление структуры программного средства (ПС) по методологии HIPO

Главное состоит в том, что используется некоторый формализованный и регламентированный подход к документированию.

Диаграммы IPO являются основными в технологии. В диаграммах выделены три колонки. В левой колонке записывается входная информация (та, что подается на вход алгоритма), в средней описан процесс (алгоритм), в правой - выходная информация.

Язык заполнения IPO диаграмм не оговаривается и может быть любым. Каждая диаграмма соответствует одному уровню (шагу) проектирования. На одной диаграмме должно быть не более семи программных блоков, уточняющих название (характер) работы. Это заставляет проектировщика системы разбивать ее по уровням на небольшое число подсистем и построить для всей системы некоторое дерево рассмотрений проектирования. Название, присваиваемое одному блоку должно быть кратким, общепринятым и обязательно сохраняться без изменений во всех диаграммах системы. При необходимости каждое название может быть доопределено и расширено в специальной области, называемой областью спецификаций.

2.1.6 Информационные связи и переходы между блоками модуля проектирование

Наличие методики реализации позволяет говорить о необходимости использования каскадной схемы проектирования, но в ходе первых шагов реализации были обнаружены сложно формализуемые ручные операции с невысокой точностью расчета и модель перешла в состояние поэтапной. Таким образом, наиболее эффективным в данной ситуации будет считаться использование спиральной схемы или технологии HIPO, при условии полного планирования с выбором системного аналитика. Упрощенная схема переходов между блоками проектируемого модуля представлена на рисунке 14.

В качестве исходных данных об изделии предлагается использование данных из 3d-модели (рисунок 15) из CAD системы Компас-3D или ручной ввод (редактирование) конструктивных элементов в оболочке проектируемого модуля.

Расчет объема донной части полуфабриката возможно провести с помощью средств МЦХ CAD системы Компас-3D на основе автоматизировано формируемой модели или на основе формул математического аппарата по эскизу тела вращения. Использование формул математического аппарата позволит в дальнейшем ускорить процесс оптимизации. В то же время, требуется проверка формул и сравнение результатов расчета.

Переход от формы изделия к форме полуфабриката без механической обработки является сложно формализуемым и требует дополнительного анализа.

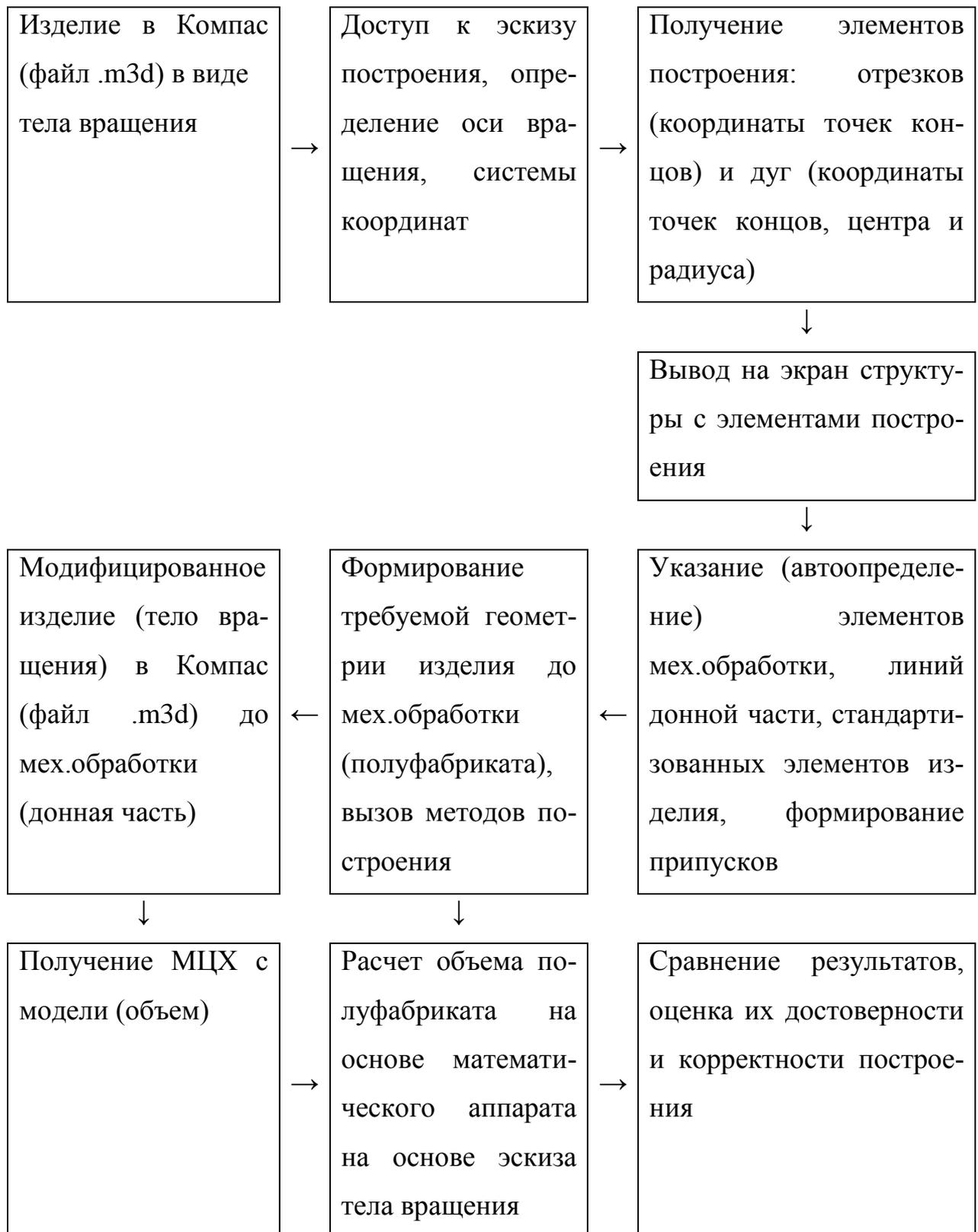


Рисунок 14 – Информационные связи и переходы между блоками модуля проектирование полуфабриката разрабатываемого ПС

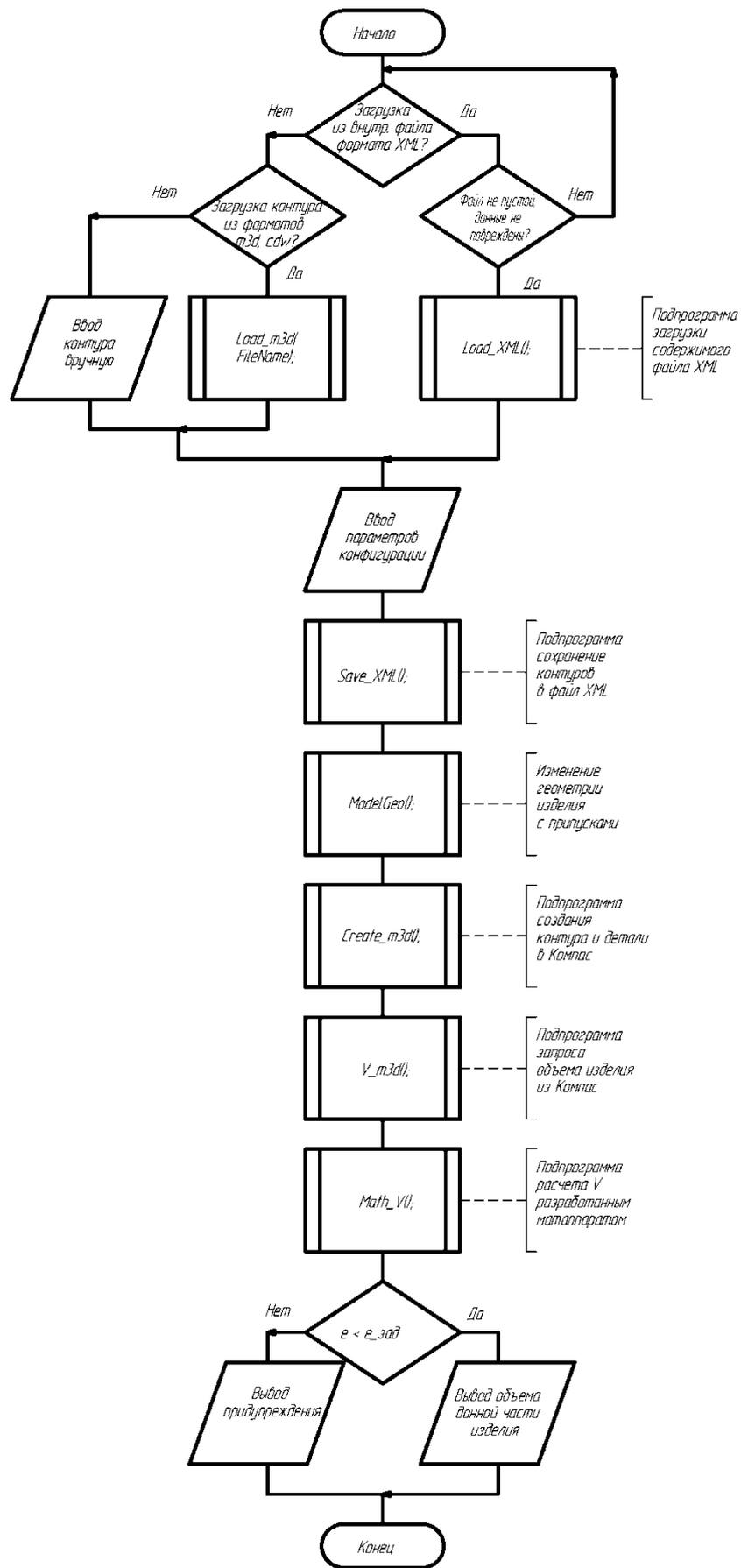


Рисунок 15 – Схема программы получения данных с 3D-модели изделия

2.2 Нахождение объемов тел вращения

2.2.1 Теорема Гульдина-Паппа

Объём и площадь поверхности тел вращения можно также узнать при помощи теорем Гульдина-Паппа, которые связывают площадь или объём с центром масс фигуры [4, 44].

Первая теорема Гульдина-Паппа: площадь поверхности, образуемой при вращении линии, лежащей в плоскости целиком по одну сторону от оси вращения, равна произведению длины линии на длину окружности, пробегаемой центром масс этой линии.

Вторая теорема Гульдина-Паппа гласит: объём тела, образуемого при вращении фигуры, лежащей в плоскости целиком по одну сторону от оси вращения, равен произведению площади фигуры на длину окружности, пробегаемой центром масс этой фигуры.

2.2.2 Расчет объема тела вращения треугольника

Необходимо составить формул расчета объема на основе задания координат вершин треугольника и сформировать программное обеспечение.

Постановка задачи 1: найти координаты центра тяжести однородной пластинки, имеющей форму треугольника, вершинам которого соответствуют координаты: $A(x_1, y_1)$, $B(x_2, y_2)$, $C(x_3, y_3)$ (толщину пластинки не учитывать) [36].

Центр тяжести треугольника, указанного в условии задачи, находится в точке пересечения его медиан. Из элементарной геометрии известно, что три медианы треугольника пересекаются в одной точке, причем эта точка делит медианы в отношении 2:1, считая от вершины треугольника. Обозначим эту точку буквой E , ее координаты - x_E и y_E (рисунок 16).

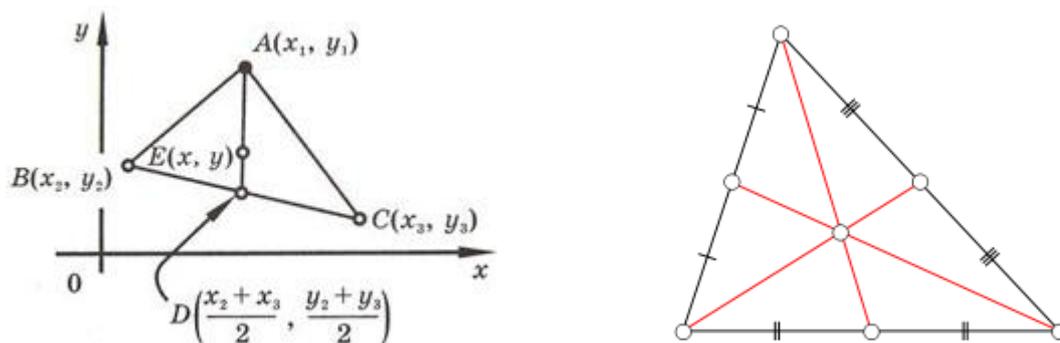


Рисунок 16 – Нахождение центра тяжести треугольника

Рассмотрим медиану, проведенную из вершины A . Один ее конец A имеет координаты (x_1, y_1) , а координаты другого ее конца получим, как координаты середины отрезка BC , концы которого имеют известные координаты: $B(x_2, y_2)$, $C(x_3, y_3)$. Координаты точки D обозначим через x_D и y_D и по формулам

$$x = \frac{x_1 + x_2}{2}, \quad y = \frac{y_1 + y_2}{2}, \quad (6)$$

для определения координат середины отрезка получим

$$x_D = \frac{x_2 + x_3}{2}; \quad y_D = \frac{y_2 + y_3}{2}; \quad D\left(\frac{x_2 + x_3}{2}, \frac{y_2 + y_3}{2}\right). \quad (7)$$

Теперь, зная координаты начала A и конца D отрезка AD и то, что точка $E(x_E, y_E)$ делит этот отрезок в отношении $\lambda = 2$, по формулам

$$x = \frac{x_1 + \lambda x_2}{1 + \lambda}, \quad y = \frac{y_1 + \lambda y_2}{1 + \lambda}, \quad (8)$$

получаем

$$x_{\text{г}} = \frac{x_1 + 2 \frac{x_2 + x_3}{2}}{1+2} = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3}; \quad x_{\text{г}} = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3}; \quad (9)$$

$$y_{\text{г}} = \frac{y_1 + 2 \frac{y_2 + y_3}{2}}{1+2} = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3}; \quad y_{\text{г}} = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3} \quad (10)$$

Полученный результат приводит к выводу, что координаты центра тяжести однородной треугольной пластинки, если не учитывать ее толщину, равны среднему арифметическому однородных координат ее вершин.

Постановка задачи 2: даны вершины треугольника А (x1, y1), В (x2, y2), С (x3, y3). Найти площадь треугольника по координатам вершин.

Найдем длины всех сторон треугольной фигуры, а затем используем формулу Герона. Сначала находим квадраты сторон по формулам:

$$AB \cdot AB = (x_1 - x_2)(x_1 - x_2) + (y_1 - y_2)(y_1 - y_2); \quad (11)$$

$$BC \cdot BC = (x_2 - x_3)(x_2 - x_3) + (y_2 - y_3)(y_2 - y_3); \quad (12)$$

$$CA \cdot CA = (x_3 - x_1)(x_3 - x_1) + (y_3 - y_1)(y_3 - y_1). \quad (13)$$

Находим половинный периметр треугольной фигуры:

$$p = 1/2 \cdot (AB + BC + CA). \quad (14)$$

Значение площади в квадрате определяется по формуле:

$$S \cdot S = p(p - AB)(p - BC)(p - CA). \quad (15)$$

Результат, полученный при помощи формулы Герона, имеет высокую точность с округлением связанным только с разрядной сеткой используемых переменных языка программирования. Полученные формулы реализованы в виде программной функции и сравнены с результатом работы МЦХ Компас (рисунок 17).

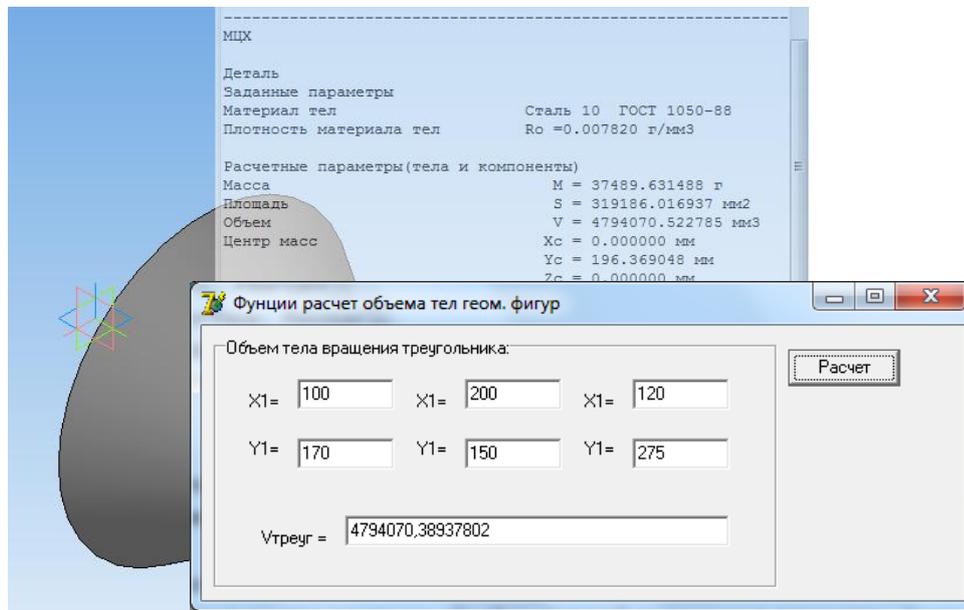


Рисунок 17 – Проверка функции расчета объема тела вращения фигуры треугольник относительно оси Y

2.2.3 Расчет объема тела вращения прямоугольника

Заданы координаты диагональных вершин прямоугольника $A(x_1, y_1)$ и $B(x_2, y_2)$. Необходимо найти объем тела вращения относительно оси Y.

Для этого необходимо найти центр $O_1(x_4, y_4)$, где $X_4 = |(x_1+x_2)/2|$; $Y_4 = |(y_1+y_2)/2|$.

Полученные формулы реализованы в виде программной функции и сравнены с результатом работы МЦХ Компас (рисунок 18).

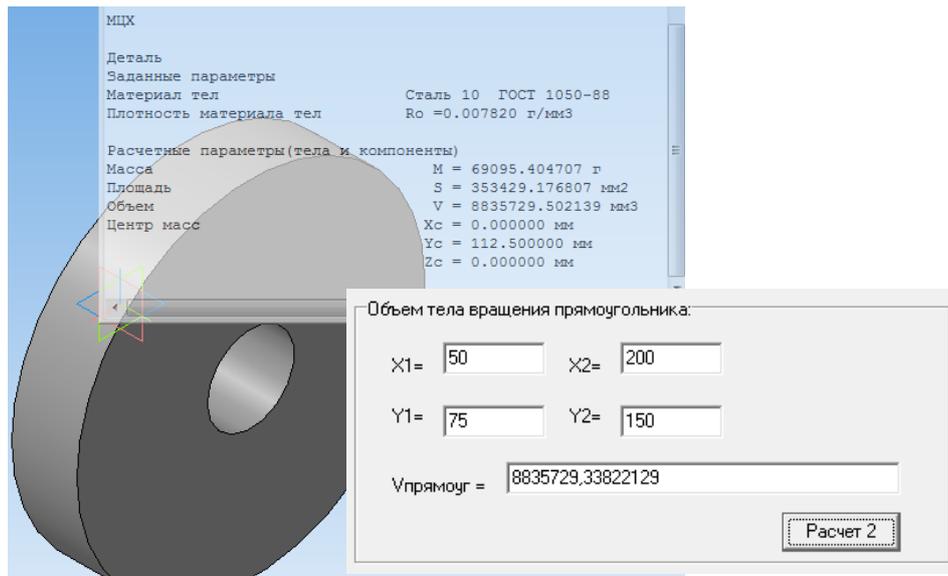


Рисунок 18 – Проверка функции расчета объема тела вращения фигуры прямоугольника относительно оси Y

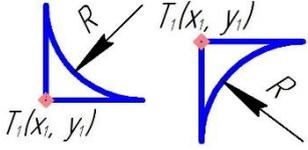
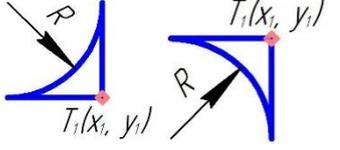
2.2.4 Объем тела вращения четверти окружности (скругления прямых углов)

Объемы тел вращения четверти окружности может быть рассчитаны по похожи формулам в зависимости от положения геометрического центра от оси вращения и формы дуги. Возможны четыре случая представленные в таблице 3.

Таблица 3 – Типы скруглений

Описание скругления	Графическое представление	Формула для расчета
наружное выпуклое		$V_1 = 2\pi S(x_1 + x_4),$ $S = (\pi R^2)/4$
внутреннее выпуклое		$V_2 = 2\pi S(x_1 - x_4)$

Продолжение таблицы 3

Описание скругления	Графическое представление	Формула для расчета
наружное вогнутое		$V_3 = V_{KB} - V_2,$ $V_{KB} = R^2$
внутреннее вогнутое		$V_4 = V_{KB} - V_1$

Полученные формулы были сравнены с расчетами МЦХ Компас (рисунки 19 – 22).

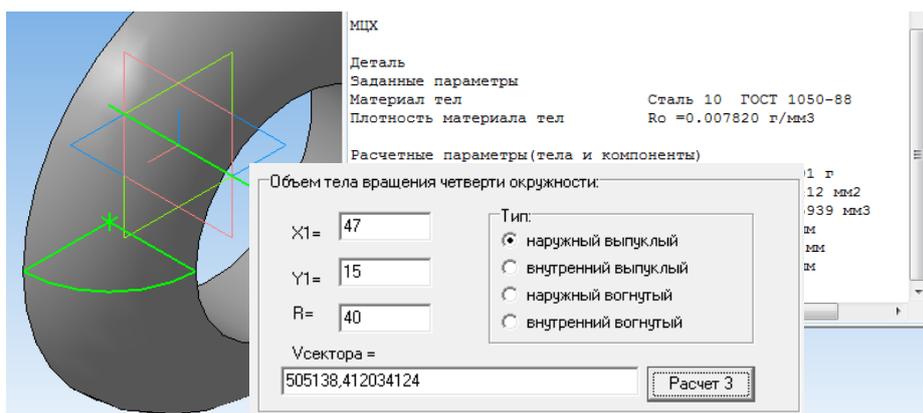


Рисунок 19 – Сравнение результатов расчета объема наружного выпуклого скругления

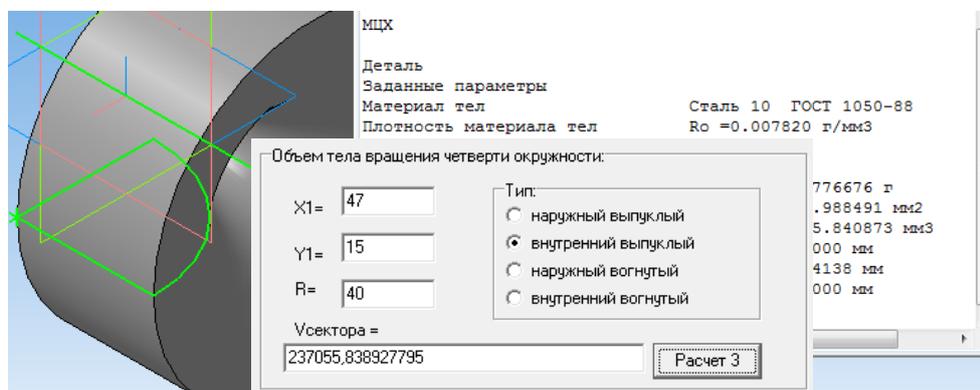


Рисунок 20 – Сравнение результатов расчета объема внутреннего выпуклого скругления

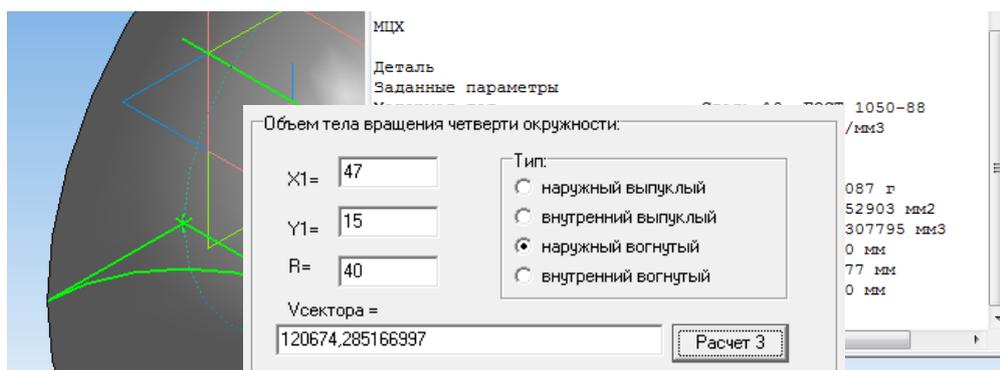


Рисунок 21 – Сравнение результатов расчета объема наружного вогнутого скругления

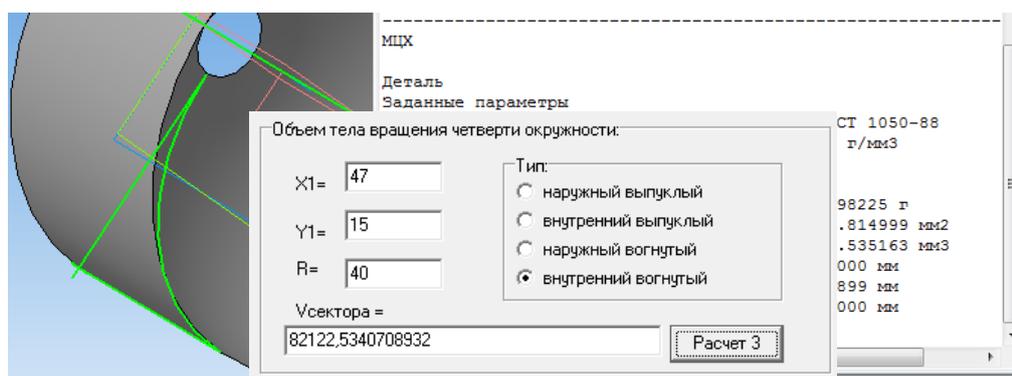


Рисунок 22 – Сравнение результатов расчета объема внутреннего вогнутого скругления

Проверка точности расчета программного средства реализующего математическое обеспечение может быть осуществлена на основе геометрическое построения цилиндра с отверстием и тора (рисунок 23).

В качества первого контрольного примера для проверки возьмем точку $O_1(x_1, y_1)$ с координатами (60, 40) и радиус $R=30$. Объем тороида $V_{тор} = 2\pi r \pi R^2$, где $r=60$. Таким образом, $V_{тор} = 1065917,2753176507308341250279866$.

Программный расчет той же фигуры следует провести с учетом равенства $V_2=V_3$ и $V_1=V_4$. $V_1 = 323027,986594029$ и $V_2 = 209930,651064796$, тогда $V_{общ} = 1065917,275317650$.

Точность расчета программными средствами определена в пределах количества значащих разрядов использованного типа данных (от 16 до 20).

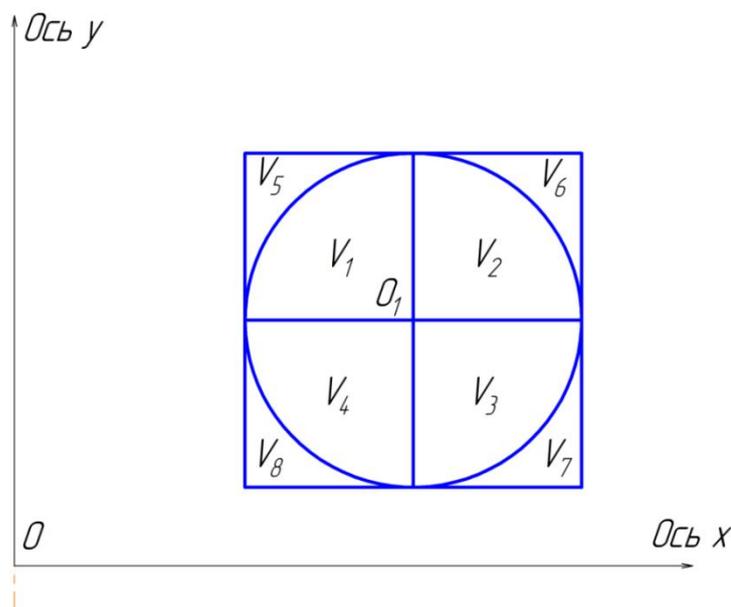


Рисунок 23 – Геометрическая проверка результатов расчета

Объем той же фигуры в Компасе $V = 1065917,393966 \text{ мм}^3$, при максимальной точности расчета.

В качестве второго контрольного примера рассчитаем объем тела вращения квадрат с отверстием в виде вписанной окружности.

$$V_{\text{кв_с отверстием}} = V_{\text{кв}} - V_{\text{тор}} = V_{\text{цилиндр2}} - V_{\text{цилиндр1}} - V_{\text{тор}}, \quad (16)$$

$$V_{\text{цилиндр2}} = 2R\pi(x_1+R)^2 = 1526814,0296446395138928446842738,$$

$$V_{\text{цилиндр1}} = 2R\pi(x_1-R)^2 = 169646,00329384883487698274269709,$$

$$V_{\text{кв_с отверстием}} = 291250,75103313994818173691359011.$$

Программный расчет той же фигуры следует провести с учетом равенства $V_6=V_7$ и $V_5=V_8$. $V_5 = 44538,3538759768$ и $V_6 = 101087,021640593$, тогда $V_{\text{общ}} = 291250,7510331396$.

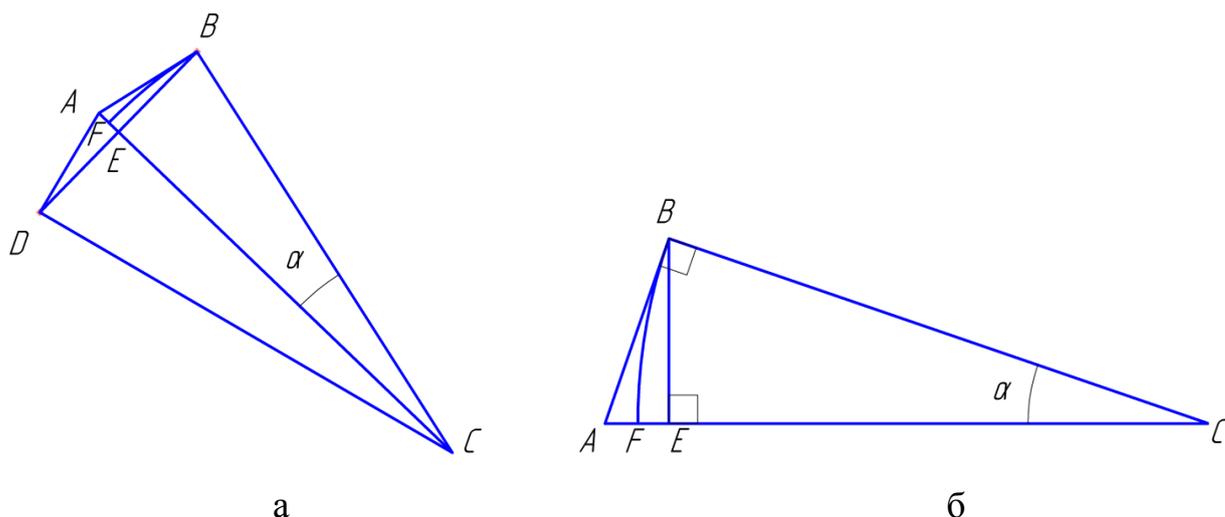
Объем той же фигуры в Компасе $V = 291250,740256 \text{ мм}^3$, при максимальной точности расчета, а так же разбиении окружности на четыре дуги, так как внутренняя полость не была построена при обычных настройках операции вращения.

2.2.5 Расчет объема тела вращения образованного двумя отрезками и дугой окружности

Даны: точки $B(x_2, y_2)$, $D(x_1, y_1)$, R – радиус и $C(x_c, y_c)$.

Предлагается не использовать точку C непосредственно для расчетов, а найти заново, с целью проверки расчетов и направления отрисовки дуги.

Как видно из рисунка 24, отрезки AB и AD является касательным к дуге (точка A может не являться точкой пересечения отрезков основной фигуры и её введение приведет к разбиению на фигуры отличные от начального построения). Отрезок $BC = R$, а $DB = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$.



а – общее описание; б – частное рассмотрение половины фигуры.

Рисунок 24 – Геометрическое описание задачи нахождения тела вращения образованного двумя отрезками и дугой окружности

Формула прямой в общем виде

$$y=kx+b, \quad (17)$$

где $k = \frac{y_2-y_1}{x_2-x_1}$, при этом для прямой перпендикулярной данной $k = -\frac{1}{k}$.

Координаты срединной точки E (x_5, y_5): $x_5 = \frac{x_1+x_2}{2}$, $y_5 = \frac{y_1+y_2}{2}$.

Для решения воспользуемся пошаговым переходом в полярные координаты, работы в них и возврата в декартовы координаты:

- 1) перенос точки O в точку O' (точка E);
- 2) переход в полярные координаты;
- 3) поворот отрезка A'C' до $\parallel OX$ (вращение через точку O');
- 4) расчет координат точке A' и C';
- 5) поворот отрезка A'C' до $\parallel AC$ (вращение через точку O');
- 6) переход в декартовы координаты;
- 7) перенос O'(точка E) в точку O.

Установим: точка C находится справа от отрезка DB, а отрезок проведен снизу вверх от точки D к точке B.

В случае нахождения координат точек A, C и F возможно приступить с четвертого шага алгоритма.

Получим следующие промежуточные формулы:

$$BE = 0,5 \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}, \quad (18)$$

$$\sin \alpha = \frac{BE}{R}, \quad \alpha = \arcsin \frac{BE}{R}, \quad (19)$$

$$EC = R \cdot \cos \alpha = R \cdot \cos(\arcsin 0,5 \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} / R), \quad (20)$$

$$AC = \frac{R}{\cos \alpha}, \quad (21)$$

$$FE = R - EC, \quad (22)$$

$$AE = AC - EC. \quad (23)$$

Тогда окончательные формулы с учетом $k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, k' = -\frac{1}{k}$. будут следующие:

$$x_A = \cos \operatorname{arctg} k + \frac{\pi}{2} \cdot AE + x_5, \quad (24)$$

$$y_A = \sin \operatorname{arctg} k + \frac{\pi}{2} \cdot AE + y_5, \quad (25)$$

$$x_F = \cos \operatorname{arctg} k + \frac{\pi}{2} \cdot FE + x_5, \quad (26)$$

$$y_F = \sin \operatorname{arctg} k + \frac{\pi}{2} \cdot FE + y_5, \quad (27)$$

$$x_C = \cos \operatorname{arctg} k - \frac{\pi}{2} \cdot EC + x_5, \quad (28)$$

$$y_C = \sin \operatorname{arctg} k - \frac{\pi}{2} \cdot EC + y_5. \quad (29)$$

Согласно математическим выкладкам площадь и геометрический центр кругового сегмента находятся по формулам:

$$S = 1/2R^2(2\alpha - \sin 2\alpha), \quad (30)$$

$$CM = \frac{DB^3}{12S} = \frac{8BE^3}{12S}. \quad (31)$$

Тогда объем искомой фигуры можно найти как разность объемов вращения треугольника ABD и кругового сегмента:

$$V_{иск} = V_{\text{треуг}ABD} - 2\pi(\sin(\alpha - \frac{\pi}{2}) \cdot (CM - EC) + x_5) \cdot S. \quad (32)$$

Если точка С находится справа от отрезка DB, а отрезок проведен снизу вверх от точки D к точке В, то вращение нужно будет произвести в другую сторону и формулы примут вид:

$$x_A = \cos \arctg k - \frac{\pi}{2} \cdot AE + x_5, \quad (33)$$

$$y_A = \sin \arctg k - \frac{\pi}{2} \cdot AE + y_5, \quad (34)$$

$$x_F = \cos \arctg k - \frac{\pi}{2} \cdot FE + x_5, \quad (35)$$

$$y_F = \sin \arctg k - \frac{\pi}{2} \cdot FE + y_5, \quad (36)$$

$$x_C = \cos \arctg k + \frac{\pi}{2} \cdot EC + x_5, \quad (37)$$

$$y_C = \sin \arctg k + \frac{\pi}{2} \cdot EC + y_5, \quad (38)$$

$$V_{иск} = V_{\text{треуг}ABD} - 2\pi(-\sin(\alpha - \frac{\pi}{2}) \cdot (CM - EC) + x_5) \cdot S. \quad (39)$$

Были проведены проверки значений представленные на рисунке 25.

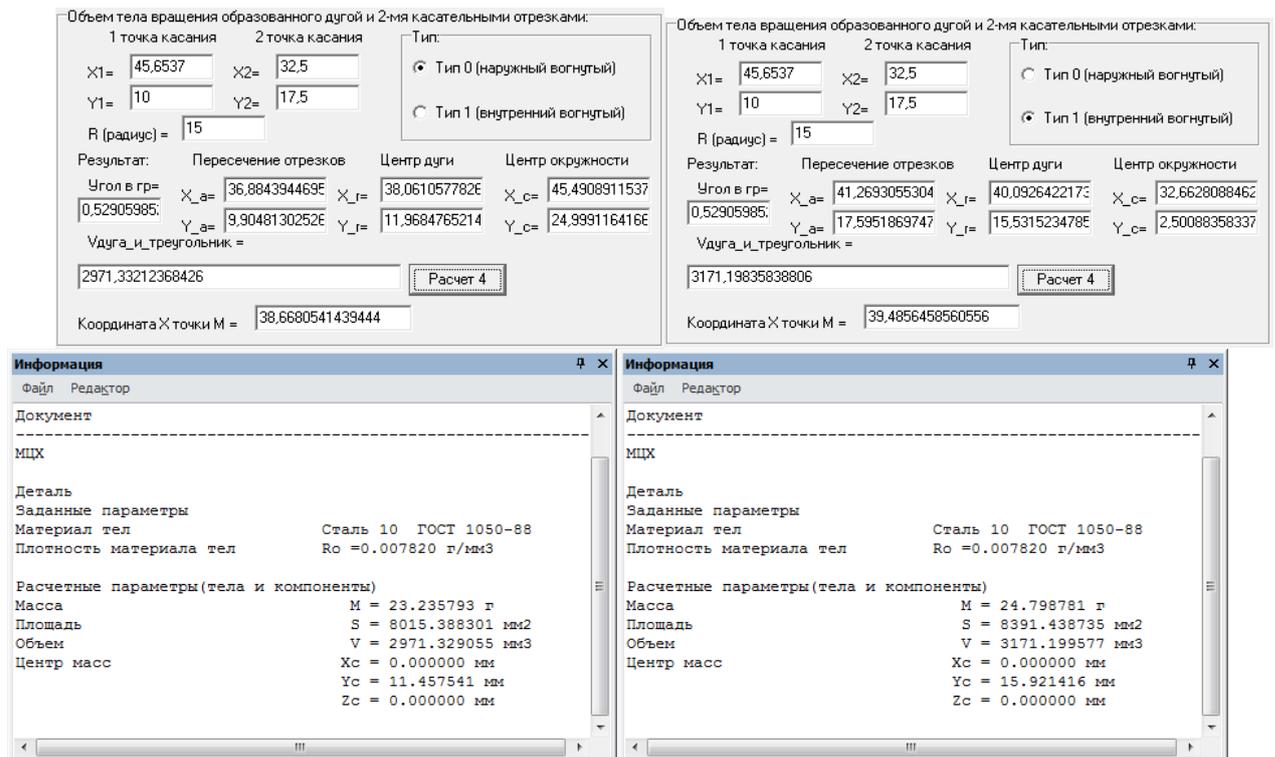


Рисунок 25 – Результаты расчета объема тела вращения образованного двумя отрезками и дугой окружности

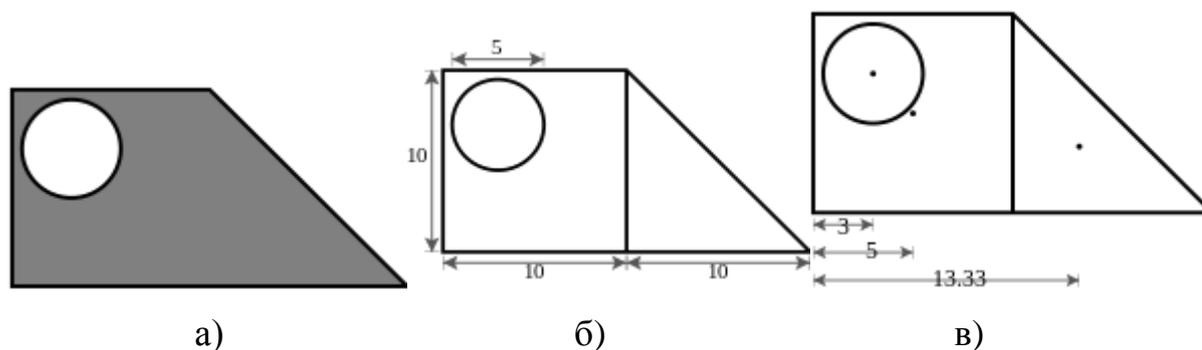
2.2.6 Нахождение центров масс с помощью геометрического разложения

Центр масс (барицентр) плоской фигуры X можно вычислить, разделив её на конечное число более простых фигур X_1, X_2, \dots, X_n , найдя положение барицентров G_i и площадей A_i каждой части, а затем вычислив

$$G_x = \frac{\sum G_{ix} A_i}{\sum A_i}, G_y = \frac{\sum G_{iy} A_i}{\sum A_i}. \quad (40)$$

Дыры в фигуре X , наложения частей, или части, выступающие за фигуру, можно рассматривать как фигуры с отрицательной площадью A_i . А именно, знак площади A_i нужно выбирать так, чтобы сумма знаков A_i для всех частей, включающих точку P , была равна 1, если P принадлежит X , и 0 в противном случае.

Например, фигуру (а) на рисунке 26 легко разделить на квадрат и треугольник с положительным знаком и круглое отверстие с отрицательным (б).



а - фигура на плоскости; б - разложение фигуры на простые элементы; в - центры масс элементов объекта.

Рисунок 26 – Расчет центр масс сложной фигуры

Центр масс (барицентр) каждой части легко найти в любом списке барицентров простых фигур (в). Затем вычисляется барицентр фигуры, как средневзвешенное трёх точек. Горизонтальное положение барицентра, считая от левого края фигуры, равно

$$x = \frac{5 \times 10^2 + 13.33 \times \frac{1}{2}10^2 - 3 \times \pi 2.5^2}{10^2 + \frac{1}{2}10^2 - \pi 2.5^2} \approx 8.5. \quad (41)$$

Вертикальное положение вычисляется аналогично.

Та же формула применима для любого трёхмерного объекта, только A_i обозначают уже объёмы частей тела X_i , а не площади. Формула верна также для пространства \mathbb{R}^d любой размерности d при замене площади d -мерными мерами частей.

3.2.7 Программное средство реализующее функции расчета объема тел вращения простейших геометрических фигур

Все функции расчета объединены в единый файл модуля с формой ввода-вывода данных представленной на рисунке 27.

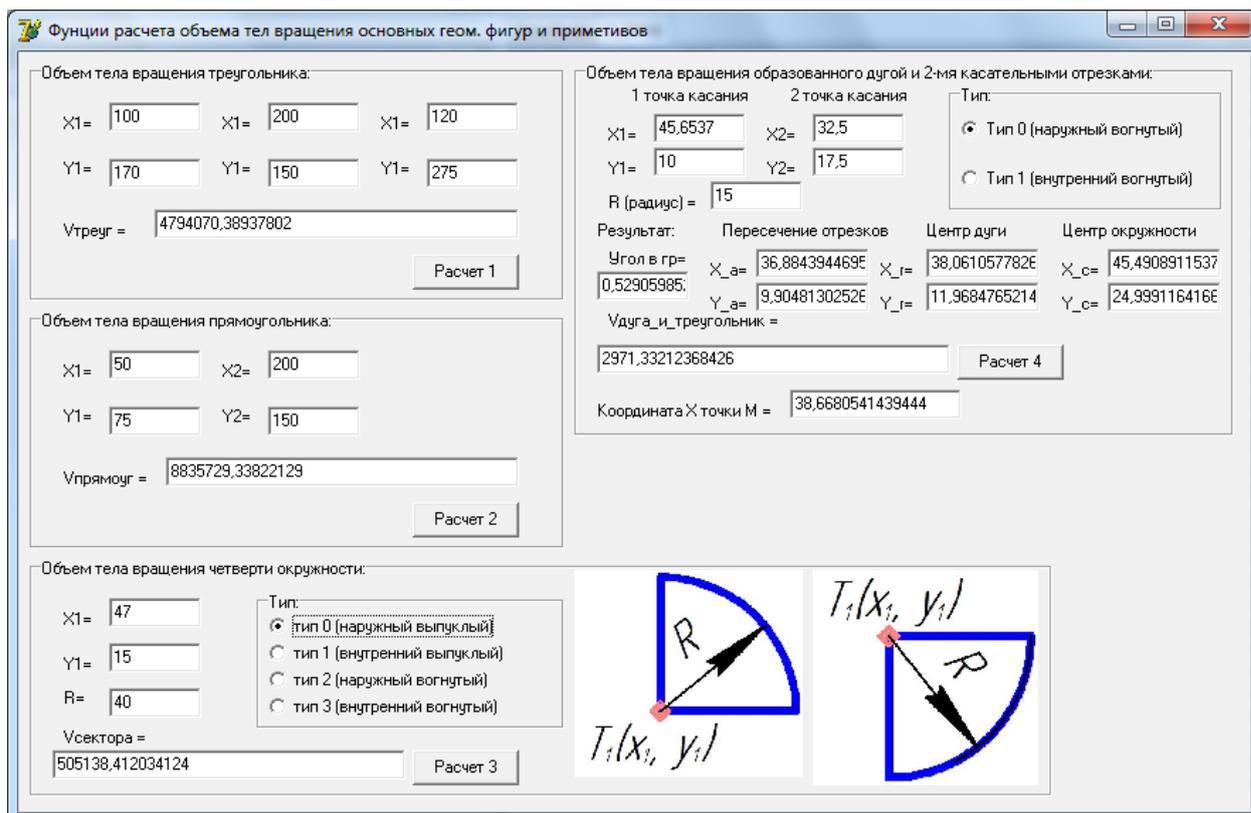


Рисунок 27 – Общая экранная форма

Прототипы функций расчета:

1) функция вычисления объема тела вращения треугольника относительно оси Y. Координаты вершин треугольника $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$

function V_treug($x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$:extended; **var** error:integer):extended;

2) функция вычисления объема тела вращения прямоугольника относительно оси Y

function V_prymoug(x_1, y_1, x_2, y_2 :extended; **var** error:integer):extended;

3) Функция расчета скругления (выпуклого и вогнутого) при соединении линий под углом 90°

regim:

0 - выпуклый наружу от оси вращения по Y

1 - выпуклый во внутрь от оси вращения по Y

2 - вогнутый наружу от оси вращения по Y

3 - вогнутый во внутрь от оси вращения по Y

x1, y1 - координаты пересечения линий (центр скругления)

R - радиус

function V_sector90(x1,y1,R: extended; regim: byte; **var** error:integer) : extended;

4) функция расчета фигуры ограниченной касательными и дугой, x1,y1,x2,y2 - координаты концов дуги, R - радиус, regim: 0 - центр дуги направлен в обратную сторону от оси вращения, 1 - центр дуги направлен к оси вращения, ugod, x_a, y_a, x_r, y_r, x_c, y_c, Mx - возвращаемые значения: пересечения касательных к дуге, середины дуги, центра дуги, координаты X геометрического центра сектора.

function V_dugi(x1,y1,x2,y2,R: extended; regim: byte; **var** ugod, x_a, y_a, x_r, y_r, x_c, y_c, Mx : extended; **var** error:integer):extended.

2.3 Проверка вычисления объема тестового образца «Изделие_A1»

Для проверки рассчитаем объем тела вращения, представленного на рисунке 28 по формуле

$$V_{\text{общ}} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 - V_5 + V_6 + V_7 + V_8 + V_9 + V_{10} + V_{11} + V_{12} + V_{13} + V_{14} + V_{15} + V_{16} + V_{17} + V_{18} + V_{19} + V_{20} + V_{21} + V_{22} - V_{23} - V_{24} - V_{25}. \quad (42)$$

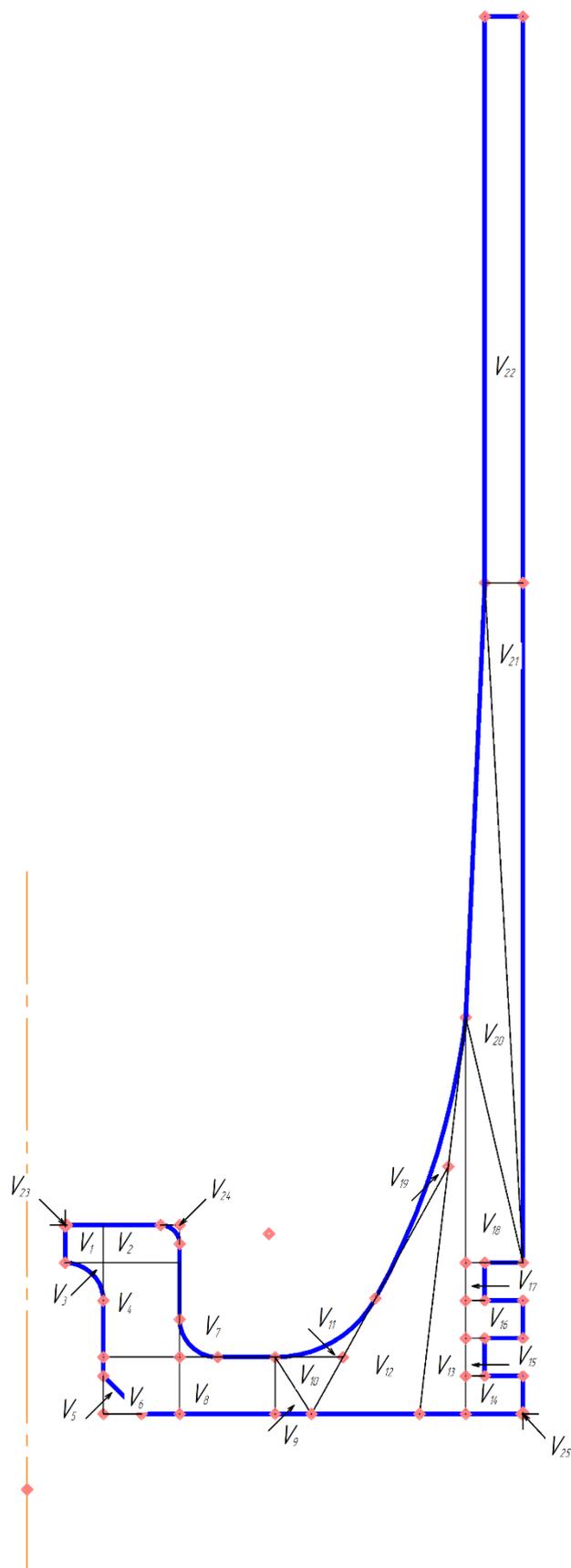


Рисунок 28 – Эскиз тела вращения тестового образца «Изделие_A1» с разделением на простейшие фигуры

Расчет:

$V_1 = 1178,09724509617$ – прямоугольник с диагональными вершинами $x_1(5, 30)$ и $x_2(10, 35)$;

$V_2 = 4712,38898038469$ – прямоугольник с диагональными вершинами $x_1(10, 35)$ и $x_2(20, 30)$;

$V_3 = 206,196082759152$ – сектор с центром в точке $C(5, 25)$ $R=5$ тип – наружный вогнутый;

...

$V_{24} = 57030,6025338292$ – сектор с центром в точке $C(17.5, 32.5)$ $R=2.5$ тип – наружный вогнутый.

Результаты расчета представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Данные и результаты расчета

Обозначение	Описание	Характеристики	Объем
V_1	прямоугольник с диагональными вершинами	$x_1(5, 30)$, $x_2(10, 35)$	1178,09724509617
V_2	прямоугольник с диагональными вершинами	$x_1(10, 35)$, $x_2(20, 30)$	4712,38898038469
V_3	сектор внутренний вогнутый	$C(10, 30)$ $R=5$	299,447582228938
V_4	прямоугольник с диагональными вершинами	$x_1(10, 17.5)$, $x_2(20, 30)$	11780,9724509617
V_5	треугольник	$x_1(10, 10)$, $x_2(10, 15)$, $x_3(10, 17.5)$	916,297857297023
V_6	прямоугольник с диагональными вершинами	$x_1(10, 17.5)$, $x_2(20, 10)$	7068,58347057703
V_7	сектор наружный вогнутый	$C(20, 17.5)$ $R=5$	711,839747747242
V_8	прямоугольник с диагональными вершинами	$x_1(20, 10)$, $x_2(32.5, 17.5)$	15462,5263418873
V_9	треугольник	$x_1(32.5, 10)$, $x_2(32.5, 17.5)$, $x_3(37.2730, 10)$	3833,91350840848
V_{10}	треугольник	$x_1(41.3838,$ $17.5)$, $x_2(32.5, 17.5)$, $x_3(37.2730, 10)$	7755,76586450904

Продолжение таблицы 4

Обозначение	Описание	Характеристики	Объем
V_{11}	дуга и 2 касательных отрезка	$x_1(45.6537, 10)$, $x_2(32.5, 17.5)$, $R=15$	3279,08763135072
V_{12}	треугольник	$x_1(37.2730, 10)$, $x_2(55.2161, 42.7366)$, $x_3(51.4331, 10)$	69864,4588206005
V_{13}	треугольник	$x_1(51.4331, 10)$, $x_2(57.5, 62.5)$, $x_3(57.5, 10)$	55512,9696525424
V_{14}	прямоугольник с диагональными вершинами	$x_1(57.5, 10)$, $x_2(65, 15)$	14431,6912524281
V_{15}	прямоугольник с диагональными вершинами	$x_1(57.5, 15)$, $x_2(60, 20)$	4614,21420996001
V_{16}	прямоугольник с диагональными вершинами	$x_1(57.5, 20)$, $x_2(65, 25)$	14431,6912524281
V_{17}	прямоугольник с диагональными вершинами	$x_1(57.5, 25)$, $x_2(60, 30)$	4614,21420996001
V_{18}	треугольник	$x_1(57.5, 30)$, $x_2(65, 30)$, $x_3(57.5, 62.5)$	45945,7925587507
V_{19}	дуга и 2 касательных отрезка	$x_1(45.6537, 10)$, $x_2(57.50, 62.50)$, $R=101.71$	8968,43707040673
V_{20}	треугольник	$x_1(60, 120)$, $x_2(65, 30)$, $x_3(57.5, 62.5)$	97945,6959603568
V_{21}	треугольник	$x_1(60, 120)$, $x_2(65, 30)$, $x_3(65, 120)$	89535,3906273091
V_{22}	прямоугольник с диагональными вершинами	$x_1(60, 120)$, $x_2(65, 195)$	147262,155637022
V_{23}	треугольник	$x_1(5, 35)$, $x_2(5, 34.8)$, $x_3(5, 35.2)$	0,63669611112753 1
V_{24}	сектор внутренний вогнутый	$C(20, 35) R=2.5$	163,84186402564
V_{25}	треугольник	$x_1(65, 10)$, $x_2(64.8, 10)$, $x_3(65, 10.2)$	8,15976331892389

Итого: $V_{\text{расч}} = 608120,3979 \text{ мм}^3$; $V_{\text{компас}} = 607682.183269 \text{ мм}^3$.

$$V_{\text{разность}} = 438,2178942 \text{ мм}^3 (0.072\%).$$

2.4 Автоматизация процесса профилирования пуансонов вытяжки с утонением

2.4.1 Постановка задачи профилирования пуансонов

При расчете инструментов для производства цилиндрических цельнотянутых изделий методом глубокой вытяжки одним из этапов является этап профилирования пуансонов, используемых на каждой из вытяжных операций. В работе [19] говорится, что «эмпирическое доведение профиля пуансона в целях предотвращения пооперационного появления складок и гофрообразований» является неотъемлемой составляющей данного процесса. Однако, эмпирическое доведение профиля пуансона требует значительных временных и материальных затрат. Более того, данные, полученные вручную человеком не могут быть использованы для построения моделей пуансонов без предварительной обработки, так как современные системы автоматизированного проектирования (САПР) требуют данных с высокой точностью для построения трехмерных моделей пуансонов. Схема профилирования для трех пуансонов глубокой вытяжки с утонением приведена на рисунке 29.

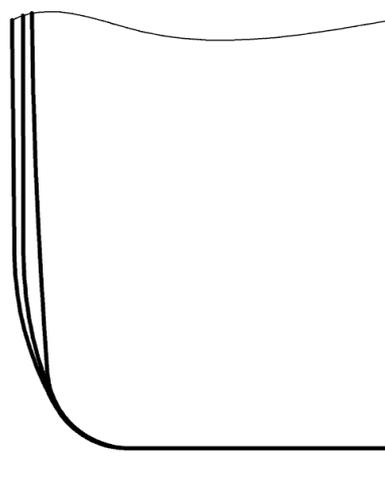


Рисунок 29 – Схема профилирования для трех пуансонов глубокой вытяжки с утонением

В результате профилирования необходимо добиться такой схемы, при которой выполняется условие вписываемости и, по возможности, обеспечиваются близкие к одному значению расстояния между линиями границ профиля.

Проведение расчетов по известным методикам предполагает определение недостающих данных вручную графическим способом. Существенным недостатком такого подхода является невозможность автоматизации процесса расчета полного профиля каждого из пуансонов. Рассмотрим подробно процесс определения точек сопряжения при профилировании пуансонов.

2.4.2 Решение задачи профилирования пуансонов

Задача 1 (частный случай). При конусе пуансона с углом $\tau = 0$ (цилиндр) рисунок 2.

Дано:

- r – радиус первой дуги ближней к плоскому дну пуансона;
- h_2 – высота расположения точки сопряжения конуса со второй дугой;
- $\Delta d = (d_2 - d_1)/2$ – разность радиусов точки сопряжения второй дуги с конусом и точки сопряжения двух дуг.

Найти:

- R – радиус второй дуги (это минимально необходимая информация добавляемая к исходным данным для построения сопряжения в САПР КОМПАС-3D);
- углы α и β (для проверки построения);
- высоту точки сопряжения дуг (координата по оси X уже известна).

Произведем переход к геометрическому построению на основе известных законов сопряжения дуг и линий, оформим построение с хордами без изображения дуг (рисунок 47).

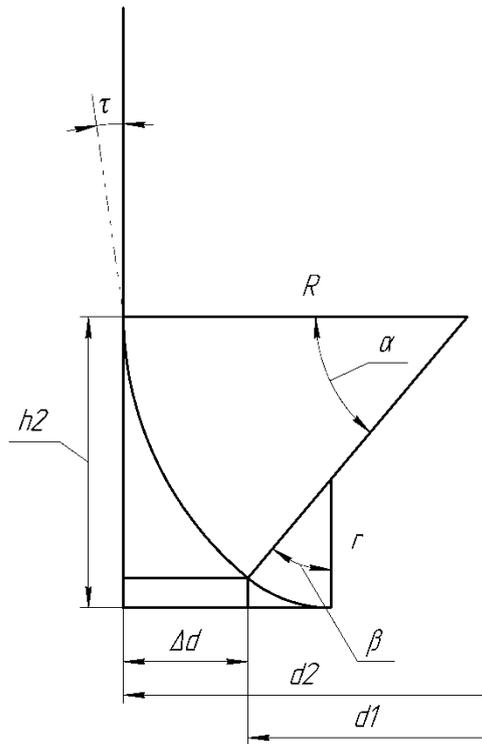


Рисунок 30 – Сопряжение двух дуг, известные и искомые данные

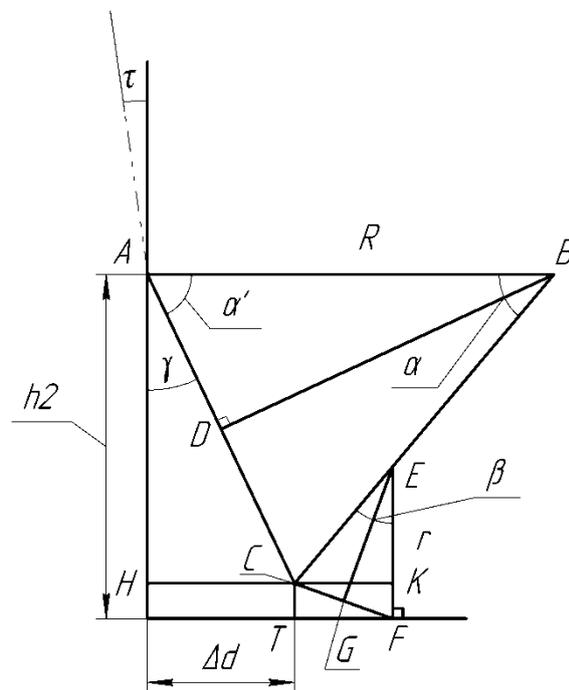


Рисунок 31 – Построение при $\tau=0$ с хордами без изображения дуг

Лемма 1. Сумма углов $\alpha+\beta=\pi/2$ при $\tau=0$.

Доказательство. Действительно, если произвести перемещение центра первой

дуги с радиусом r в точку центра второй дуги с радиусом R , то они образуют прямой угол (рисунок 32).

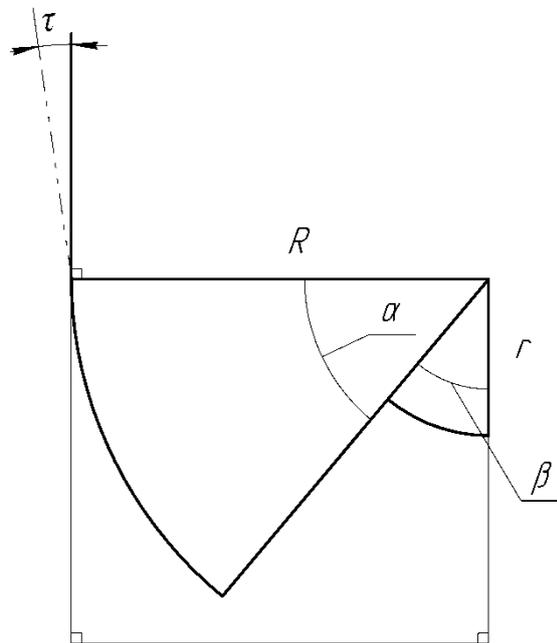


Рисунок 32 – Построение дуг с центром в одной точке

Тогда возможно выразить угол

$$\beta = \pi/2 - \alpha. \quad (43)$$

Отрезок

$$AH = \frac{\Delta d}{\tan(\gamma)} = \frac{\Delta d}{\tan(\frac{\alpha}{2})}. \quad (44)$$

Так как угол

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \alpha' = \frac{\pi}{2} - \left(\pi - \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} \right) = \frac{\alpha}{2},$$

то можно выразить формулу 2 через угол α .

Зная значение $h2$ его можно выразить через сумму отрезков $АН$ и $СТ$, однако, с практической точки зрения последний отрезок будет заменен на KF .

$$h1 = CT = KF = r - EK = r - r \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) = r(1 - \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right)), \quad (45)$$

где

$$EK = r \cos \beta = r \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right). \quad (46)$$

Тогда получим выражение с одной неизвестной переменной

$$h2 = \frac{\Delta d}{\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} + r(1 - \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right)). \quad (47)$$

Полученное выражение (47) не позволяет аналитически вычислить угол α , значение которого позволяет вычислить все остальные неизвестные для построения сопряжения дуг. Проведение вычислений через нахождение площадей секторов представляется ещё менее эффективным. Тем не менее, полученное выражение позволяет выполнить приближенное вычисление одним из численных методов, например, методом золотого сечения.

Выражения для нахождения R , угла β , $h1=CT$ целесообразно вывести для полной задачи.

Перейдем к постановке полной задачи.

Задача 2 (общий случай). При конусе пуансона с углом $\tau \geq 0$ (конус) рисунок 33.

Дано:

- r – радиус первой дуги ближней к плоскому дну пуансона;
- $h2$ – высота расположения точки сопряжения конуса со второй дугой;
- $\Delta d = (d2-d1)/2$ – разность полудиаметров точки сопряжения второй дуги с конусом и точки сопряжения двух дуг;
- τ – угол конуса, то есть угол линии (относительно вертикали), с которой со-

прягается вторая дуга.

Найти:

- R – радиус второй дуги;
- углы α и β ;
- высоту точки сопряжения дуг.

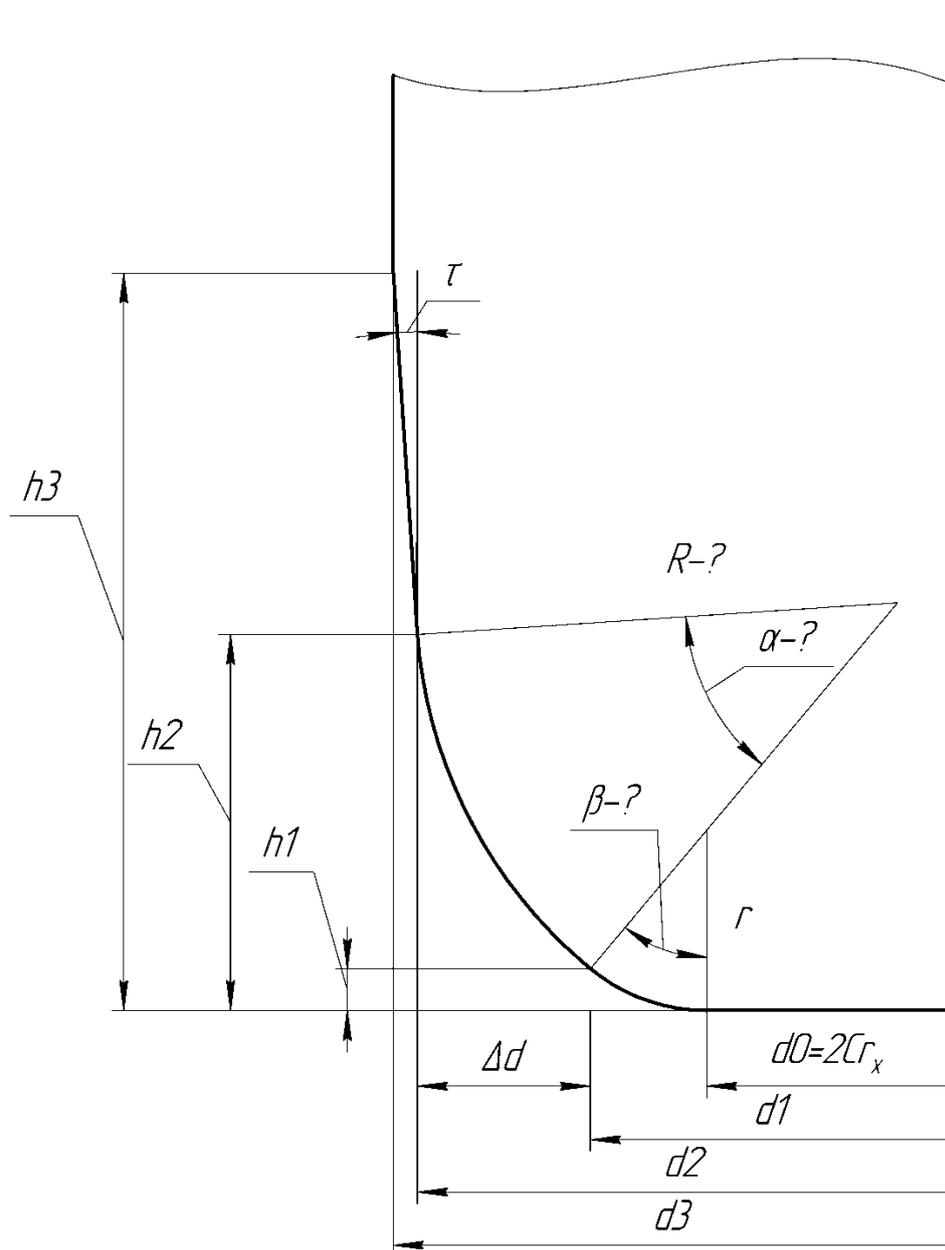


Рисунок 33 – Сопряжение двух дуг при угле конуса τ , известные и искомые данные

Как и в предыдущем случае, произведем переход к геометрическому построению на основе известных законов сопряжения дуг и линий, оформим построение с

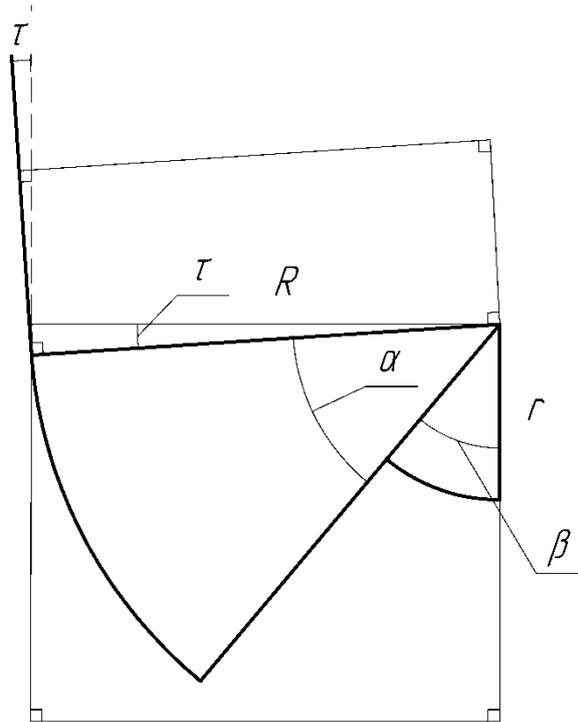


Рисунок 35 – Построение дуг с центром в одной точке, при конусе с углом τ

Так как угол

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \alpha' + \tau = \frac{\pi}{2} - \left(\pi - \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} \right) + \tau = \frac{\alpha}{2} + \tau,$$

то можно выразить формулу 47 через углы α и τ .

Зная значение h_2 его можно выразить через сумму отрезков AN и CT , однако, с практической точки зрения последний отрезок будет заменен на KF .

$$h_1 = CT = KF = r - EK = r - r \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha - \tau \right) = r \left(1 - \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha - \tau \right) \right), \quad (50)$$

где

$$EK = r \cos \beta = r \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha - \tau \right). \quad (51)$$

Тогда получим в общем виде выражение с одной неизвестной переменной

(угол α)

$$h_2 = \frac{\Delta d}{\tan(\frac{\alpha}{2} + \tau)} + r(1 - \cos \frac{\pi}{2} - \alpha - \tau). \quad (52)$$

Найдем радиус второй дуги

$$R = \frac{AD}{\sin(\frac{\alpha}{2})} = \frac{\Delta d}{2 \cdot \sin(\frac{\alpha}{2}) \cdot \sin(\frac{\alpha}{2} + \tau)}, \quad (53)$$

где

$$AD = \frac{1}{2} \cdot AC = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta d}{\sin(\gamma)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta d}{\sin(\frac{\alpha}{2} + \tau)}. \quad (54)$$

А так же найдем координату точки сопряжения первой дуги с торцом пуансона по оси X

$$Cr_x = \frac{d_1}{2} - r \cdot \sin(\beta). \quad (55)$$

Из-за особенности ввода исходных данных оказалось, что угол наклона конуса так же неизвестен и должен быть вычислен через задание высоты расположения верхней точки конуса h_3 и диаметра инструмента на этой высоте d_3 (рисунок 33), а так же уже известных значений по точке сопряжения второй дуги и конуса (h_2 и d_2):

$$\tau = \arctan\left(\frac{(d_3 - d_2)}{2 \cdot (h_3 - h_2)}\right) \quad (56)$$

Таким образом, получены все необходимые для построения и проверки данные, рассчитываемые после получения значения угла α .

Применим метод золотого сечения для нахождения угла α приближенно. Это один из наиболее простых в реализации алгоритмов, дающий быструю сходимость

ряда. Метод может быть применен, так как функция гладкая, непрерывная и не имеет периодических повторений на искомом диапазоне $\alpha \in (0, \frac{\pi}{2} - \tau)$.

Так как по результатам предварительных расчетов известно значение h_2 , то на основе выражения (53) сформулируем целевую функцию с учетом (57).

$$f(\alpha) = \frac{\Delta d}{\tan(\frac{\alpha}{2} + \arctan(\frac{d_3 - d_2}{2 \cdot (h_3 - h_2)})} + r \cdot 1 - \cos \frac{\pi}{2} - \alpha - \arctan \frac{d_3 - d_2}{2 \cdot h_3 - h_2} - h_2 \rightarrow 0. \quad (57)$$

Схема алгоритма метода золотого сечения представлена на рисунке 36.

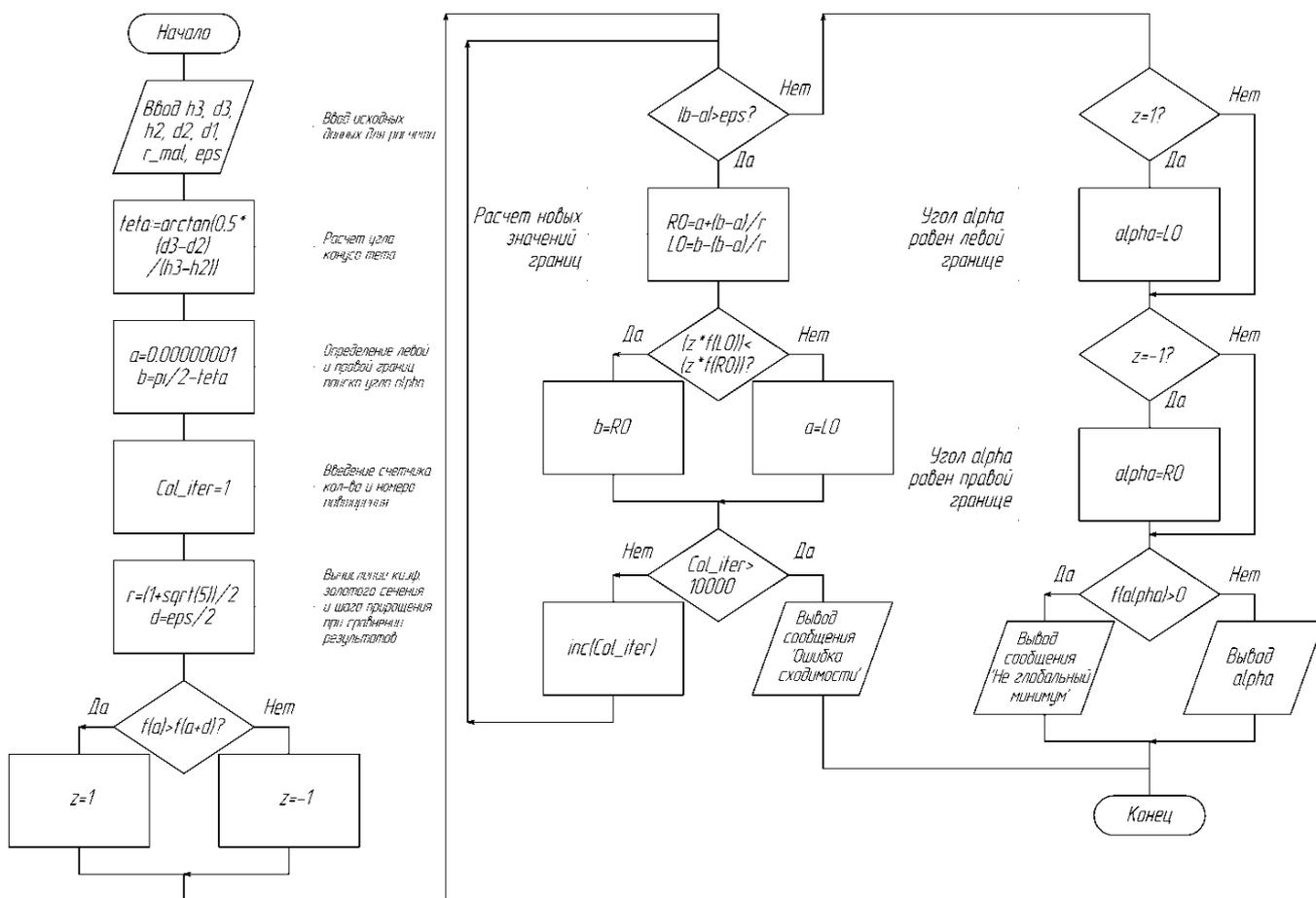


Рисунок 36 – Алгоритм реализации метода золотого сечения

Результат работы алгоритма показывает, что сходимость левой и правой границы наступает в среднем через 72-74 итерации, а вычислительная сложность алго-

ритма не превышает одной секунды.

Таким образом, получены все данные с достаточной точностью для программного построения трехмерных моделей пуансонов в САПР КОМПАС-3D. Разработанное математическое обеспечение позволяет полностью исключить этап подбора геометрии пуансона вручную на основе расчетных данных. Следующим этапом является проверка полученных инструментов в одной из САЕ-систем, предназначенных для анализа процессов обработки металлов давлением [47, 39].

2.5 Моделирование процессов автоматизированного проектирования инструментов холодного выдавливания

Объемные детали характеризуются геометрической формой и размерами, точностными требованиями, качеством поверхности и физико-механическими свойствами материала.

Выявим независимые переменные, то есть регрессоры и предикторы, и критериальные зависимые переменные.

В процессе изготовления детали важное значение имеют геометрические параметры. Например, в зависимости от высоты (размера) исходной заготовки отдельные стадии процесса могут отсутствовать или может изменяться их протяженность. Изменяются структура и продолжительность стадий процесса в зависимости от геометрической формы и размеров деформируемой детали.

Механизм деформирования определяется:

- геометрической формой и размерами детали;
- схемой процесса;
- температурно-скоростным фактором;
- условиями внешнего трения, контактными условиями.

Вследствие этого необходимо провести декомпозицию модели возможной САПР ТП для процессов холодного выдавливания в виде IDEF0.

Декомпозиция модели представлена на рисунке 37.

В качестве входных параметров учитываются геометрические параметры изделия, материал изделия, информация об оборудовании, свойства конечного изделия.

Из документации необходима нормативная документация, а также СТП.

Исходя из данных, представленных выше, можно сказать, что при моделировании данной САПР ТП осуществляется выполнение следующих этапов:

- разработка подсистемы ввода данных;
- разработка подсистемы проектирования ТП;
- разработка подсистемы формирования параметров ТП;
- разработка подсистемы проектирования 3D-моделей инструментов.

Таким образом, в качестве выходных параметров мы будем иметь параметры ТП, а также 3D-модели инструментов.

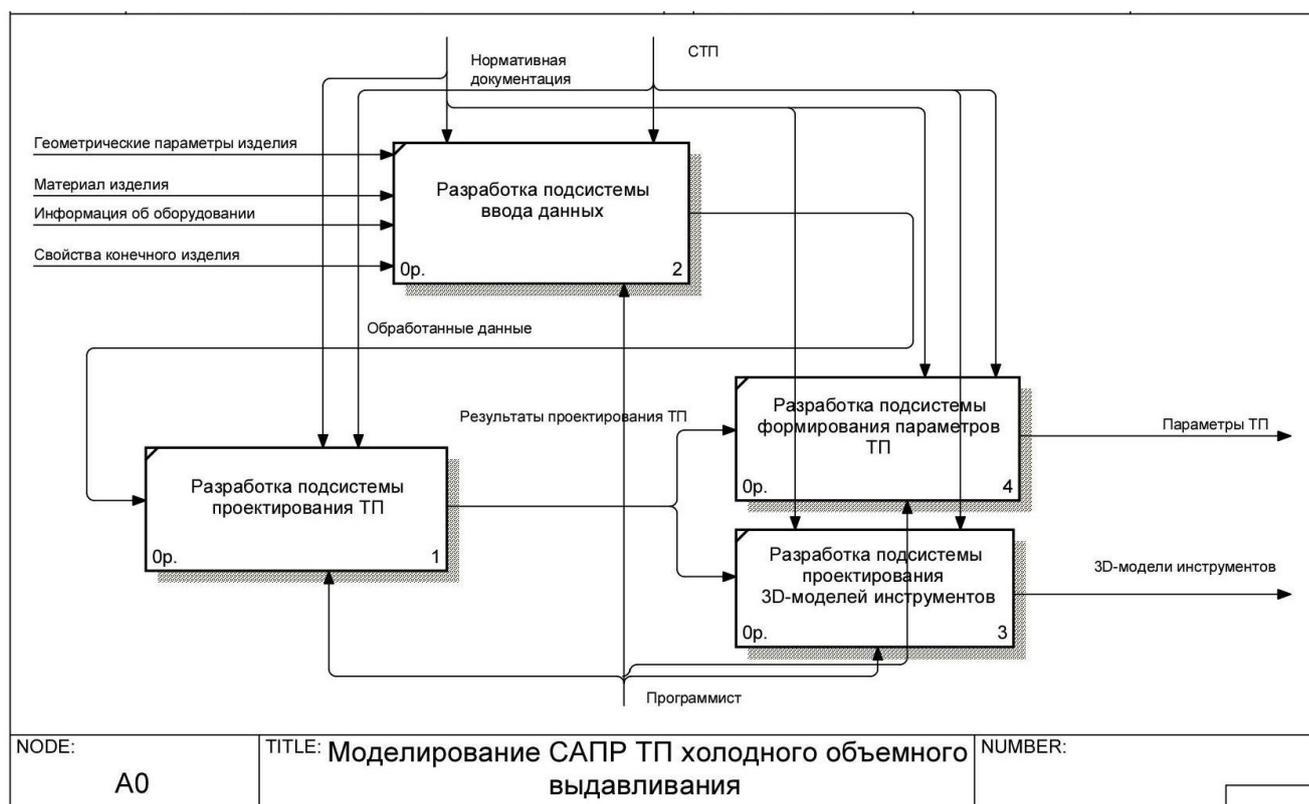


Рисунок 37 –Моделирование САПР ТП холодного объемного выдавливания

Далее промоделируем организационные процессы проектирования инструментов и изготовления деталей методом холодного выдавливания при помощи UML-диаграммы последовательности (interaction diagrams).

Данные диаграммы описывают взаимодействие групп объектов в различных условиях их поведения. UML определяет диаграммы взаимодействия нескольких типов, из которых наиболее употребительными являются диаграммы последовательности.

Обычно диаграмма последовательности описывает один сценарий. На диаграмме показаны экземпляры объектов и сообщения, которыми обмениваются объекты в рамках одного прецедента.

Типичный технологический процесс, включающий проектирование инструментов и изготовление деталей методом холодного выдавливания, включает следующие «действующие лица» (UML interaction actor): технологический отдел; технолог; САПР; Компас 3D; цех; отдел работы с заказчиком.

Целью настройки технологии производства продукции, несомненно, является настройка цепочки, при которой изделия будут с наименьшими затратами времени попадать в отдел работы с заказчиком и не возвращаться на первый этап. Для этого, в частности, необходим быстрый и точный автоматизированный контроль на ключевых этапах производства.

Таким образом объект, в виде программного обеспечения, позволяющего автоматизировать процессы контроля и обработки его результатов является опциональным, но в то же время ключевым для общей модели организационно-производственных процессов. UML-диаграмма представлена на рисунке 38.

Технологический отдел предоставляет необходимую документацию технологу. Технолог в свою очередь осуществляет расчеты или в ручную, на что уйдет значительная часть времени, или с помощью САПР. После расчетов все параметры передаются в КОМПАС 3-D, после чего набор чертежей передается в технологический отдел. Далее технологический отдел передает комплект документов в цех для изготовления детали методом холодного выдавливания.

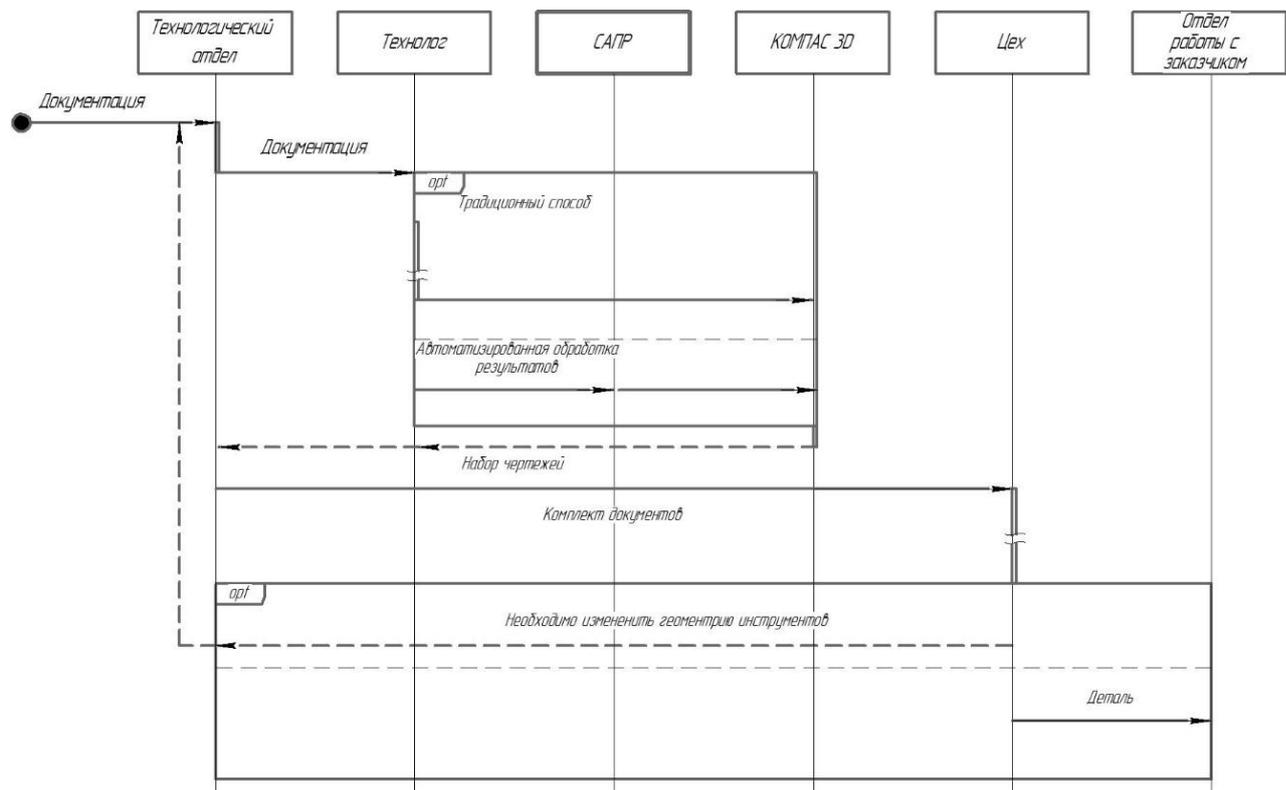


Рисунок 38 –UML-диаграмма последовательности

Возврат в технологический отдел слева внизу диаграммы отображает действия в случае неправильного изготовления детали, связанных с указанием неточных параметров геометрии инструмента, иначе деталь передается в отдео по работе с заказчиком.

3 Разработка обеспечений САПР

3.1 Методическое обеспечение

Методическое обеспечение САПР это документы, в которых отражены состав, правила отбора и эксплуатации средств автоматизированного проектирования, методики проектирования. Представим данный вид обеспечения в виде методики IDEF0. Функциональный блок IDEF0 графически изображается в виде прямоугольника и олицетворяет собой некоторую конкретную функцию в рамках рассматрива-

емой системы. По требованиям стандарта название каждого функционального блока должно быть сформулировано в глагольном наклонении.

Каждая из четырех сторон функционального блока имеет своё определенное значение, при этом:

- верхняя сторона имеет значение «Управление»;
- левая сторона имеет значение «Вход»;
- правая сторона имеет значение «Выход»;
- нижняя сторона имеет значение «Механизм».

Каждый функциональный блок в рамках единой рассматриваемой системы должен иметь свой уникальный идентификационный номер.

Вторым важным моментом методологии IDEF0 является понятие интерфейсные дуги. Также интерфейсные дуги часто называют потоками или стрелками. Интерфейсная дуга отображает элемент системы, который обрабатывается функциональным блоком или оказывает иное влияние на функцию, отображенную данным функциональным блоком. Графическим отображением интерфейсной дуги является однонаправленная стрелка. Каждая интерфейсная дуга должна иметь свое уникальное наименование. По требованию стандарта, наименование должно быть оборотом существительного.

С помощью интерфейсных дуг отображают различные объекты, в той или иной степени определяющие процессы, происходящие в системе. Такими объектами могут быть элементы реального мира или потоки данных и информации.

Наглядность графического языка IDEF0 делает модель вполне читаемой и для лиц, которые не принимали участия в проекте ее создания, а также эффективной для проведения показов и презентаций. В дальнейшем, на базе построенной модели могут быть организованы новые проекты, нацеленные на производство изменений на предприятии.

Методология IDEF0 в некоторой степени напоминает рекомендации, существующие в книгоиздательском деле, часто набор напечатанных моделей IDEF0 организуется в брошюру (называемую в терминах IDEF0 комплект), имеющую содержание, глоссарий и другие элементы, характерные для законченной книги.

Контекстный функциональный блок для данной разработки имеет название «Разработка системы автоматизированного проектирования инструментов холодной прессовой обработки осесимметричных изделий» (рисунок 39). Управляющим воздействием для данного функционального блока является нормативная документация. Входными данными служат:

- геометрические параметры изделий;
- материалы изделий;
- информация об оборудовании;
- механические свойства конечных изделий.

При построении модели рассматривалась точка зрения разработчика.

Декомпозиция контекстной диаграммы (рисунок 56) включает в себя следующие блоки:

- «Разработка модуля проектирования матриц объемной штамповки»;
- «Разработка модуля проектирования пуансонов»;
- «Разработка модуля проектирования операций обжима».

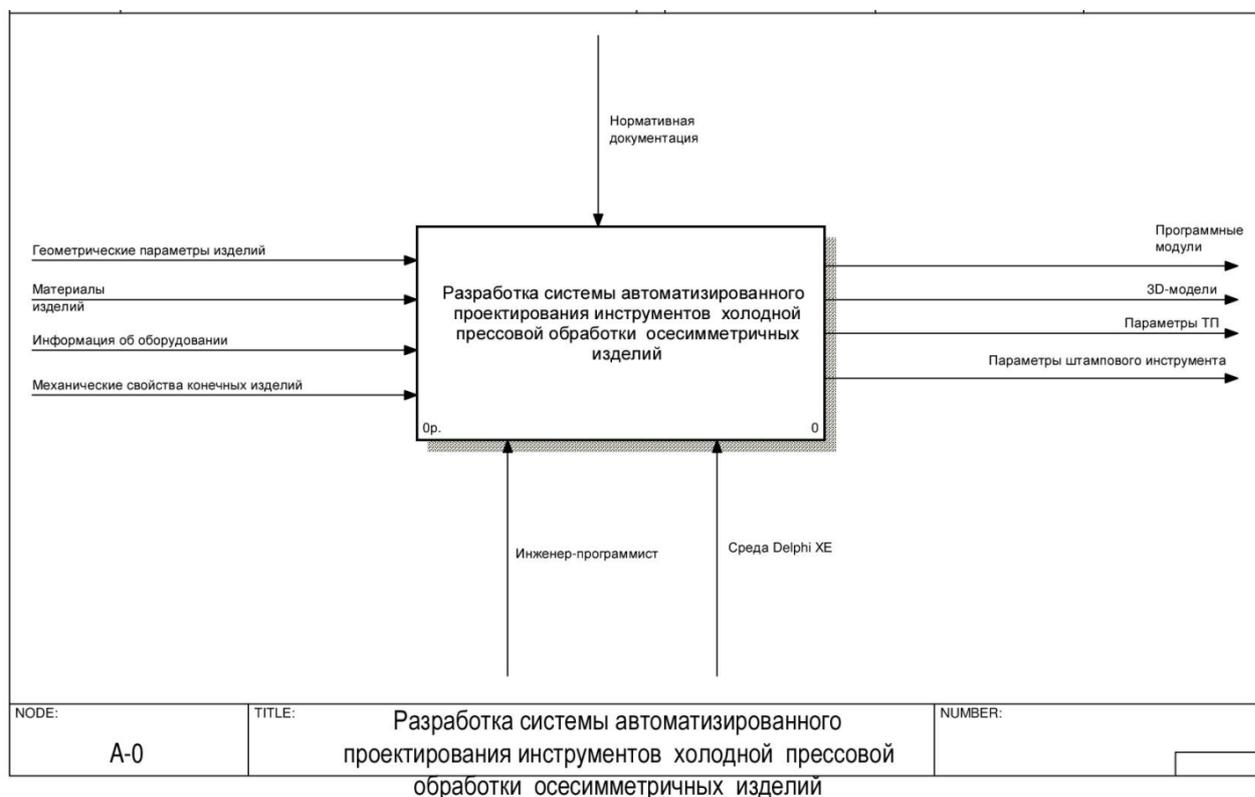


Рисунок 39 – Диаграмма «Разработка системы автоматизированного проектирования инструментов холодной прессовой обработки осесимметричных изделий»

В свою очередь, возможно подвергнуть декомпозиции блоки «Разработка модуля проектирования матриц объемной штамповки» и «Разработка модуля проектирования операций обжима». Первая из декомпозиций (рисунок 41) будет включать следующие блоки:

- организация ввода данных;
- разработка алгоритма расчета параметров инструментов;
- разработка алгоритма формирования 3D-моделей матриц.

Декомпозиция блока по вводу данных об оборудовании может состоять из следующих блоков:

- организация ввода входных данных;
- разработка алгоритма расчета количества операций;
- разработка алгоритма расчетов диаметров обжимных матриц (рисунок 41).

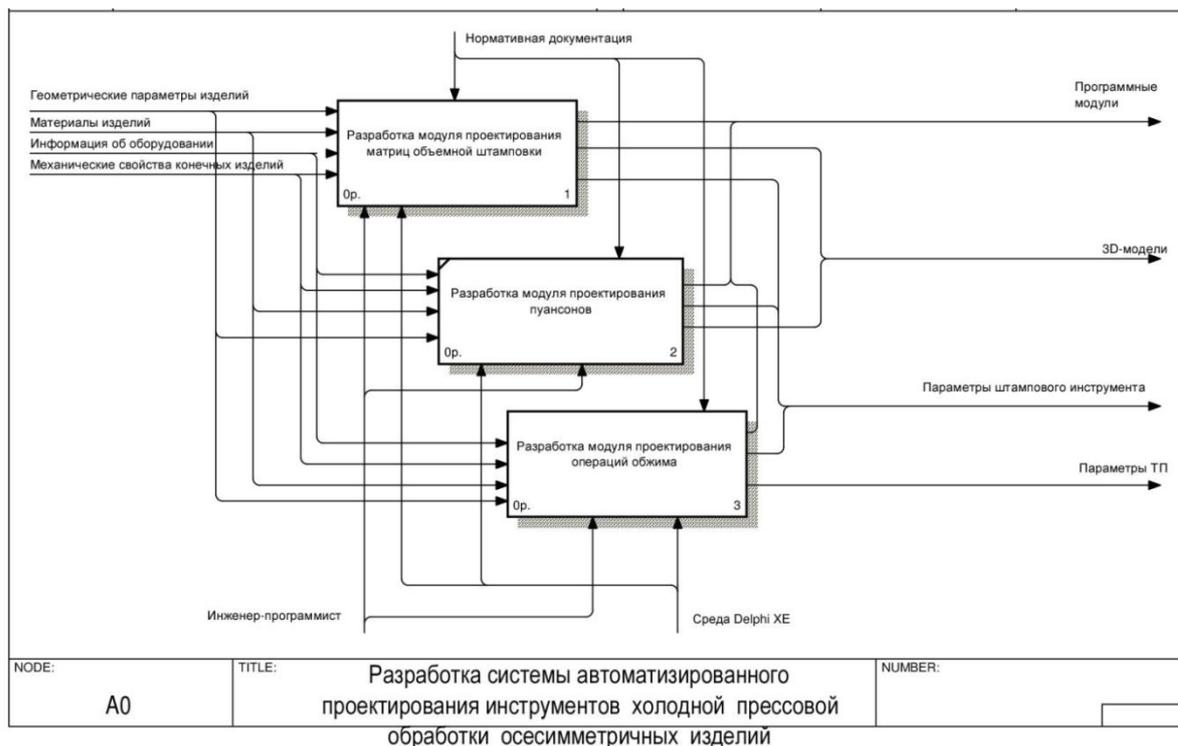


Рисунок 40 – Декомпозиция контекстной диаграммы

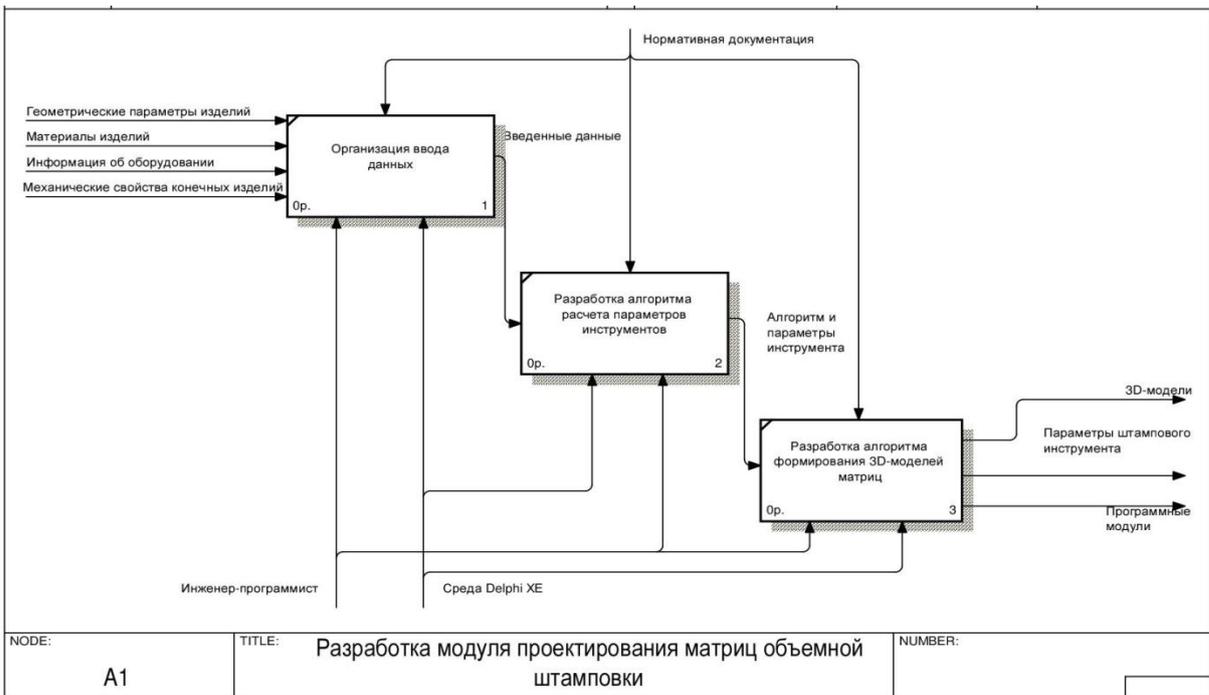


Рисунок 41 – Диаграмма разработки модуля ввода данных о заготовке

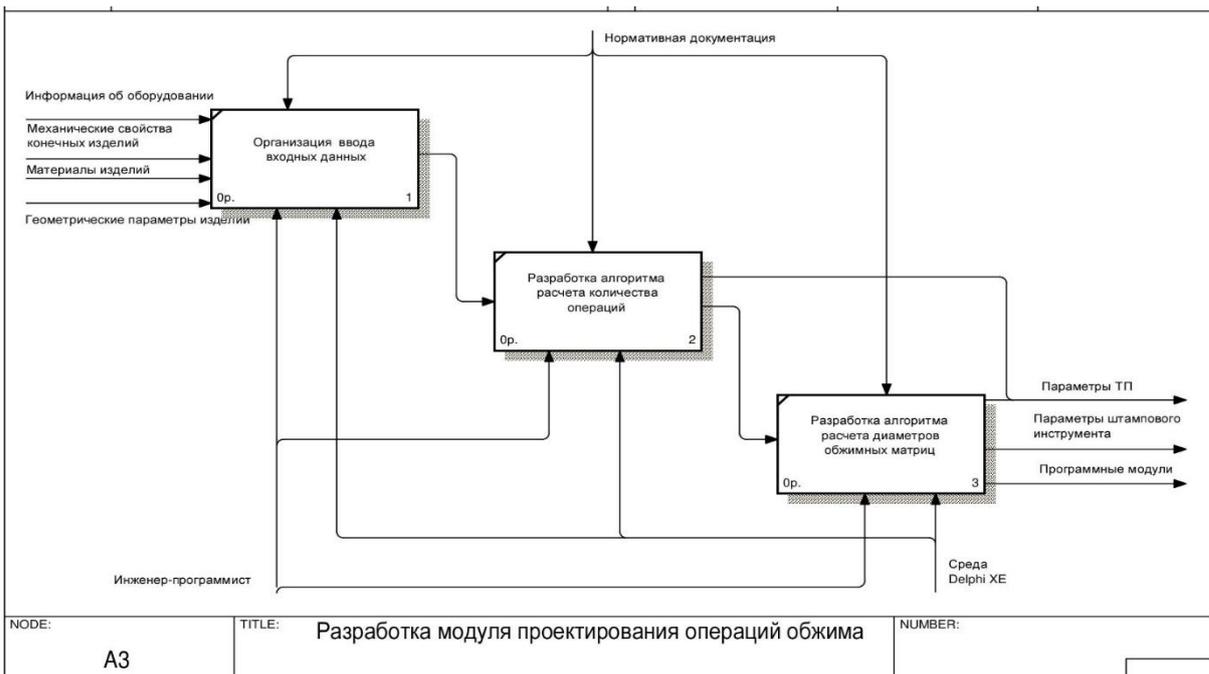


Рисунок 42 – Диаграмма разработки модуля ввода данных по оборудованию

3.2 Информационное обеспечение

Информационное обеспечение (ИО) – совокупность сведений, необходимых для выполнения проектирования. Состоит из описания стандартных проектных процедур, типовых проектных решений, комплектующих изделий и их моделей, правил и норм проектирования. Основная часть ИО САПР – базы данных.

Вся информация, описанная формализовано, составляет информационное обеспечение. Формы представления его могут быть различными: от элементарных справочных таблиц до описаний с использованием проблемно - ориентированных языков.

Процесс создания информационной модели начинается с определения концептуальных требований ряда пользователей. Концептуальные требования могут определяться и для некоторых задач (приложений), которые в ближайшее время реализовывать не планируется. Это может повысить трудоемкость работы, однако поможет наиболее полно учесть все нюансы функциональности, требуемой для разрабатываемой программы автоматизированного определения целесообразной последовательности выполнения отдельных переходов, и снизит вероятность ее переделки в дальнейшем. Требования отдельных пользователей интегрируются в едином «обобщенном представлении», называемом концептуальной моделью.

Концептуальная модель представляет собой объекты и их взаимосвязь без указания способов их физического хранения.

Таким образом, при проектировании концептуальной модели все усилия направляются на структуризацию данных и выявление взаимосвязей между ними без рассмотрения особенностей реализации и вопросов эффективности обработки.

Внешние модели никак не связаны с типом физической памяти, в которой будут храниться данные, и с методами доступа к этим данным. Это положение отражает первый уровень независимости данных.

Модули программы и их связи можно описать посредством представления информационного обеспечения в виде UML-диаграммы компонентов программного продукта.

Унифицированный язык моделирования (UML) – это универсальный язык визуального моделирования систем. Хотя чаще всего UML ассоциируется с моделированием программных систем, он имеет намного более широкое применение благодаря свойственной ему расширяемости. UML объединил лучшие современные технические приемы моделирования и разработки программного обеспечения. По сути, язык UML был задуман так, чтобы его можно было реализовать посредством его же инструментальных средств. Фактически это признание того, что большие современные программные системы, как правило, нуждаются в инструментальной поддержке. UML диаграммы легко воспринимаются и при этом без труда генерируются компьютерами.

В UML модели есть два аспекта:

- статическая структура – описывает, какие типы объектов важны для моделирования системы и как они взаимосвязаны;
- динамическое поведение – описывает жизненные циклы этих объектов и то, как они взаимодействуют друг с другом для обеспечения требуемой функциональности системы.

Диаграмма компонентов (Component diagram) — статическая структурная диаграмма, показывает разбиение программной системы на структурные компоненты и связи (зависимости) между компонентами. В качестве физических компонентов могут выступать файлы, библиотеки, модули, исполняемые файлы, пакеты и тому подобное.

UML-диаграмма компонентов программного продукта для данной разработки представлена на рисунке 43.

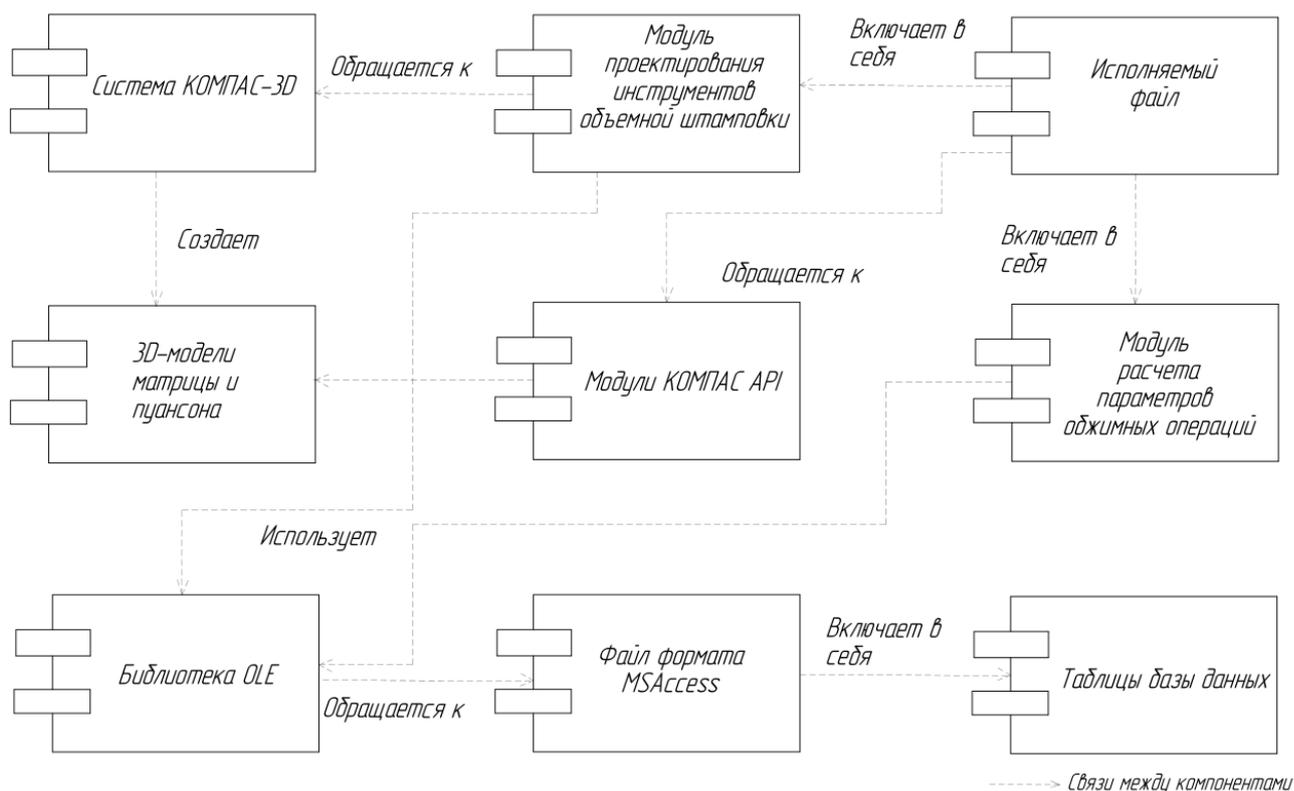


Рисунок 43 – UML-диаграмма компонентов программного продукта

Компоненты связываются через зависимости, когда соединяется требуемый интерфейс одного компонента с имеющимся интерфейсом другого компонента. Таким образом, иллюстрируются отношения клиент-источник между двумя компонентами.

Зависимость показывает, что один компонент предоставляет сервис, необходимый другому компоненту. Зависимость изображается стрелкой от интерфейса или порта клиента к импортируемому интерфейсу.

Когда диаграмма компонентов используется, чтобы показать внутреннюю структуру компонентов, предоставляемый и требуемый интерфейсы составного компонента могут делегироваться в соответствующие интерфейсы внутренних компонентов.

Делегация показывается связь внешнего контракта компонента с внутренней реализацией этого поведения внутренними компонентами:

– исполняемый файл включает в себя модуль проектирования матриц свертки, который обращается к системе Компас 3D и создает 3D-модель. Также данный модуль использует библиотеку OLE, обращается к файлу формата MSAccess и включает в себя таблицы базы данных;

– исполняемый файл обращается к модулю Компас API и создает 3D-модели;

– исполняемый файл включает в себя модуль проектирования обжимных матриц, который обращается к системе Компас 3D и создает 3D-модель. Также данный модуль использует библиотеку OLE, обращается к файлу формата MSAccess и включает в себя таблицы базы данных (хранение механические свойства материалов: плотности, значения коэффициентов деформации).

3.3 Особенности холодных прессовых операций

Важнейшая задача технологий машиностроения в настоящее время – это повышение точности и качества заготовок.

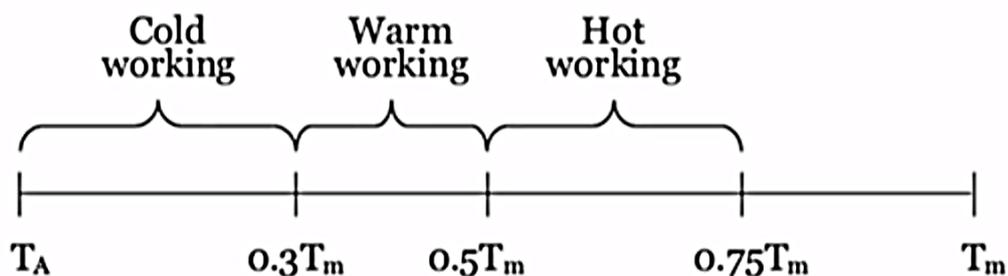
Сущность холодного выдавливания заключается в том, что массивная заготовка под давлением пуансона перемещается в кольцевой зазор между матрицей и пуансоном и образует полую деталь с дном или трубку с фланцем.

При использовании метода холодного выдавливания значительно меняются следующие параметры:

- предел прочности;
- твердость;
- предел текучести;
- пластичность.

Точность получаемых данных зависит в первую очередь от параметров, которыми мы управляем при использовании метода холодного выдавливания.

При производстве различных деталей широко применяют горячую, полугорячую и холодную обработку металла давлением. Температурные интервалы представлены на рисунке 44.



T_a – комнатная температура; T_m – температура плавления металла.

Рисунок 44 - Температурные интервалы для различных видов обработки металла давлением (холодная, полугорячая, горячая),

Для получения заготовок обработкой давлением используют различные деформируемые материалы: углеродистые, легированные и высоколегированные стали, жаропрочные сплавы, сплавы на основе алюминия, меди, магния, титана, никеля и др. В таблице 5 представлена сравнительная характеристика этих методов.

Существенными преимуществами обработки металлов давлением являются возможность значительного уменьшения отхода металла, а также повышения производительности труда, поскольку в результате однократного приложения усилия можно значительно изменить форму и размеры деформируемой заготовки. Кроме того, пластическая деформация сопровождается изменением физико-механических свойств металла заготовки, что можно использовать для получения деталей с наилучшими эксплуатационными свойствами при наименьшей их массе. Совершенствование технологических процессов обработки металлов давлением, а также применяемого оборудования позволяет расширять номенклатуру деталей, изготавливаемых обработкой давлением, увеличивать диапазон деталей по массе и размерам, а также повышать точность размеров полуфабрикатов, получаемых обработкой металлов давлением.

Таблица 5 - Сравнительная характеристика горячей, полугорячей и холодной обработки давлением

Параметр	Горячая	Полугорячая	Холодная
Масса заготовок	0,05-1500 кг	0,001-50 кг	0,001-30 кг
Точность	IT 13-16	IT 11-14	IT 8-11
Качество поверхности, R_z	> 50 - 100 μm	> 30 μm	> 10 μm
Сопротивление деформированию материала, %	- 20-30 %	-30-50 %	100 %
Пластичность, φ	$\varphi \leq 6$	$\varphi \leq 4$	$\varphi \leq 1,6$
Необходимая степень механической обработки	Высокая	Низкая	Очень низкая

Исходя из сравнительной характеристики видов обработки металла давлением, представленной в таблице 5, можно сделать вывод, что наиболее эффективным методом является холодная обработка давлением.

В рамках данной статьи и дальнейшего исследования в качестве объекта будет выступать холодная объемная штамповка методом выдавливания.

Метод холодного выдавливания является прогрессивным, им изготавливают полые стаканы, колпаки, трубы, изделия с двойными стенками, изделия сложного сечения. Использование этого метода увеличивает производительность до 10 раз. До 5 раз сокращается технологический процесс, а расход металла на одно изделие уменьшен на величину от 10 до 30 %.

Наблюдается зависимость технологических параметров, таких как пластичность материала, сопротивление его деформированию от температуры проведения процесса.

Температура от 20 до 300 градусов характерна для холодных процессов штамповки (сталь). Наблюдается низкая пластичность и высокое сопротивление деформированию.

При температуре от 500 до 1200 градусов наблюдается резкое увеличение пластичности от 3 до 4 раз и низкое сопротивление деформированию, также от 3 до 4 раз.

При температуре свыше 600 градусов наблюдается активное окисление заготовки, которое приводит к образованию окалины, что снижает качество изделия, увеличивает его металлоемкость, снижает точность.

Если правильно настроить технологический процесс, то на более слабом оборудовании за одно и то же время можно произвести несколько деталей, либо одну более сложную.

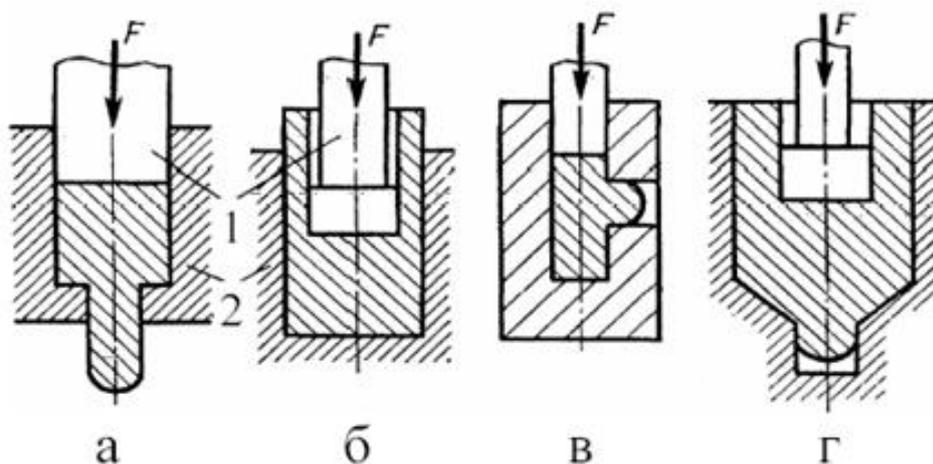
Можно выделить следующие преимущества холодного выдавливания, также опираясь на данные, представленные в вышеприведенной таблице:

- точность;
- прочность;
- ровная гладкая поверхность (отсутствие шероховатости);
- большой коэффициент использования металла;
- экологически чистый вид штамповки;
- высокое сопротивление деформации;
- отсутствие надрезов;
- оптимальная направленность волокон материала.

В настоящее время холодное выдавливание все шире внедряется в производство мелких и средних деталей, которые до недавнего времени изготавливали только обработкой резанием. Схемы холодного выдавливания представлены на рисунке 45.

Детали, изготовленные этим методом, имеют точные размеры, чистую поверхность, не требуют обработки резанием и только в некоторых случаях проходят чистовую обработку. Кроме того, в процессе холодного выдавливания детали

упрочняются. Это дает возможность заменить более дорогие сплавы на более дешевые, которые за счет упрочнения получают повышенные механические свойства.



а – прямое; б – обратное; в – боковое; г – комбинированное; 1- пуансон; 2 – матрица.

Рисунок 45 – Схемы холодного выдавливания

Деформационное упрочнение, которое сопровождает холодную штамповку, предопределяет высокую прочность конечного изделия. Возможно, использовать дешевые стали с более низкими исходными прочностными свойствами и получать детали со свойствами дорогих материалов.

Последующая механическая обработка часто необходима только при изготовлении наиболее сложных форм деталей.

Одним из недостатков процесса является потребность в приложении больших удельных давлений до 25 МПа, что отрицательно влияет на стойкость инструмента и ограничивает область применения холодного выдавливания сравнительно небольшими по массе и габаритам изделиями.

Исходя из вышеуказанных данных можно сформулировать следующие проблемы:

– отсутствие системы автоматизированных расчетов для холодного объемного выдавливания;

- отсутствие единой программы, моделирующей процесс подштамповки;
- необходимость конструирования и применения мощного оборудования;
- быстрый износ оборудования;
- высокая технологическая себестоимость, связанная с большими затратами при производстве.

Если правильно настроить технологический процесс, то на более слабом оборудовании за одно и то же время можно произвести несколько деталей, либо одну более сложную.

Далее рассмотрим такие холодные прессовые операции как вытяжка и обжим.

Вытяжка — это операция, включающая в себя образование полого изделия из плоской или полый исходной листовой заготовки.

Детали, получаемые вытяжкой, могут иметь форму тел вращения, коробчатую форму и сложную форму.

Детали с формой тел вращения бывают с фланцем, без фланца, с плоским и фасонным дном.

Детали коробчатой формы получают с квадратными, прямоугольными, криволинейными боковыми стенками с фланцем или без фланца, а дно у них может быть плоское или фасонное.

Детали сложной формы изготавливают полусимметричными, имеющими только одну плоскость симметрии, и несимметричными.

3.4 Проектирование операций вырубки

3.4.1 Строение и классификация штампов для вырубки

Штампы для вырубки делятся на две группы. К первой группе относятся штампы простого действия, выполняющие какую-либо одну операцию. Пуансон и матрица этих штампов получают оформление в зависимости от выполняемой операции и конструкции детали.

Приведенный на рисунке 46 штамп простого действия предназначен для вырубki кружков.

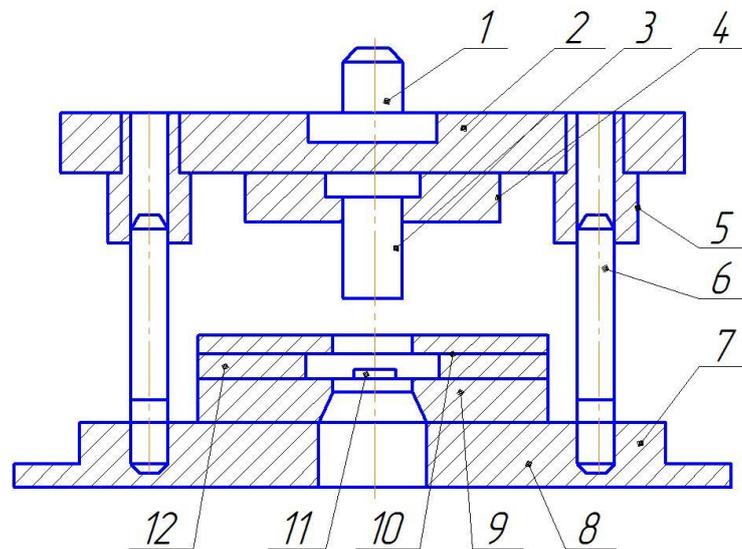


Рисунок 46 – Чертеж штампа для вырубki

Штамп состоит из пуансона (верхняя часть) и матрицы (нижняя часть). Пуансон 3 крепится к верхней плите штампа 2 с помощью пуансонодержателя 4, хвостовик которого 1 крепится к ползуну пресса.

Матрица 9 крепится к нижней плите 7 штампа с помощью матрицедержателя 8, а нижняя плита — к столу пресса. Соосность пуансона и матрицы достигается при помощи направляющих колонок 6 и втулок. Заготовка в виде полосы, направляемая с боков двумя планками 10, подается по матрице 9. При обратном ходе ползуна съемник 12 снимает полосу с пуансона, а затем полоса подается вперед до упора 11. После очередной операции вырубki полоса приподнимается и подается вперед таким образом, чтобы перемычка прошла над упором, а затем полоса опускается и подается до вперед упора для осуществления очередной вырубki.

Ко второй группе относятся многооперационные штампы. Особенность этих штампов заключается в том, что они за один ход ползуна пресса выполняют не одну, а несколько операций.

Многооперационные штампы, в свою очередь, можно разделить на две подгруппы: штампы последовательного и штампы совмещенного действия.

Штампы последовательного действия за один ход прессы выполняют несколько операций листовой штамповки при последовательном перемещении заготовки от одной позиции штампа к другой.

Штампы совмещенного действия выполняют за один ход ползуна несколько операций без перемещения заготовки.

3.4.2 Программное обеспечение

Программное обеспечение САПР представляет собой совокупность всех программ и эксплуатационной документации к ним, необходимых для автоматизированного проектирования. Физически в состав ПО входят:

- документы с текстами программ;
- программы, записанные на машинных носителях информации;
- эксплуатационные документы.

ПО конкретной САПР включает в себя программы и документацию для всех типов ЭВМ, используемых в данной САПР.

Составляющие программного обеспечения САПР, а также требования к его разработке и документированию установлены государственными стандартами. ПО САПР подразделяется на общесистемное и специализированное.

Общесистемное ПО содержит набор программных средств, которые предназначены для повышения эффективности использования вычислительных комплексов САПР и производительности труда персонала, обслуживающего эти комплексы. К функциям общесистемного ПО относятся:

- управление процессом вычислений;
- ввод, вывод и частично обработка информации;
- диалоговая взаимосвязь с пользователем в процессе проектирования;

- решение общематематических задач;
- хранение, поиск, сортировка, модификация данных, необходимых при проектировании, защита их целостности и защита от несанкционированного доступа;
- контроль и диагностика работы вычислительного комплекса.

Три первые и последняя из указанных функций реализуются в современных вычислительных комплексах на базе операционных систем (ОС).

Специализированное ПО включает в себя прикладные программы и пакеты прикладных программ (ППП), основной функцией которых является получение проектных решений.

В ходе работы были разработаны алгоритмы взаимодействия с базой данных, алгоритмы расчета и проектирования параметров и моделей матрицы (рисунки 63 и 64) и пуансона вырубных инструментов.

3.4.3 Математическое обеспечение

Математическое обеспечение (МО) включает в себя математические модели (ММ), методы и алгоритмы, необходимые для выполнения автоматизированного проектирования.

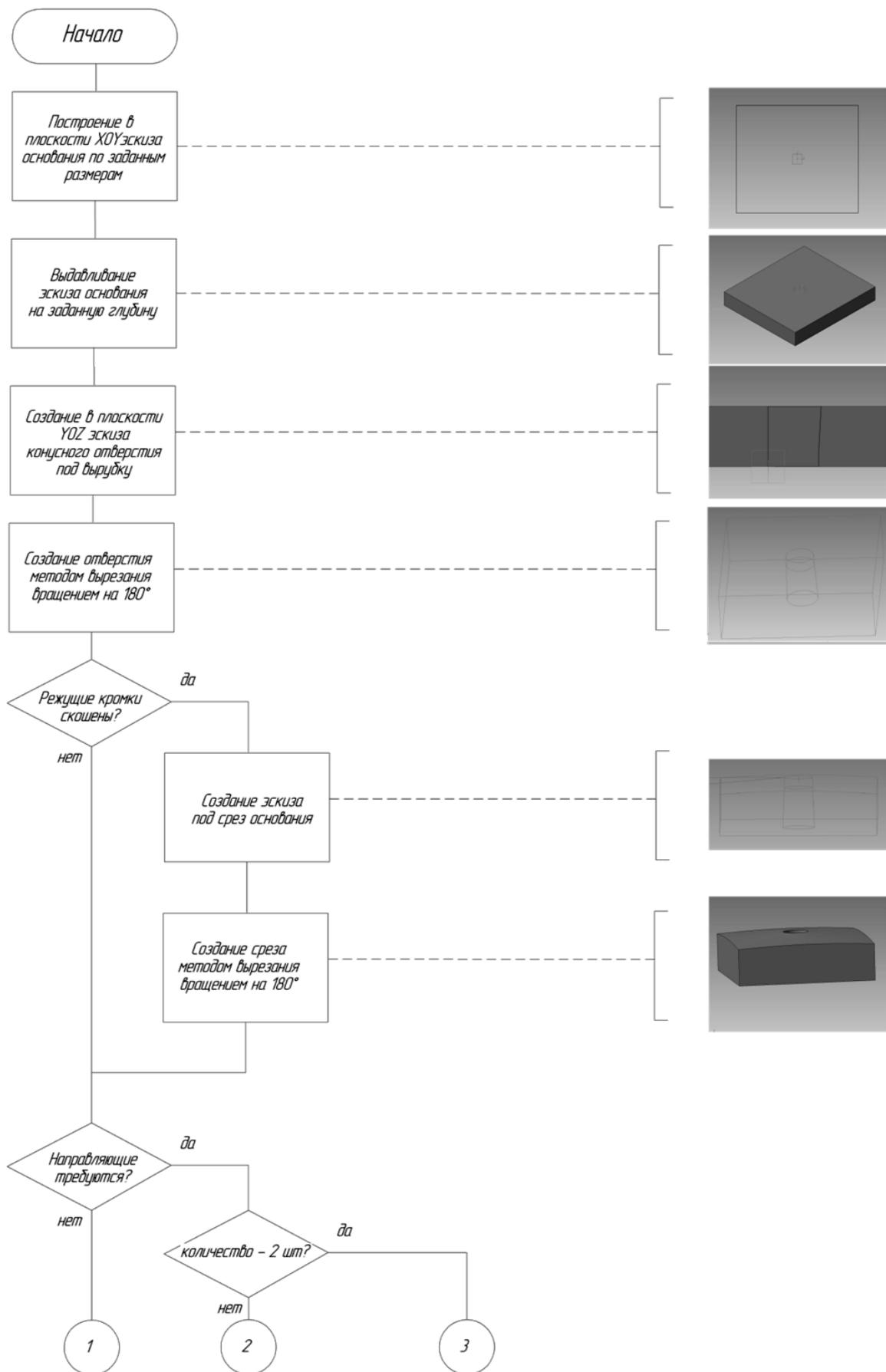


Рисунок 47 – Схема алгоритма построения матрицы (начало)

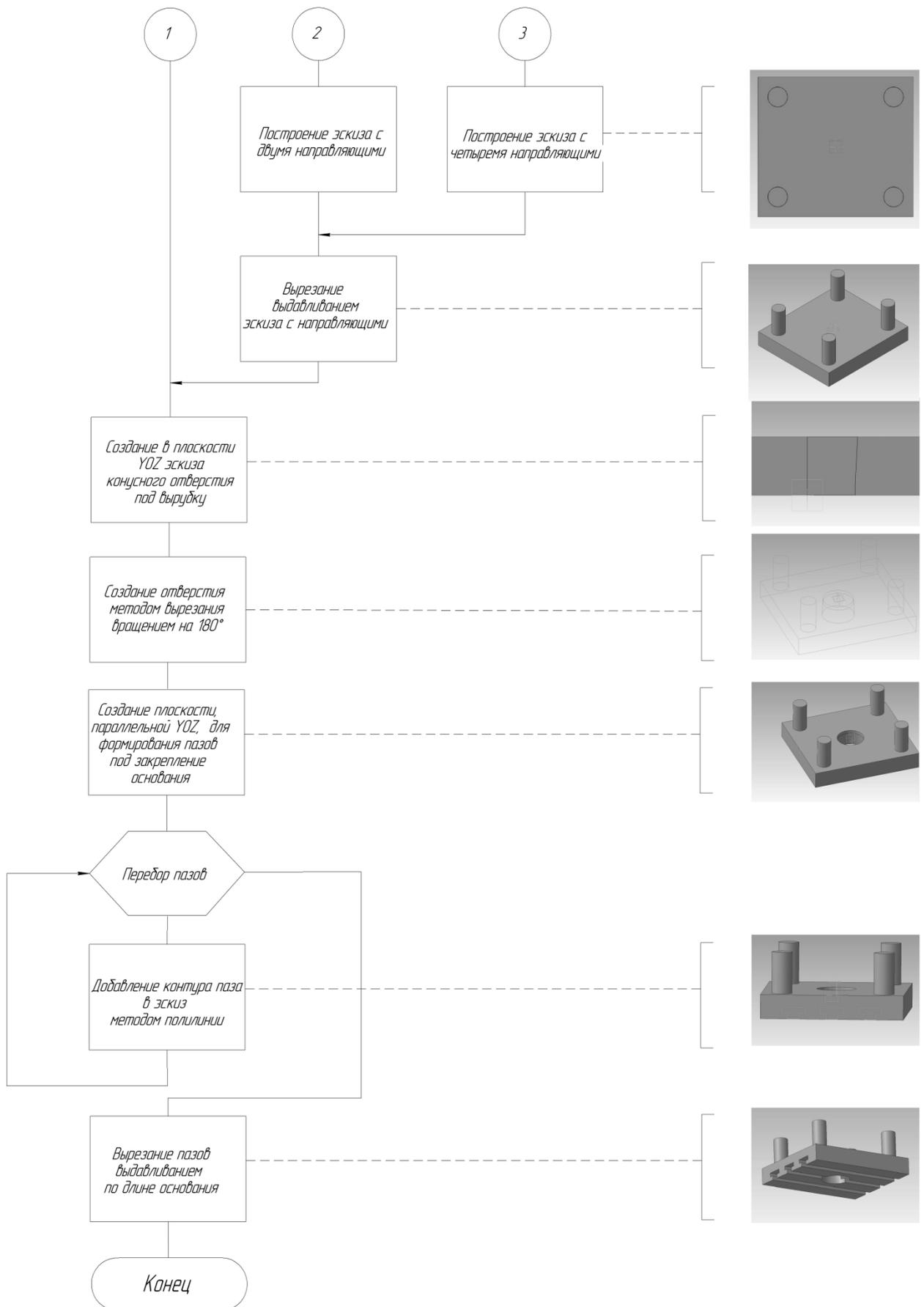


Рисунок 48 – Схема алгоритма построения матрицы (продолжение)

Математическое обеспечение САПР реализуется в виде программ и сопровождающей документации. На основе математического обеспечения решаются все задачи в САПР: постановка проблемы, организация вычислительного процесса и диалога человек - ЭВМ, анализ, синтез, техническое проектирование и т.д.

Математическое обеспечение САПР делят на две основные составляющие: обслуживающую (общую) и проектирующую (специальную).

Количество частей обслуживающей составляющей математического обеспечения САПР увеличивается вместе с прогрессом теории и практики САПР.

Обслуживающая составляющая математического обеспечения САПР содержит средства:

- описания графических образов, накопления библиотек типовых изображений, редактирования, преобразования, называемые математическими средствами машинной графики;

- обработки информационных массивов - методы сортировки, поиска элементов, преобразования структур и поиска данных;

- обеспечения вычислительного процесса САПР;

- сбора статистики параметров получаемых решений.

Проектирующая или специальная составляющая математического обеспечения САПР содержит средства решения прикладных задач, на которые ориентирована САПР. Решение прикладных задач основывается на математическом моделировании объектов проектирования.

В рамках решения поставленной в дипломе задачи применяется следующее математическое обеспечение (рисунок 49, таблица 6):

Матрица с прямыми режущими кромками

Матрица со скошенными режущими кромками

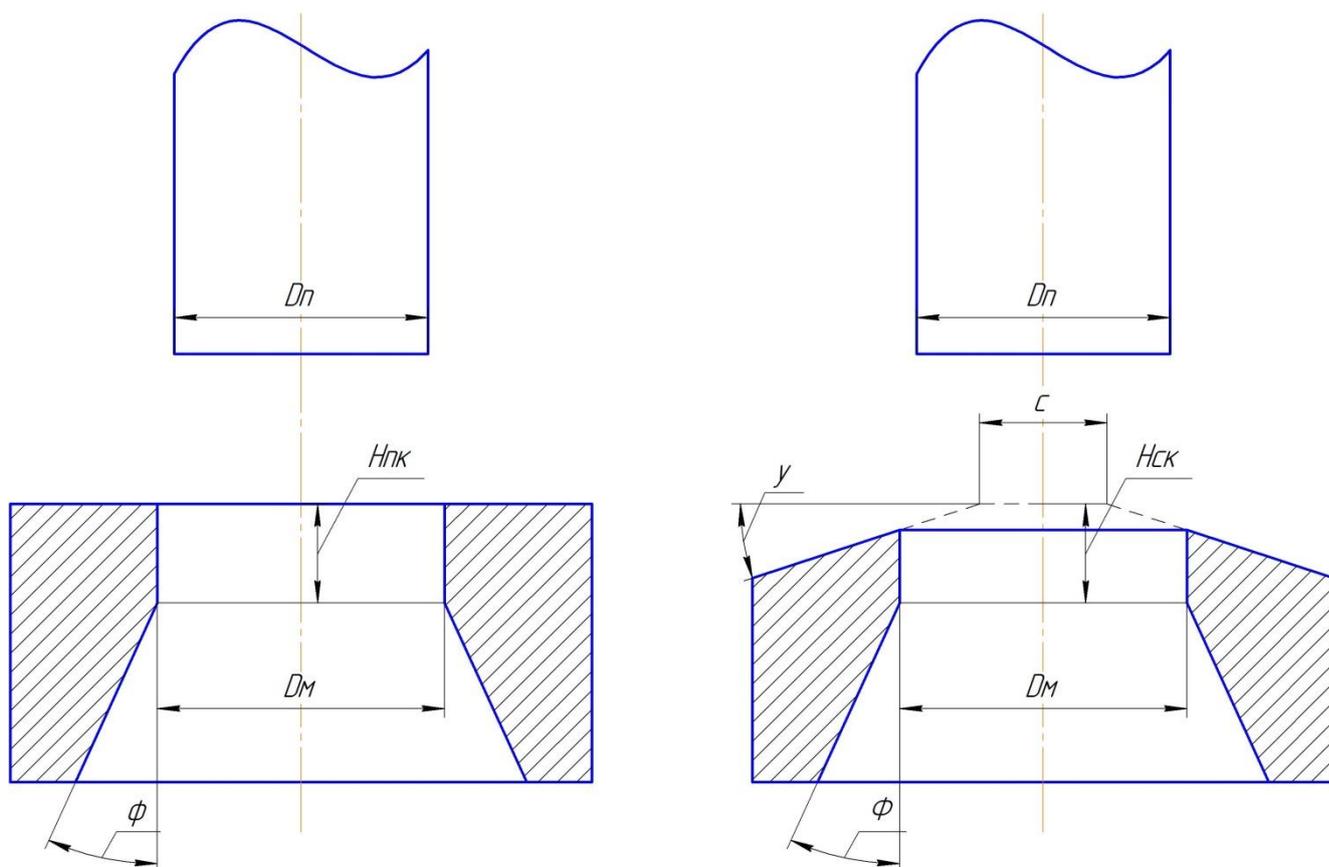


Рисунок 49 – Чертеж матриц с указанием расчетных значений

3.5 Эксплуатационно-техническое проектирование

3.5.1 Общие сведения о программе

Разработка предназначена для проектирования технологического процесса вырубki металла и включает в себя следующие возможности:

- автоматизированный расчет параметров вырубной операции, включая параметры вырубных матрицы и пуансона;
- построение 3D-моделей вырубных инструментов;
- ведение базы данных по прессам и свойствам металлов.

Таблица 6 – Формулы, применяемые при расчете инструментов

Формула	Описание
Диаметр матрицы D_m , мм	
$D_m = D_{кр} + k_{окр}$	$D_{кр}$ – диаметр круглой заготовки, мм; $k_{окр}$ – зазор на диаметр матрицы (по справочникам, в зависимости от материала), мм.
Диаметр пуансона D_n , мм	
$D_n = D_m - z$	z – зазор между матрицей и пуансоном, мм.
$z = 1 - \frac{h_{п}}{T_{кр}} \cdot T_{кр} \cdot tg \beta$	h_n – глубина проникновения пуансона (по справочникам, в зависимости от материала), мм; $T_{кр}$ – толщина круглой заготовки, мм; β – угол скалывания трещин (по справочникам, в зависимости от материала), град.
Высота пояска матрицы, мм	
$H_{нк} = k_n \cdot T_{кр}$	$H_{нк}$ – высота пояска для матриц с прямыми режущими кромками, мм; k_n – коэффициент пояска матрицы (по справочникам, в зависимости от материала и типа матрицы).
$H_{ск} = k_{п} \cdot T_{кр} + \frac{D_m - k_c \cdot D_m}{2} \cdot tg \gamma$	$H_{ск}$ – высота пояска для матриц со скошенными режущими кромками, мм; k_c – коэффициент ширины площадки C (по справочникам, в зависимости от материала и типа матрицы), мм; γ – угол скоса кромок, град.

3.5.2 Руководство оператора

Программа запускается на исполнение путем запуска исполняемого файла в формате «.exe». После запуска исполняемого файла отобразится окно, представленное на рисунке 50.

Пользователю необходимо заполнить следующие основные части о процессе вырубки:

- параметры прессы. Необходимо выбрать пресс из базы, либо вручную заполнить значения размеров хвостовика, основания и положения направляющих (при необходимости);

- параметры вырубного инструмента. Необходимо ввести значения вручную либо заполнить сведения о заготовке.

Пользователю предоставляется возможность редактирования базы прессов и базы свойств материалов (рисунки 51 и 52).

После заполнения всех параметров операции, становится доступно автоматическое проектирование матрицы и пунсона в формате Компас-3D. Примеры вариации инструментов представлены на рисунках 53 - 55.

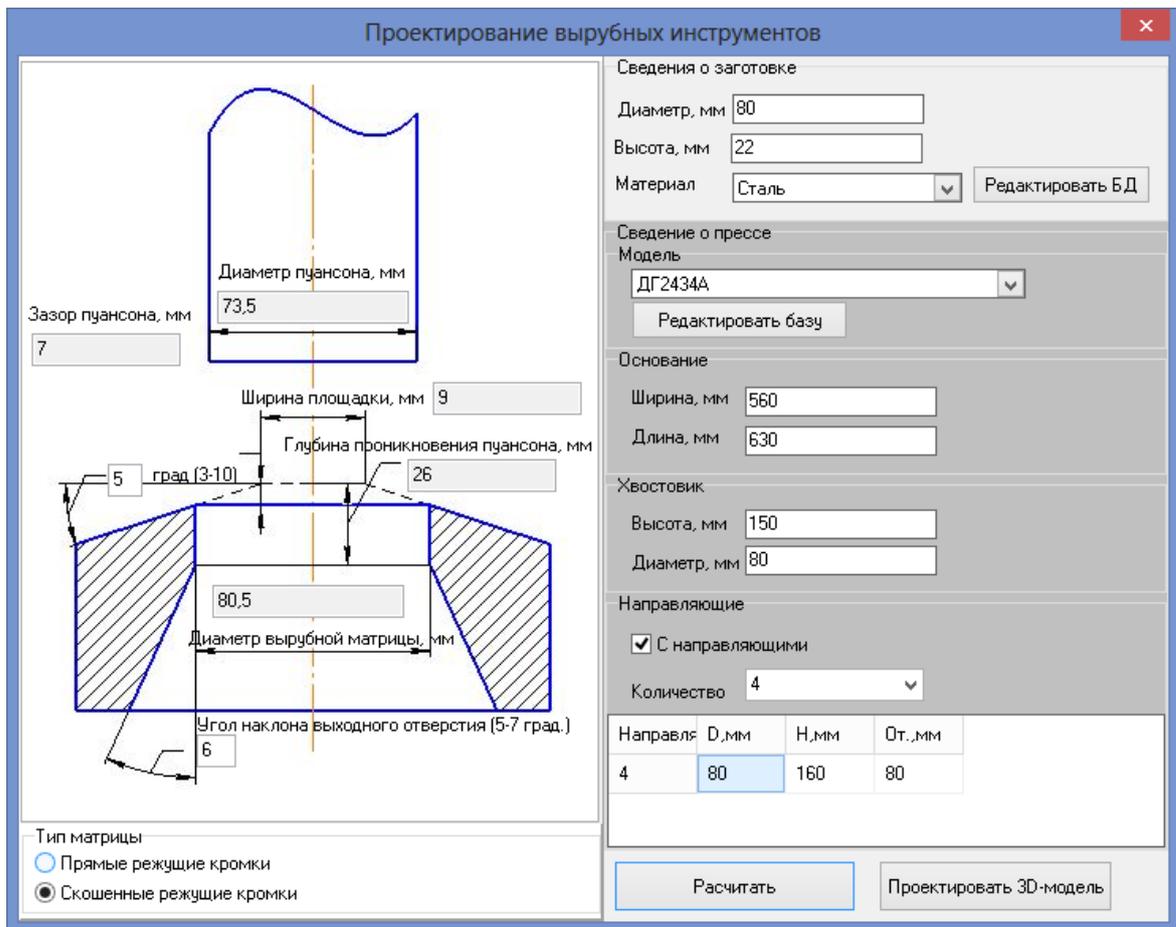


Рисунок 50– Главное окно программы. Матрица со скошенными режущими кромками

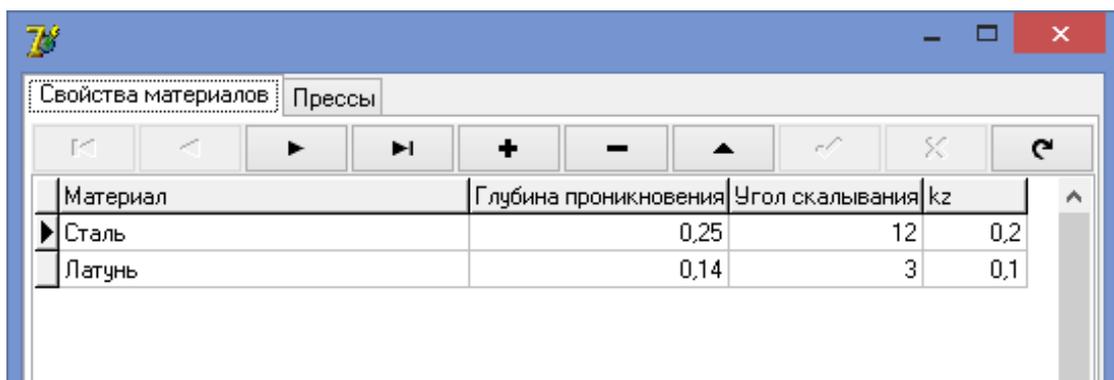


Рисунок 51 – Окно редактирования таблицы свойств материалов

Модель	Давление	Стол"Линия"	b, мм	l, мм	w, мм	Диаметр
ДГ2428	630	False	560	630		37
ДГ2432	1600	False	710	800		46
ДГ2434	2500	False	1000	1120		46
ДГ2434А	2500	True	1000	1120	150	46
ДГ2436	4000	False	1120	1250		46
ДГ2436А	4000	True	1120	1250	150	46
ДГ2428А	630	True	560	630	150	37
ДГ2432А	1600	True	710	800	150	46

Рисунок 52 – Окно редактирования свойств параметров оборудования

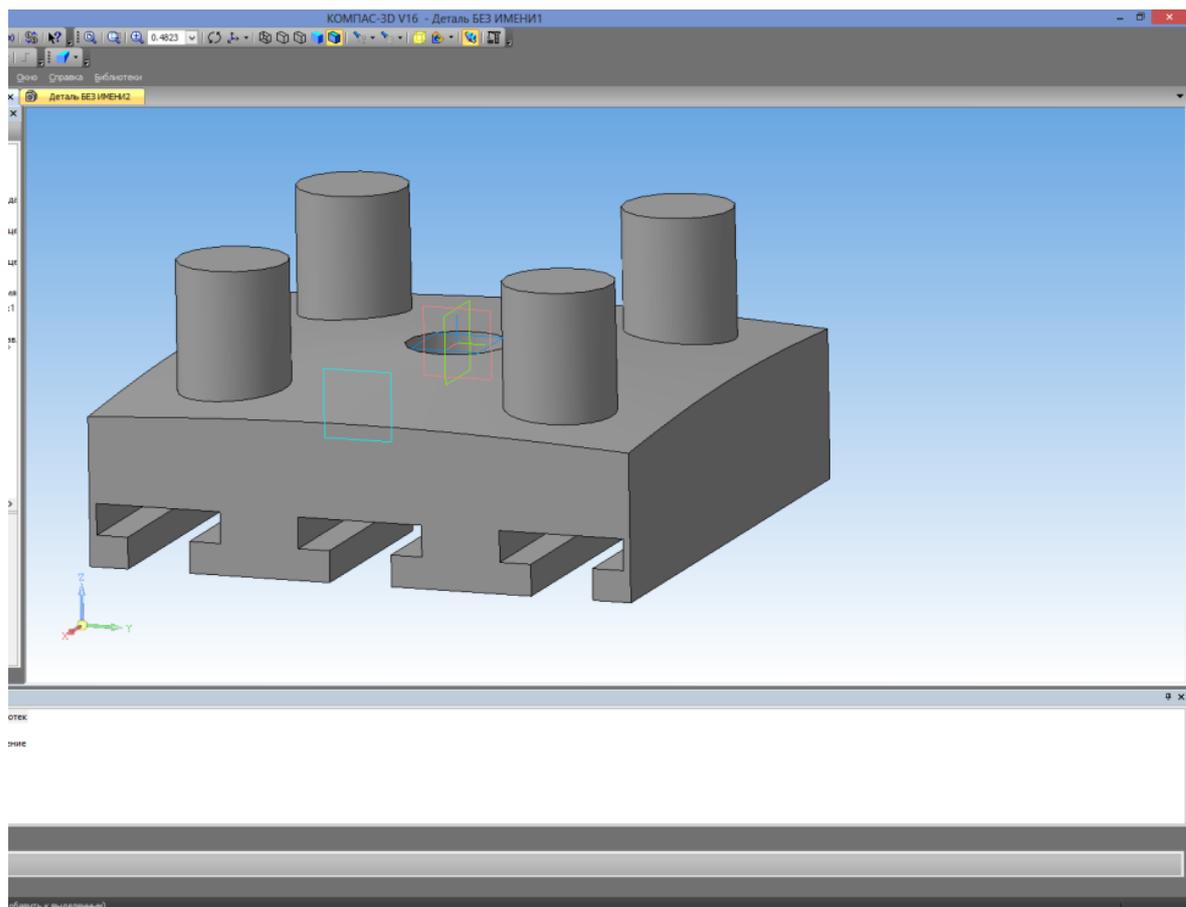


Рисунок 53 – Вырубная матрица

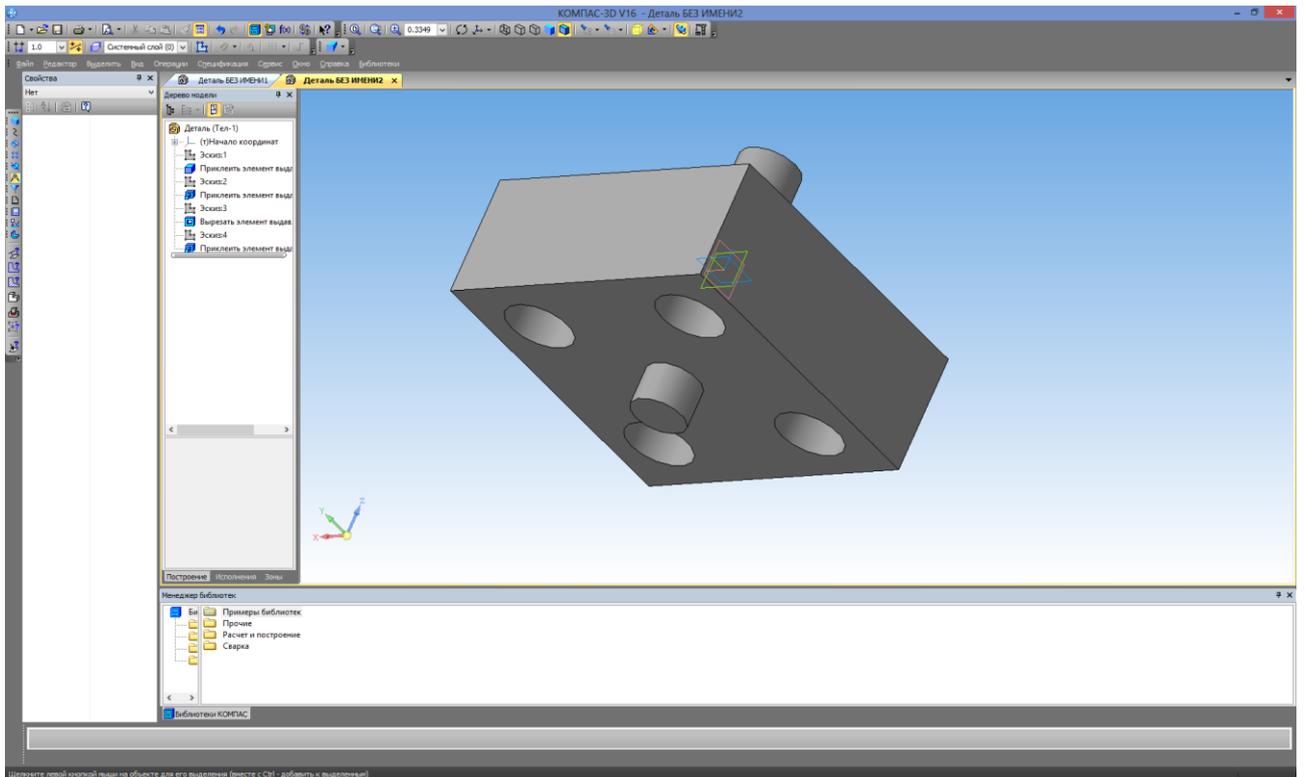


Рисунок 54 – Вырубной пуансон

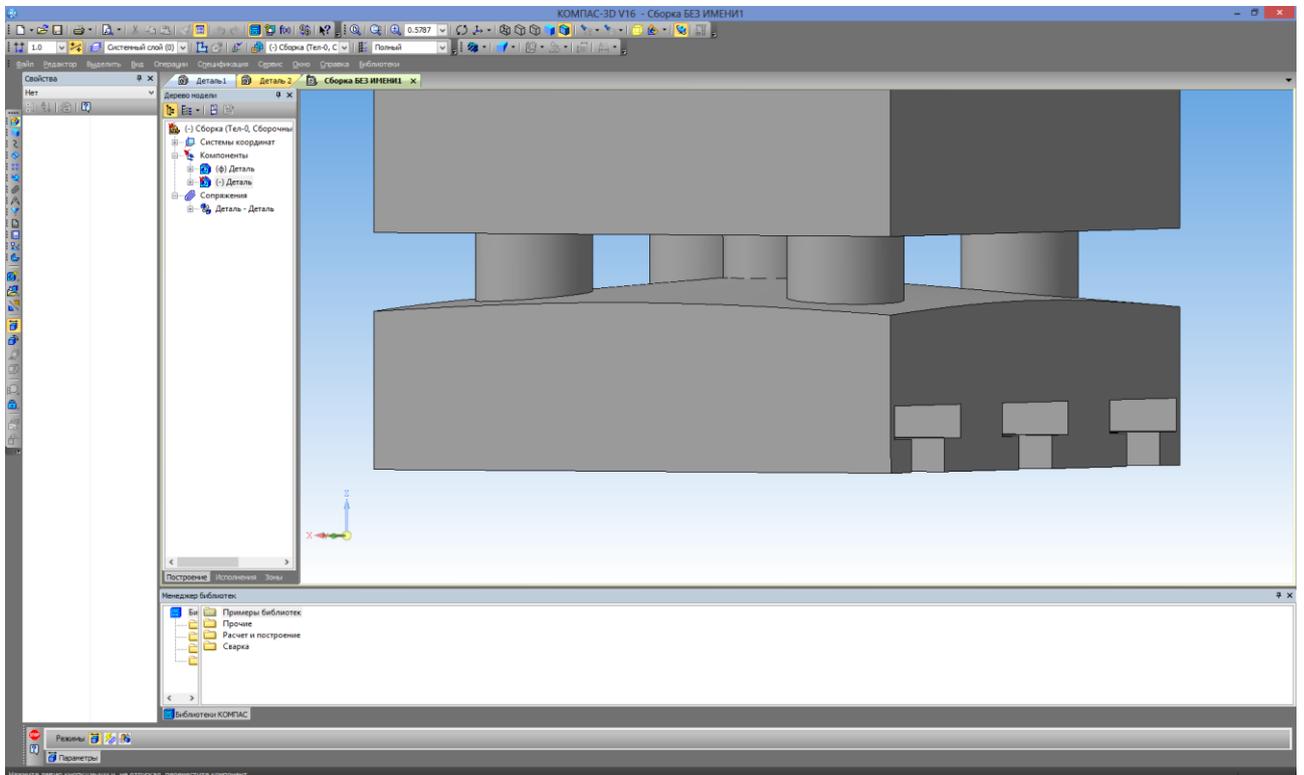
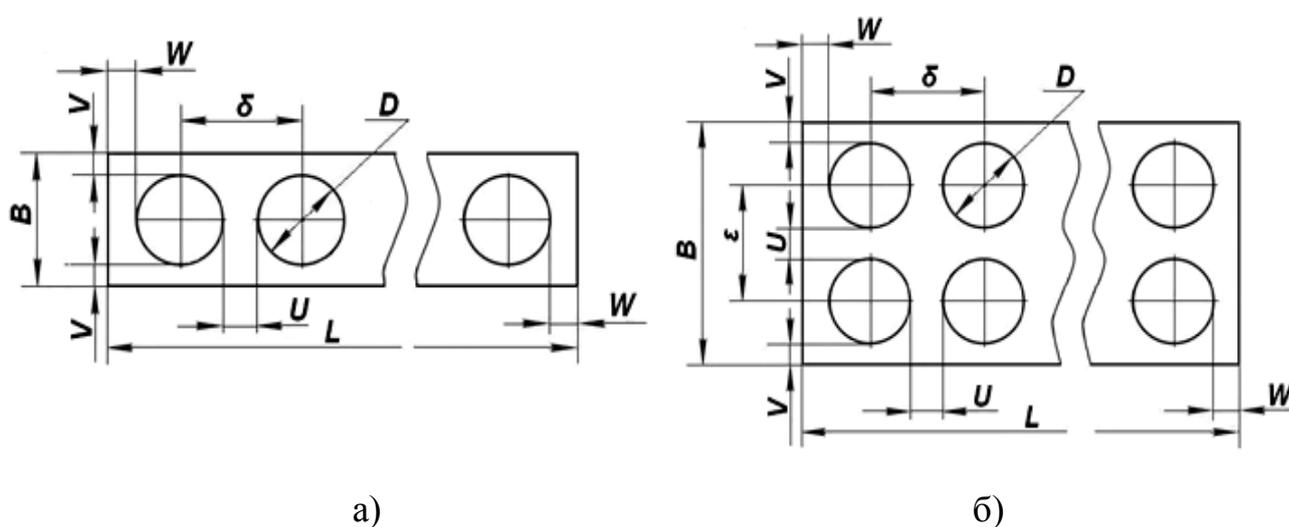


Рисунок 55 – Вырубной инструмент в сборе

3.6 Расчёт параметров оптимальной укладки круглой заготовки на операции вырубki из прямоугольного листа

Расчёт параметров оптимальной укладки круглой заготовки на операции вырубki из прямоугольного листа является одним из способов повышения коэффициента использования металла при проектировании технологических процессов глубокой вытяжки.

На практике рассматриваются три схемы размещения кружка на карте: однорядное (рисунок 56а), двухрядное симметричное (рисунок 56 б) и двухрядное шахматное (рисунок 57).



а – однорядное; б – двухрядное симметричное.

Рисунок 56 – Положение кружка на карте

Каждая схема характеризуется наличием перемычек, величины которых U , V , W зависят от толщины, твёрдости металла и ряда других факторов.

Однорядное положение кружка на карте определяется формулами:

$$L = 2W + 2ND + (2N - 1) \cdot U, \quad (58)$$

$$B = 2V + D, \quad (59)$$

$$\delta = D + V. \quad (60)$$

Двухрядное симметричное положение кружка на карте определяется формулами:

$$L = 2W + ND + (N - 1) \cdot U, \quad (61)$$

$$B = 2V + 2D + U, \quad (62)$$

$$\delta = D + U, \quad (63)$$

$$\varepsilon = D + U. \quad (64)$$

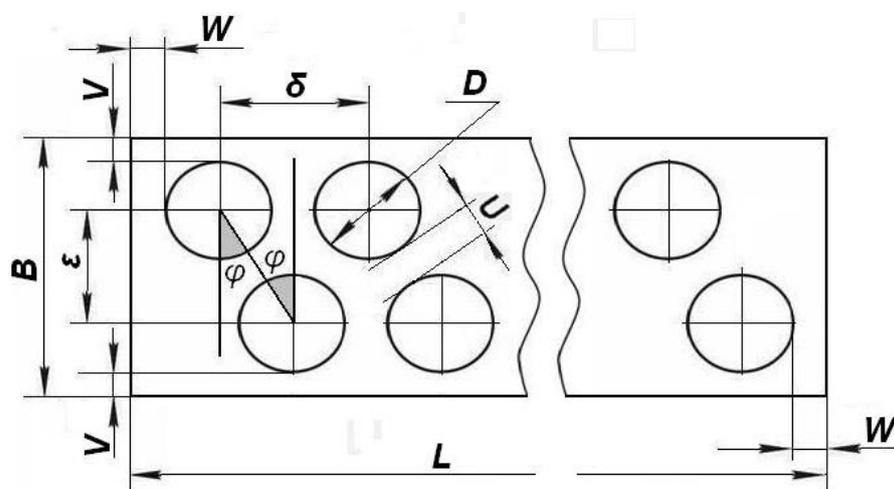


Рисунок 57 – Двухрядное шахматное положение кружка на карте

Экранные формы программы, осуществляющей раскрой полосы для кружка, представлена на рисунках 58 – 60.

Программа в автоматическом режиме позволяет пересчитывать все размеры в зависимости от выбранной рядности полос.

Пользователь может осуществлять расчет как длин полос (на основании количества кружков), так и количество получающихся кружков на основании полос заданных размеров.

Общая часть расчета полос представлена следующим кодом:

```
var

K,K1,K2, {отступы (согласно чертежу на экранной форме)}
A{расстояние между заготовками по вертикали},A1{расстояние между заготовками по
горизонтали},D{диаметр кружка},T{толщина кружка},n{кол-во кружков},H,l{длина
полосы},B{ширина полосы}:real;
dK,dK1,dK2{коэффициенты для отступов K1 - K3}:real;

<...>

if (edit_D.Text>'') and (edit_T.Text>'') and
( ((radiogroup_param.ItemIndex=1) and (edit_met_length.Text>''))
or ((radiogroup_param.ItemIndex=0) and (edit_circle_count.Text>''))) then
begin
  {считываем введенные значения}
  dk:=strtofloat(edit_dK.text);
  dk1:=strtofloat(edit_dK1.text);
  dk2:=strtofloat(edit_dK2.text);
  D:=strtofloat(edit_d.Text);
  T:=strtofloat(edit_T.Text);
  H:=strtofloat(edit_circle_count.Text);
  L:=strtofloat(edit_met_length.text);
  n:=spinedit1.Value;
  //общая часть расчета
  K:=Ceil(dk*T);
  K1:=Ceil(dK1*K);
  K2:=Ceil(dK2*K);
  A:=Ceil(D+K);
```

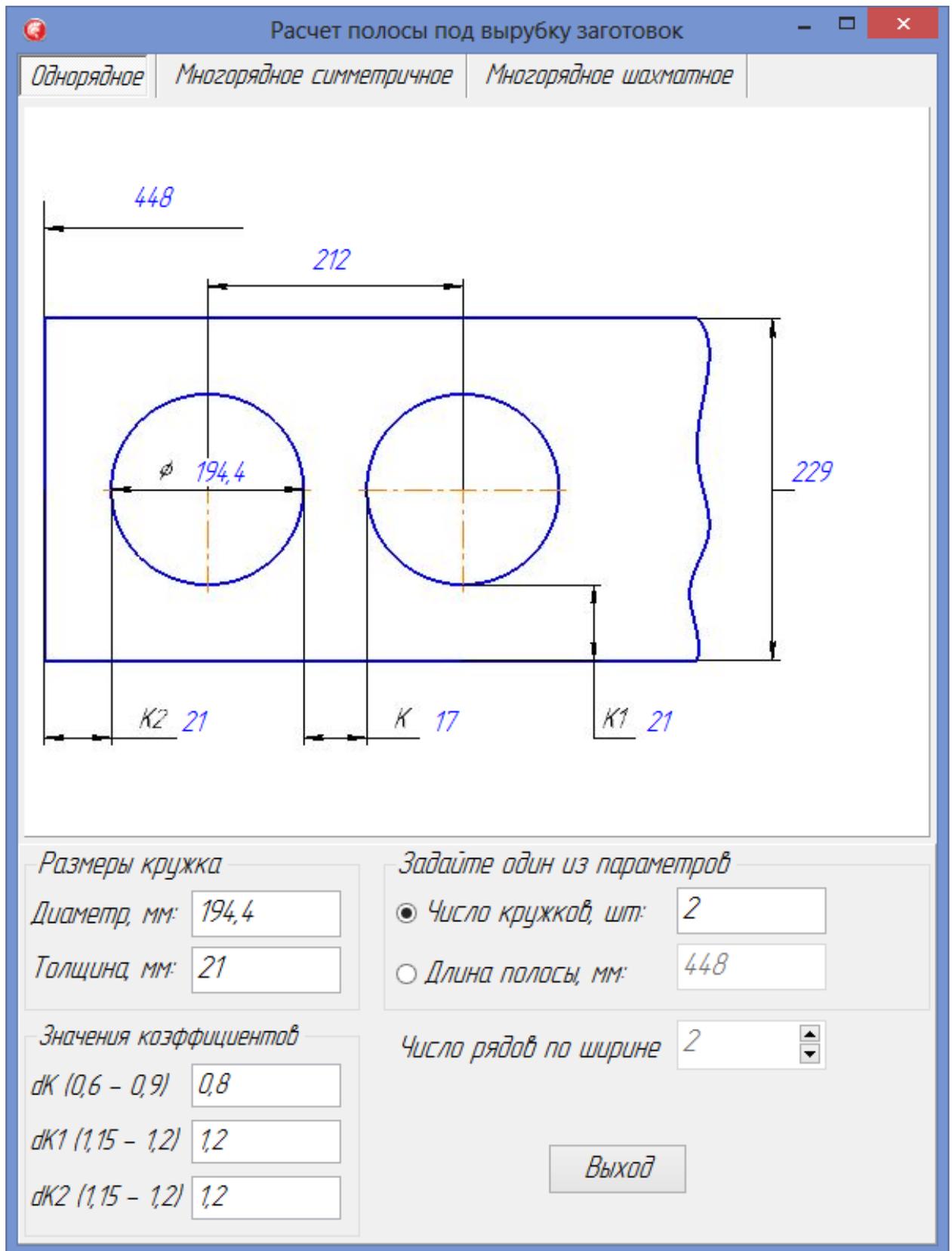


Рисунок58 – Экранная форма расчета однорядного расположения заготовок

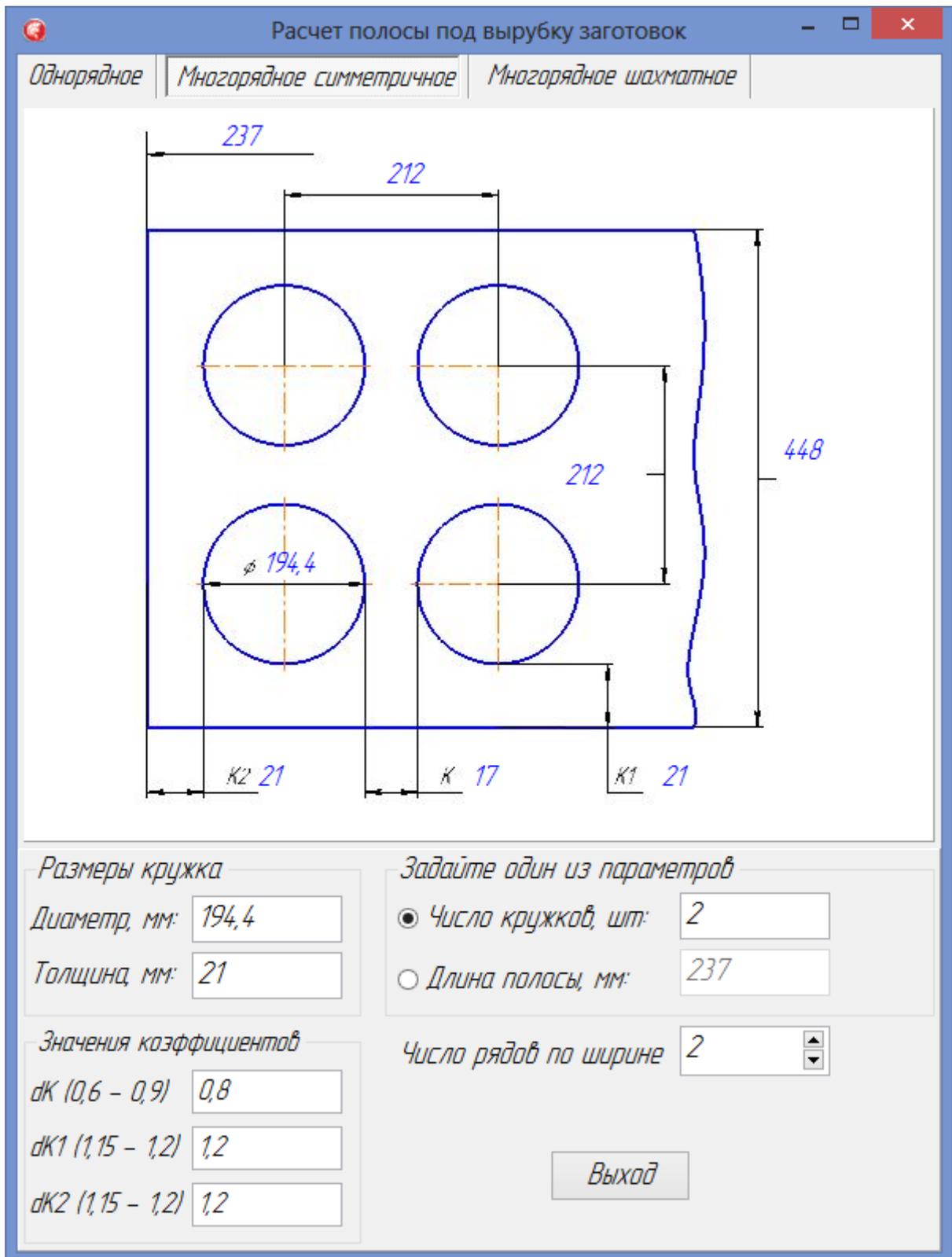


Рисунок 59– Экранная форма расчета многорядного симметричного расположения заготовок

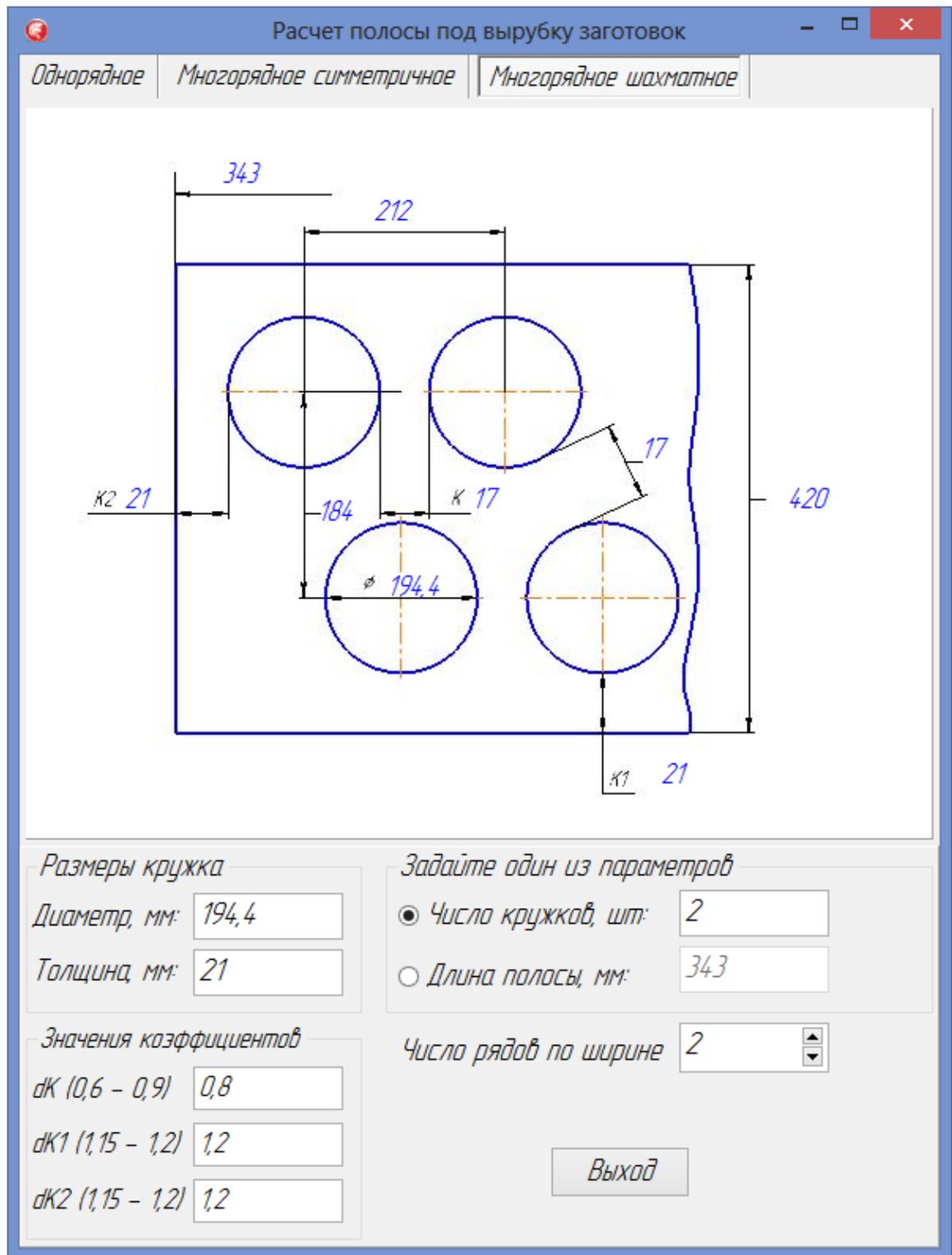


Рисунок 60 – Экранная форма расчета многорядного шахматного расположения заготовок

Код расчета параметров раскроя в зависимости от рядности расположения заготовок:

```

case pagecontrol1.ActivePageIndex of

0:begin//однорядное
    Label_K2_1.Caption:=floattostr(K2)+' ';
    Label_K_1.Caption:=floattostr(K)+' ';
    Label_K1_1.Caption:=floattostr(K1)+' ';
    Label_D_1.Caption:=floattostr(D)+' ';
    Label_A_1.Caption:=floattostr(A)+' ';
    B:=ceil(D+2*K);
    Label_B_1.Caption:=floattostr(B)+' ';
ifradiogroup_param.ItemIndex=0then//если расчет по кол-ву необходимых кружков
begin
l:=ceil(2*K2+H*D+K*(H-1));
    edit_met_length.Text:=floattostr(l);
endelse//если по размеру готовых полос
edit_circle_count.Text:=floattostr(trunc( (1-(D+2*K2))/(D+K) +1));
    label_l_1.Caption:=floattostr(l)+' ';
end;

1:begin//многорядное симметричное
    Label_K2_2.Caption:=floattostr(K2)+' ';
    Label_K_2.Caption:=floattostr(K)+' ';
    Label_K1_2.Caption:=floattostr(K1)+' ';
    Label_D_2.Caption:=floattostr(D)+' ';
    Label_A_2.Caption:=floattostr(A)+' ';
    Label_A1_2.Caption:=floattostr(A)+' ';
    B:=ceil((n-1)*(D+K)+D+2*K1);
    Label_B_2.Caption:=floattostr(B)+' ';
ifradiogroup_param.ItemIndex=0then//если расчет длины по кол-ву необходимых
кружков
begin
l:=ceil((2*K2+H*D/n+K*(H/n-1)));
if l<K2*2+D then l:=ceil(K2*2+D);
    edit_met_length.Text:=floattostr(l);
endelse//если расчет числа кружков по размеру готовых полос
edit_circle_count.Text:=floattostr(trunc( ((1-(D+2*K2))*n) / (D+K) +n));
    label_l_2.Caption:=floattostr(l)+' ';
end;

2:begin//многорядное шахматное
    Label_K2_3.Caption:=floattostr(K2)+' ';
    Label_K_3.Caption:=floattostr(K)+' ';
    Label_K_33.Caption:=floattostr(K)+' ';

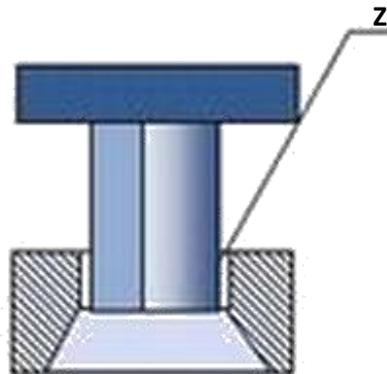
```

```

Label_K1_3.Caption:=floattostr(K1)+' ';
Label_D_3.Caption:=floattostr(D)+' ';
Label_A_3.Caption:=floattostr(A)+' ';
A1:=ceil((D+K)*0.866);
Label_A1_3.Caption:=floattostr(A1)+' ';
B:=ceil((n-1)*(D+K)*0.866+D+2*K1);
Label_B_3.Caption:=floattostr(B)+' ';
ifradiogroup_param.ItemIndex=0then//если расчет длины по кол-ву необходимых
кружков
beginif (round(n mod2) >0then l:=ceil((2*K2+H*D/n+K*(H/n-1))) //нечетные
else l:=ceil(2*K2+H*D/n+K*(H/n-1)+(D+K)/2);
if l<K2*2+D then l:=ceil(K2*2+D);
        edit_met_length.Text:=floattostr(l);
endelse//если расчет числа кружков по размеру готовых полос
edit_circle_count.Text:=floattostr(trunc( ( ( l-(D+2*K2) ) *n) / (D+K) +n-1));
        label_l_3.Caption:=floattostr(l)+' ';
end;
end;

```

Для получения поверхности среза без заусенцев при вырубке необходимо правильно назначать зазор «Z» между пуансоном и матрицей (рисунок б1), величина которого влияет на качество поверхности.



Рисунокб1 – Зазор, назначаемый при вырубке

Величина зазора зависит от толщины заготовки и материала изделия и для круглых заготовок определяется по формуле:

$$Z=2 \cdot (1-h_n/T_{кр}) \cdot T_{кр} \cdot tg\beta, \quad (65)$$

где h_n – глубина проникновения пуансона;

$T_{кр}$ – толщина заготовки;

β – угол скалывания трещин (по справочникам)

Величину зазора можно также назначить путем выбора из соответствующих справочников, например в издании «Справочник мастера по штампам» В.Д.Корсакова номинальный диаметр рекомендуется принимать равным максимальному диаметру круглой заготовки, диаметр пуансона – меньше на величину зазора. Диаметр заготовки при вырубке меньшей части матрицы на величину от 0,2 до 0,7 мм – для стальных заготовок диаметром от 100 до 200 мм, для латунных заготовок диаметром до 150 мм – на величину от 0,3 до 0,6 мм, свыше 150 мм – на величину от 0,5 до 1,0 мм.

Для производства стальных изделий используются, как правило, вырубные матрицы с прямыми режущими кромками (плоские матрицы, рисунок 62).

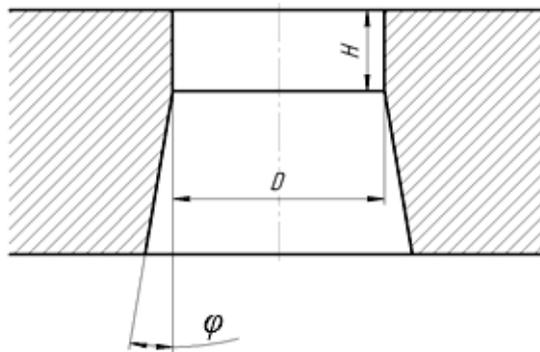


Рисунок 62 – Вырубная матрица с прямой режущей кромкой

Высота пояска H для матриц составляет от 0,75 до 1,0 от толщины кружка.

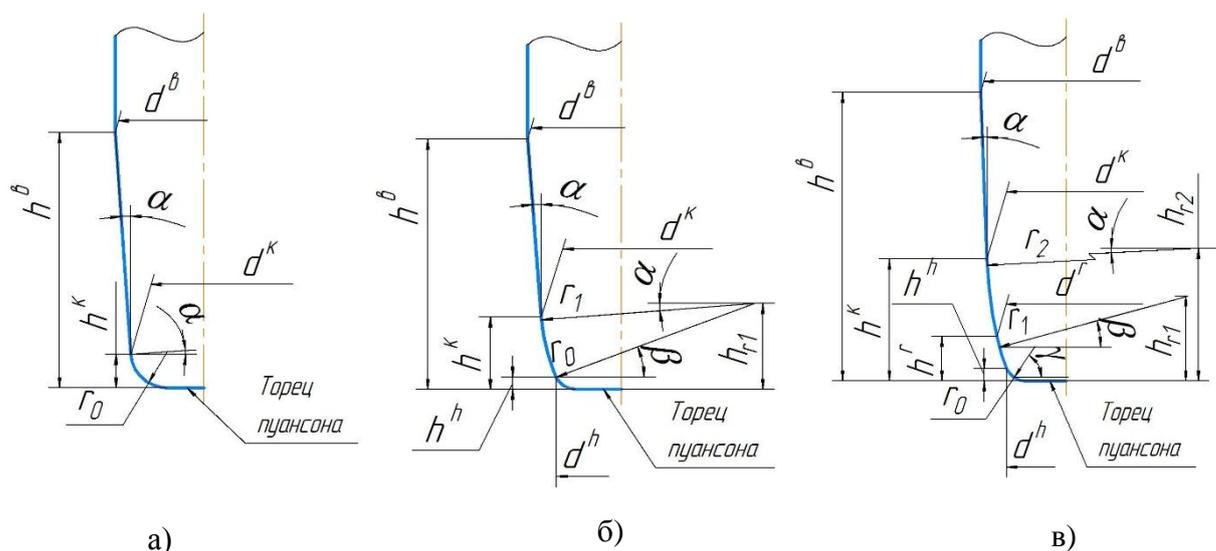
Диаметр пуансона вырубки d_n определяется как разность номинального диаметра вырубной матрицы D и зазора между матрицей и пуансоном Z , с учетом припусков на износ и допусков на изготовление пуансонов и матриц.

4 UML-диаграмма классов программы расчета вытяжного инструмента цилиндрических изделий

В процессе холодной глубокой вытяжки с утонением основным формообразующим инструментом являются пуансоны и матрицы, от геометрии которых напрямую зависит возможность изготовления и качество полуфабрикатов и изделий. Ошибки в расчетах вытяжного инструмента приводят к возникновению дефектов, которые могут быть выявлены на заключительных стадиях многооперационного производства.

4.1 Математическая постановка задачи

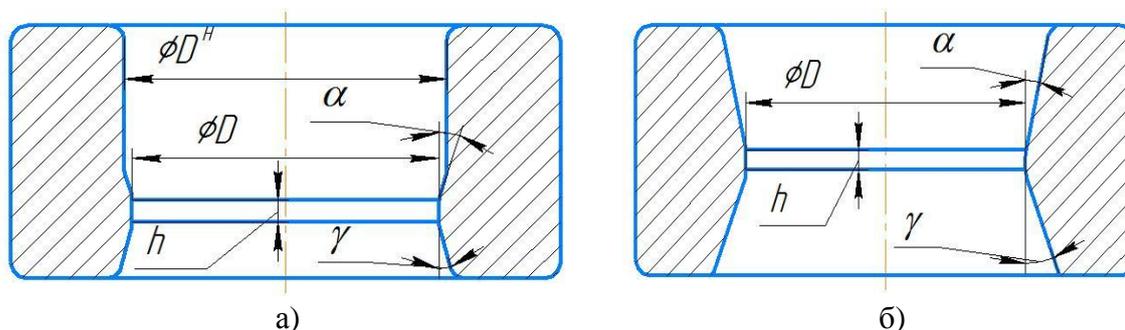
Схемы пуансонов с различным количеством радиусов осевого сечения для вытяжки цилиндрических изделий с указанием основных расчетных размеров приведены на рисунке 63.



а – с одним радиусом; б – с двумя радиусами; в – с тремя радиусами.

Рисунок 63 - Эскизы пуансонов с различным количеством радиусов осевого сечения

Вытяжки с утонением выполняются как через одну, так и через две матрицы (рисунок 64). Использование двух матриц позволяет назначить большую степень деформации.



а – матрица верхняя; б – матрица нижняя.

Рисунок 64 - Эскизы осевых сечений матриц

В соответствии с рисунком 1 определим координаты точек сопряжения на образующем контуре осевого сечения пуансона.

Для пуансона с одним радиусом осевого сечения (рисунок 1, а) определим высоту точки сопряжения радиуса с образующей конуса

$$h^k = r_0 (1 - \sin \alpha), \quad (66)$$

где α - угол конуса, определяемый по формуле

$$\alpha = \arctg \frac{d^B - d^K}{2(h^B - h^K)}. \quad (67)$$

Для пуансона с двумя радиусами осевого сечения (рисунок 1, б) угол α определяется аналогично пуансону с одним радиусом по формуле (67). Определим высоту центра большого радиуса r_1

$$h_{r1} = h_{r0} + r_1 \cdot \sin \alpha, \quad (68)$$

где h_{r0} – высота центра радиуса r_0 , равна значению радиуса, так как торец пуансона располагается по касательной, мм.

Определим высоту точки сопряжения радиусов. Так как

$$\sin \beta = \frac{h_{r1} - r_0}{r_1 - r_0}, \quad (69)$$

тогда

$$h^h = r_0 \cdot 1 - \sin \beta . \quad (70)$$

Диаметр пуансона в точке сопряжения радиусов определяется

$$d^h = d^k - 2r_1 \cos \alpha - \cos \beta . \quad (71)$$

Для пуансона с тремя радиусами (рисунок 1, в) определим синус угла β

$$\sin \beta = \frac{h_{r2} - h_{r1}}{r_2 - r_1}, \quad (72)$$

тогда высота точки сопряжения радиусов r_2 и r_1 определяется

$$h^r = h_{r1} - r_1 \cdot \sin \beta. \quad (73)$$

Диаметр пуансона в точке сопряжения радиусов r_2 и r_1 определяется

$$d^r = d^k - 2r_2 \cos \alpha - \cos \beta . \quad (74)$$

Для определения точки сопряжения радиусов r_1 и r_0 определим синус угла γ

$$\sin \gamma = \frac{h_{r1} - r_0}{r_1 - r_0} , \quad (75)$$

тогда

$$h^h = h_{r1} - r_1 \cdot \sin \gamma. \quad (76)$$

Диаметр пуансона в точке сопряжения радиусов r_1 и r_0 определяется

$$d^h = d^r - 2r_1 \cos \beta - \cos \gamma . \quad (77)$$

Диаметры пуансона вытяжки с утонением в верхнем сечении d^B и в точке сопряжения конуса с радиусом d^K должны определяться по формулам

$$d^B = D - 2S^B, \quad (78)$$

$$d^K = D - 2S^K, \quad (79)$$

где D – диаметр матрицы, для последней вытяжки равен диаметру изделия, мм;

S^B и S^K – толщина стенки полуфабриката в соответствующих сечениях, определяется по чертежу, мм.

Приведенные расчеты в основном применимы для пуансона последней вытяжки. Так как размеры пуансона предпоследней ($n-1$) вытяжки определяются в зависимости от размеров матрицы определим ее рабочий диаметр

$$D_{n-1} = \sqrt{\frac{4F_{n-1}^h}{\pi} + (d_{n-1}^h)^2}, \quad (80)$$

где F_{n-1}^h – площадь поперечного сечения полуфабриката предпоследней вытяжки с утонением внизу, мм^2 , определяется по формуле

$$F_{n-1}^h = \frac{F_n^h}{1-K^h}, \quad (81)$$

где F_n^h – площадь поперечного сечения полуфабриката последней вытяжки с утонением внизу, мм^2 , определяется

$$F_n^h = \frac{\pi}{4} [D_n^2 - (d_n^h)^2], \quad (82)$$

где d_{n-1}^h – диаметр пуансона предпоследней вытяжки с утонением в нижнем сечении на высоте h^h от торца, мм, определяется

$$d_{n-1}^h = d_n^h + \lambda, \quad (83)$$

где λ – зазор на вхождение пуансонов, мм.

После определения диаметра матрицы рассчитывается диаметр пуансона предпоследней вытяжки с утонением в верхнем сечении

$$d_{n-1}^B = \sqrt{D_{n-1}^2 - \frac{D_n^2 - (d_n^B)^2}{1 - K_n^B}}, \quad (84)$$

где K_n^B – степень деформации в верхнем сечении.

Диаметр пуансона предпоследней вытяжки с утонением в точке сопряжения конуса и радиуса определяется

$$d_{n-1}^K = \sqrt{D_{n-1}^2 - \frac{D_n^2 - (d_n^K)^2}{1 - K_n^K}}, \quad (85)$$

где K_n^K – степень деформации в точке сопряжения конуса и радиуса.

4.2 Проектирование программного средства

Для автоматизации проектирования вытяжных инструментов разработано программное средство, позволяющее определять контур формообразующих элементов с последующим их построением в САПР КОМПАС-3D.

В основу разработки положен принцип объектно-ориентированного программирования. Было выделено два класса *TMatrix* и *TPuanson*. UML-диаграмма разра-

ботанных классов приведена на рисунке 65. Выделение в отдельные классы верхней и нижней матрицей нецелесообразно, так как в процессе проектирования экземпляр класса *TMatrica* может неоднократно изменить свое положение с «верхнего» на «нижнее».

Рассмотрим свойства класса *TPuanson*. Свойство *Build_array* предназначено для хранения вспомогательных данных, используемых для построения трехмерных моделей и чертежей, таких как координаты точек сопряжения, координаты центров рассчитанных радиусов и другие. Свойства d^v, d^k, d^r, d^h – задают диаметры пуансона в точках сопряжения конуса с цилиндром, конуса с большим радиусом, большого и среднего радиусов и в точке сопряжения среднего и малого радиусов, соответственно. Свойства h^v, h^k, h^r, h^h – задают высоты соответствующих расчетным диаметрам точек сопряжения, а свойства s^v, s^k, s^r, s^h – соответствующие толщины стенок. Свойства k^v, k^k, k^r, k^h типа *TStepeni* позволяют задавать степени деформации для верхней и нижней матриц. Массив *StepeniArray : TStepeniArray* используется для построения графика распределения степеней деформации по длине полуфабриката.

Назначение методов *CopyField()*, *Create()*, *LoadFromFile()*, *SaveToFile()* – понятно из их названия. Метод *Modeling()* предназначен для построения трехмерных моделей вытяжных инструментов и чертежей в САПР КОМПАС-3D, включает в себя процедуры построения пуансонов с одним, двумя и тремя радиусами. Метод *ProfGo()* реализует этап профилирования пуансонов – построение контура каждого вытяжного пуансона в одной системе координат для определения возможных пересечений, которые недопустимы. Остальные методы реализуют расчет высот, диаметров и толщин стенок в соответствующих точках сопряжения контура пуансона. Большинство из этих методов перегружаемые (на рисунке 64 не показано).

У класса *TMatrica* свойства предназначены для хранения данных о геометрии матрицы: *ang1, ang2* – углы α и γ (рисунок 65), *D* – диаметр рабочего пояса, *r_array* – массив для хранения радиусов скруглений, *rad_vhod* – радиус входной части верхней матрицы, в которой центрируется полуфабрикат, *rad_vnesh* – радиус внешнего контура матрицы, *H* – высота матрицы. В отличие от пуансонов в классе *TMatrica* методы, реализующие геометрические построения, разнесены как по типам матриц

так и по типу построения. Методы *Modeling()* и *Draw()* предназначены для построения трехмерной модели и чертежа верхней матрицы вытяжки с утонением.

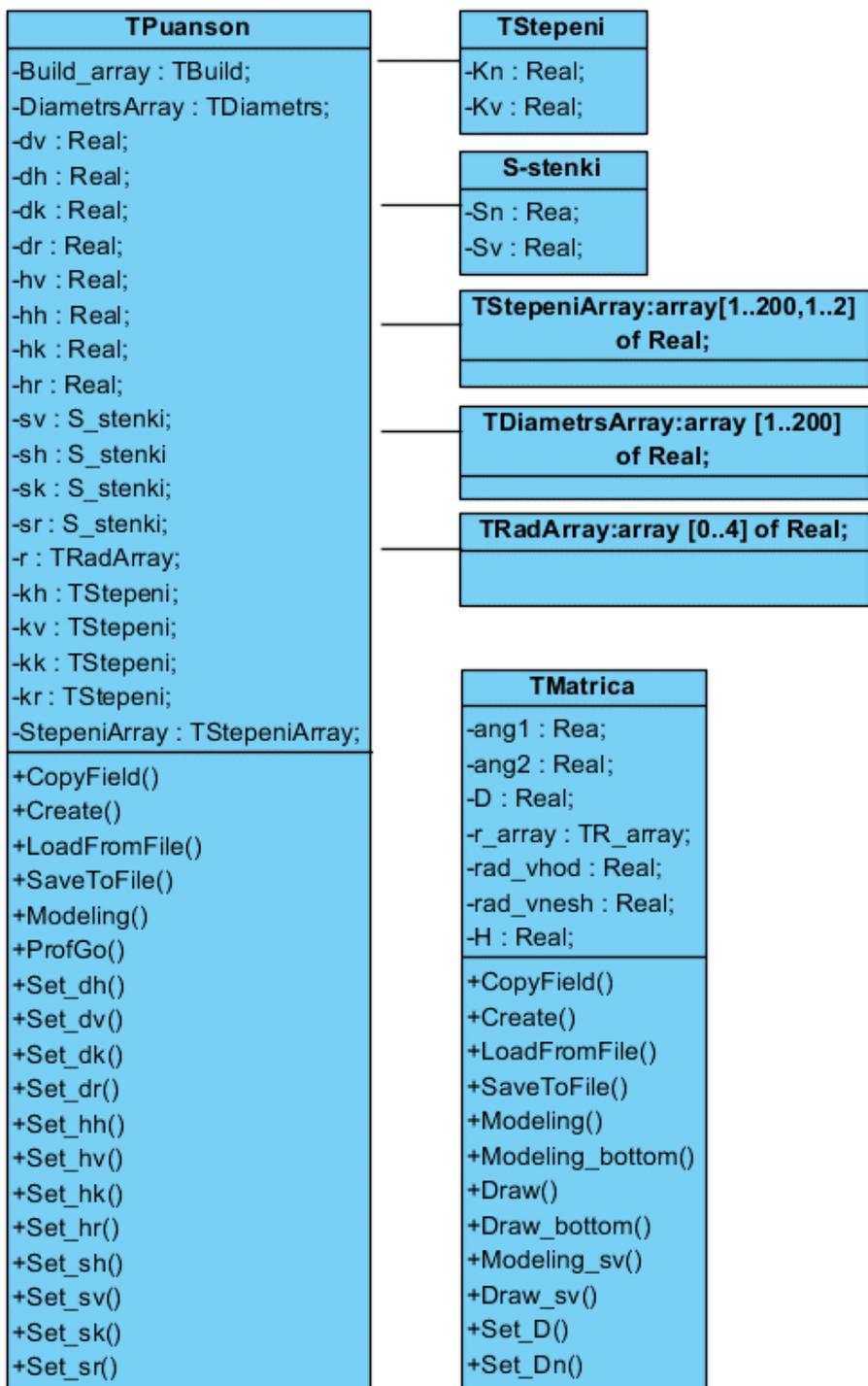


Рисунок65 –UML-диаграмма классов *TPuanson* и *TMatrica*

Для нижней матрицы вытяжки с утонением разработаны соответствующие методы *Modeling_bottom()* и *Draw_bottom()*. Методы *Modeling_sv()* и *Draw_sv()* предназначены для построения трехмерной модели и чертежа матрицы вытяжки (свертки).

Таким образом, разработанное математическое обеспечение и структура классов позволяют использовать их в алгоритме проектирования вытяжного инструмента. Количество пуансонов и матриц зависит от количества вытяжных операций и степени заданной деформации, это определяет будет выполняться вытяжка через одну или через две матрицы. Созданные и заполненные расчетными данными массивы экземпляров описанных классов обеспечивают полноту и непротиворечивость информации, используемой на вспомогательных этапах проектирования: расчет высот полуфабрикатов, построение графиков упрочнения по вытяжкам, назначение обрубных ножей, сохранение проектных данных.

5 Автоматизация расчета инструмента заключительной вытяжки с утонением цельнотянутых цилиндрических изделий

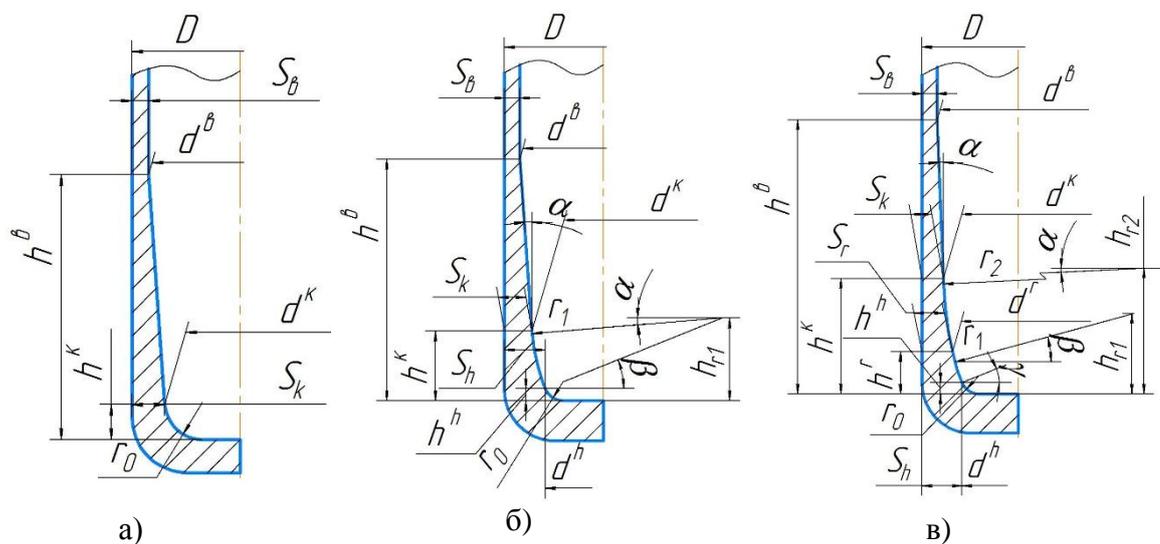
Производство цельнотянутых цилиндрических изделий методом глубокой вытяжки – сложный, многооперационный процесс холодной обработки металла давлением, включающий следующие технологические прессовые операции: первая вытяжка без утонения стенки (свёртка); несколько последующих вытяжек с утонением стенки, количество которых определяется в зависимости от геометрических параметров изделия; объемная штамповка донной части; прессовка донной части.

Одним из наиболее сложных процессов является вытяжка с утонением, которая выполняет основную формообразующую операцию преобразования толстостенного цилиндрического полуфабриката типа «стакан» с глухой донной частью в тонкостенный [29,19]. В процессе многооперационного формообразования производится промежуточный отжиг, снимающий напряжения и упрочнение металла, возникающие на промежуточных вытяжках в результате деформации. Поэтому заключительная вытяжка с утонением выполняет окончательное формообразование и придает изделию требуемые механические свойства. Высокие требования, предъявляемые

к цельнотянутым цилиндрическим изделиям, обуславливают большое количество вариантов расчета вытяжного инструмента. Применение при его проектировании универсальных САД-систем позволяет автоматизировать подготовку электронной конструкторской документации уже по выполненным вручную расчетам. Сложность и слабая формализация процессов обработки металлов давлением не позволяют полностью исключить участие человека в процессе автоматизированного проектирования [11]. Существующие методики расчета технологических параметров процесса зачастую неполные, а количество экспериментальных исследований недостаточно для внедрения вытяжки с утонением стенки по внутреннему контуру в производство высокоточных деталей [18]. Допущенные ошибки в расчетах могут проявиться только на заключительной вытяжке с утонением, что приводит к дополнительным трудозатратам на повторное проектирование, изготовление инструмента и производство новой партии изделий. Поэтому автоматизация расчета параметров инструмента заключительной вытяжки с утонением цельнотянутых цилиндрических изделий является актуальной.

Размеры матрицы и пуансона заключительной вытяжки с утонением определяются исходя из геометрии изделия. В зависимости от требований, предъявляемых к изделию, внутренняя часть его может формироваться с помощью одного, двух или трех радиусов (рисунок 66).

Для автоматизации расчета размеров вытяжного инструмента заключительной вытяжки с утонением разработана UML-диаграмма деятельности [2], представленная на рисунке 67. Деятельность расчета инструмента заключительной вытяжки с утонением начинается при выполнении предусловия получения всех исходных данных из файла проекта в формате *.xml. После установки начальных состояний переменных, генерации необходимых экземпляров объектов запускается процедура подключения к базе данных (БД).



а – с одним радиусом; б – с двумя радиусами; в – с тремя радиусами.

Рисунок 6б – Эскизы осевого сечения изделий с различным количеством радиусов

В БД хранятся зависимости механических свойств материалов, в частности пердела прочности, от степени деформации. На основе полученной информации в дальнейших расчетах определяется наличие операций закалки и низкотемпературного отжига на предпоследней вытяжке с утонением, а также выполняются проверки на соответствие получаемых механических свойств заданным по чертежу. Деятельность проверки исходных данных анализирует соответствие параметров, введенных пользователем, размерам изделия. В случае обнаружения некорректных данных, пользователю выдается сообщение об ошибке и процедура завершается.

Зная наружный диаметр изделия, задаваемый чертежом, определяется диаметр рабочей части матрицы заключительной вытяжки с утонением, D . Так как матрица при работе испытывает значительные растягивающие напряжения, то в процессе вытяжки ее рабочий диаметр увеличивается за счет пружинения. Поэтому при определении диаметра матрицы заключительной вытяжки с утонением необходимо учитывать коэффициент пружинения, зависящий от материала изделия.

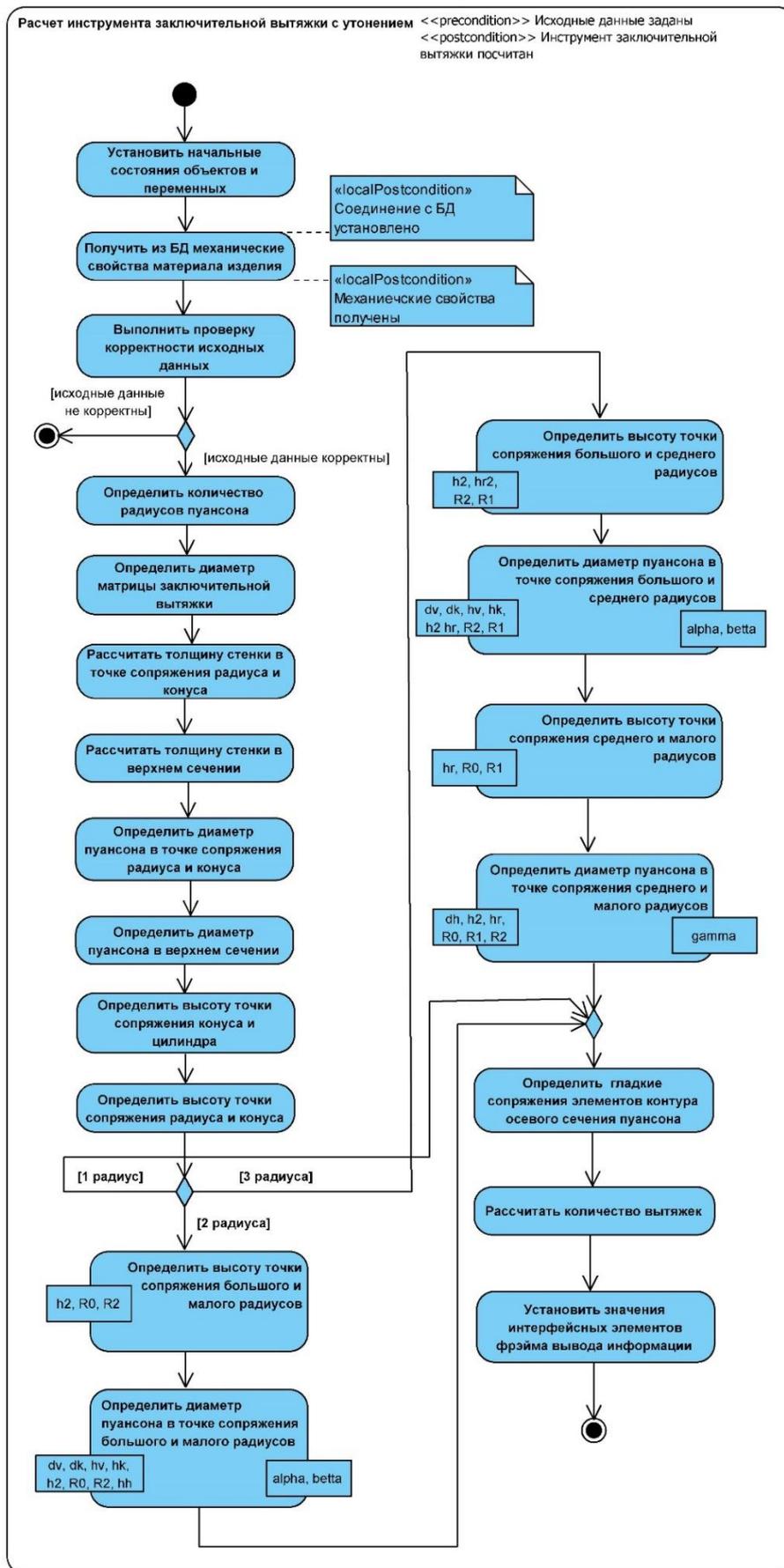


Рисунок 67 –UML-диаграмма деятельности расчета инструмента заключительной вытяжки с утонением

Зная диаметр матрицы, определяются размеры пуансона заключительной вытяжки с утонением в различных сечениях, в зависимости от количества радиусов, как разница между диаметром матрицы и толщины стенки в заданном сечении.

При расчете размеров пуансона учитывается суммарный допуск на изготовление и износ матрицы и пуансона, допуск на разностенность, величина пружинения матриц, допуск на толщину стенки, припуски под механическую обработку.

Высоты точки сопряжения конуса и цилиндра и точки сопряжения радиуса с конусом для пуансона с одним радиусом определяются на основе данных чертежа и тригонометрических зависимостей.

Для пуансона с двумя и тремя радиусами количество точек сопряжения увеличивается и расчет их выполняется по схожим алгоритмам, но по различным исходным данным. Обозначения входных данных на диаграмме деятельности соответствуют обозначениям на рисунке 67. Опишем их подробно (в мм):

- hr_1 – высота центра среднего радиуса;
- hr_2 – высота центра большого радиуса;
- r_0, r_1, r_2 – малый, средний и большой радиусы (r_0 также является высотой центра малого радиуса, поэтому отдельного обозначения для этой величины не вводится);
- dv – диаметр цилиндрической части пуансона;
- dk – диаметр пуансона в точке сопряжения конуса с радиусом;
- dr – диаметр пуансона в точке сопряжения большого радиуса со средним радиусом;
- dh – диаметр пуансона в точке сопряжения малого радиуса со средним или с большим радиусом;
- hk – высота точки сопряжения конуса с радиусом;
- hr – высота точки сопряжения большого радиуса со средним радиусом;
- hh – высота точки сопряжения малого радиуса со средним или с большим радиусом;
- α, β, γ – углы между центром большого, среднего и малого радиусов и соответствующими точками сопряжений.

Определение гладких сопряжений элементов контура предполагает получение полного объема данных для достаточной точности для программного построения трехмерных моделей пуансонов [37, 46, 52]. Разработанное математическое обеспечение, описанное в работах [46,52], позволяет полностью исключить этап подбора геометрии пуансона вручную на основе расчетных данных.

Расчет количества вытяжек определяется с учетом площади поперечного сечения полуфабриката вытяжки (свёртки) вверху, площади поперечного сечения полуфабриката предпоследней вытяжки с утонением вверху и средней операционной степени деформации.

Заключительным этапом является вывод данных для пользователя на экран в соответствии с рисунком 68.

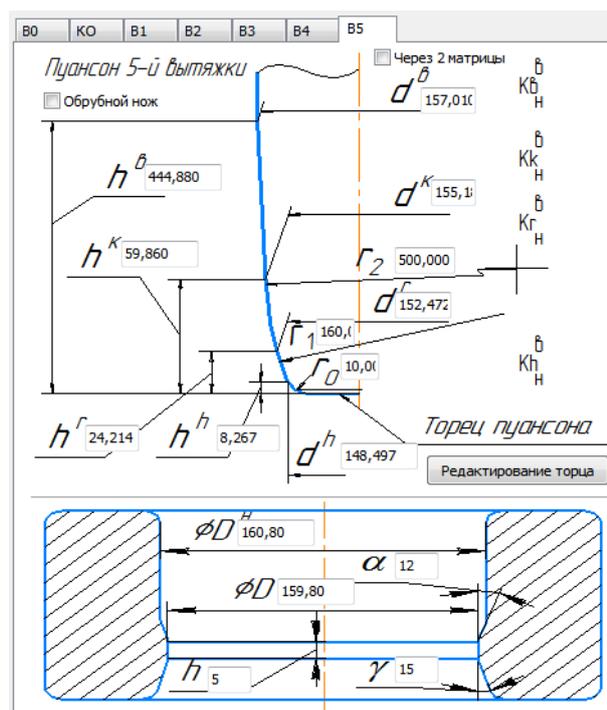


Рисунок 68 – Форма вывода результатов расчета инструмента заключительной вытяжки с утонением

Результаты проектирования инструмента заключительной вытяжки с утонением оказывают определяющее влияние на расчет промежуточных вытяжек с утонением и вытяжки (свёртки). Программа, разработанная на основе предложенной диа-

граммы деятельности, позволяет минимизировать количество ошибок расчета. Полученные с высокой точностью результаты расчета являются входными данными для модуля автоматического построения трехмерных моделей и чертежей пуансонов и матриц в системе автоматизированного проектирования КОМПАС-3D посредством использования прикладного программного интерфейса. Полученные трехмерные модели инструмента предлагается проверить перед изготовлением опытной партии в системе моделирования процессов обработки металлов давлением, в том числе и для настройки технологических параметров изготовления [47, 39].

6 Программный модуль автоматизированного проектирования процесса обжима полых цилиндрических деталей

В современных условиях, для получения продукции высокого качества, необходимо проведение компьютерного моделирования процессов изготовления изделий (полуфабрикатов), позволяющее оперативно и качественно определить значения технологических параметров.

Это позволит избежать изготовления определенного количества опытных изделий и полуфабрикатов и связанных с их выпуском временных и материальных затрат.

В настоящее время компьютерное моделирование является неотъемлемым для таких наукоемких процессов как холодная обработка металлов давлением, требующих детальных научно-производственных исследований и трудоемких расчетов.

Обработка металлов давлением позволяет максимально приблизить форму и размеры заготовок к форме и размерам изготавливаемой детали, что в свою очередь обеспечивает высокий коэффициент использования металла, снижение трудоемкости последующей обработки, например, резанием и, следовательно, уменьшение себестоимости продукции [38].

Достоинства процессов обработки металлов давлением обуславливают их широкое использование для выпуска продукции, применяемой в машиностроитель-

ной, авиационной, автомобилестроительной и других отраслях промышленности.

6.1 Постановка задачи проектирования операций холодного обжима

Обжим – прессовая технологическая операция, предназначенная для уменьшения с помощью обжимных матриц поперечного размера по боковой стенке полых цилиндрических деталей. Данная операция применяется для изготовления деталей типа горловин баттированных труб и проводится, как правило, с применением смазок.

В качестве разновидностей операции можно выделить обжим трубчатых сечений (редуцирование на ротационно-обжимных машинах) и обжим полых деталей, производимый вертикальным давлением на механических прессах [20].

При обжиге торцевая часть полуфабриката или трубной заготовки вдавливаются в воронкообразную рабочую часть матрицы, имеющую форму готового изделия или полуфабриката.

Если обжим производится в свободном состоянии, без противодействия снаружи и изнутри, пластически деформируется лишь часть полуфабриката, находящаяся в полости матрицы. Остальная часть деформируется упруго. Данным способом, в частности, получают горловины цилиндрических бидонов, баллоны аэрозольной упаковки, различные переходники трубопроводов[45].

Высокие затраты на проведение опытных работ и изготовление опытных партий приводят к необходимости создания специализированного программного модуля в рамках системы автоматизированного проектирования технологического процесса обжимных операций.

Промоделируем организационные процессы проектирования инструмента и изготовления деталей методом холодного обжима при помощи UML-диаграммы последовательности (interaction diagrams).

На UML-диаграмме [2] показаны экземпляры объектов и сообщения, которыми обмениваются объекты в рамках одного прецедента.

Типичный бизнес-процесс, включающий проектирование и изготовление инструмента, изготовление изделий и полуфабрикатов методом холодного обжима, включает следующие «действующие лица» (UML interaction actor): технологический отдел; технолог; программные модули проектирования обжимных операций; КОМПАС-3D; цех; отдел работы с заказчиком.

Целью настройки технологии производства продукции, несомненно, является получение такой последовательности, при которой информация об изделии будет с наименьшими затратами времени попадать в отдел работы с заказчиком без возврата на этап проектирования.

Для этого, в частности, необходим быстрый и точный автоматизированный контроль на ключевых этапах производства.

Таким образом, объект, в виде программного обеспечения, позволяющего автоматизировать процессы контроля и обработки результатов является опциональным, но в то же время ключевым для общей модели организационно-производственных процессов.

UML-диаграмма представлена на рисунке 69. Документация (в виде геометрических параметров и прочностных характеристик готового изделия) поступает в технологический отдел. Технолог составляет технологический процесс, руководствуясь исключительно собственным опытом, либо прибегая к автоматизированному проектированию, используя САПР и соответствующие программные модули, в частности модуль автоматизации проектирования операций обжима. По времени разница в подходах может быть существенной и различаться в десятки раз в пользу использования программных пакетов автоматизированного проектирования. Помимо временных рамок, прикладные пакеты автоматизации проектирования, за счет более высокой точности расчетов, позволяют уменьшить вероятность возврата документации (после выпуска полуфабрикатов) для внесения изменений в технологию производства. Возвраты на повторное проектирования технологического процесса и комплекта инструментов могут быть связаны с отличием геометрических либо прочностных характеристик полуфабриката от требуемых. В случае с операциями обжима такие отличия могут быть связаны с невозможностью предварительного

моделирования на основе матриц, созданных без применения САПР или соответствующих модулей. Без средств автоматизированного проектирования весьма затруднительно производить расчет нескольких вариантов распределения диаметров матриц и деформаций по операциям, что также повышает вероятность отсутствия наиболее успешного варианта в числе рассчитанных «вручную».

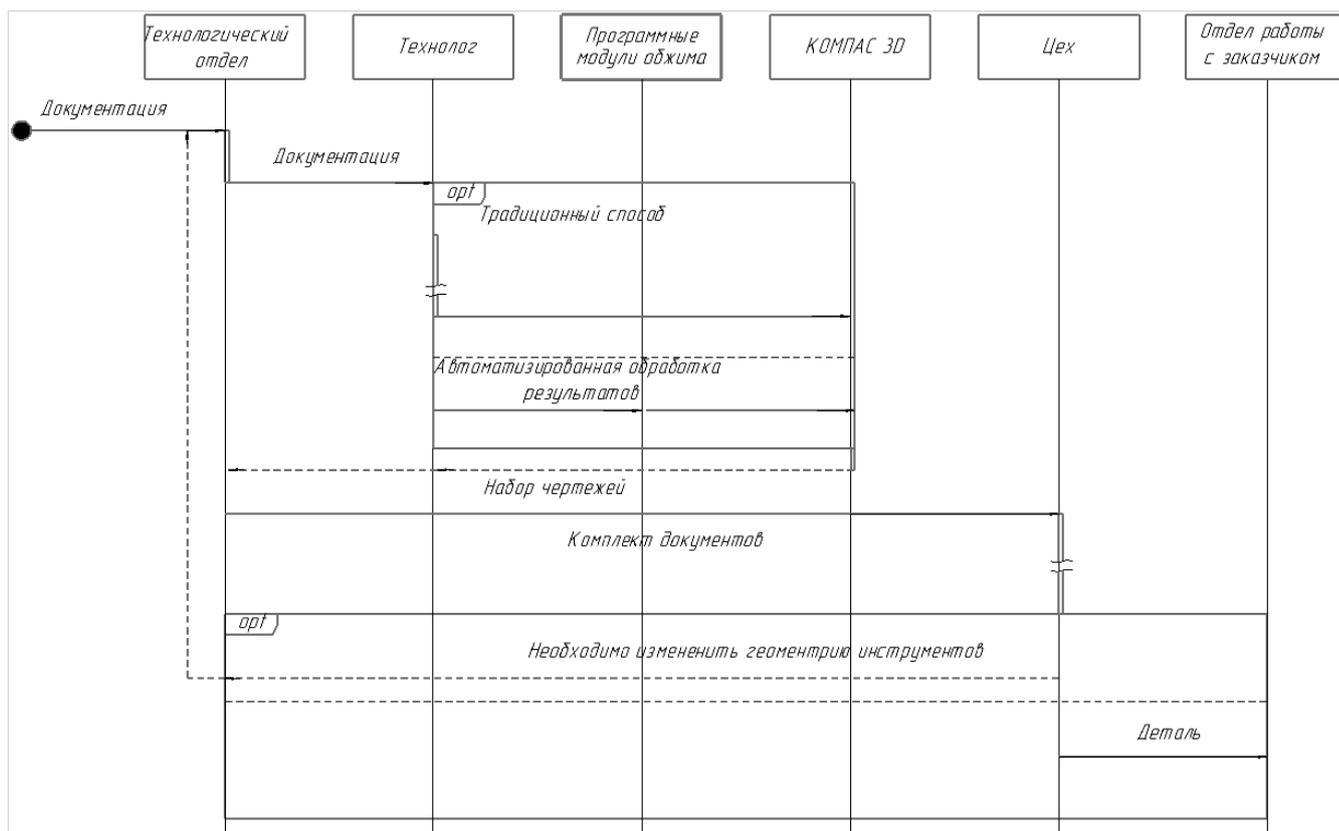


Рисунок 69 – UML-диаграмма последовательности проектирования изделий

6.2 Программное обеспечение автоматизированного проектирования процесса обжима

Программное обеспечение представляет собой модули, написанные в среде Delphi и позволяющие рассчитать количество операций обжима и диаметры обжимных матриц в зависимости от необходимых пооперационных степеней деформации.

Экранная форма модуля расчета параметров обжима состоит из нескольких

панелей. Информация, задаваемая на панели ввода данных, представлена в таблице 7.

Пользователь имеет возможность изменения степеней деформации на каждом из этапов. При этом система автоматически пересчитывает диаметры обжимных матриц для каждой операции.

Таблица 7 – Внешний вид панели ввода данных

Параметр	Единица измерения	Обозначение	Интервал допустимых значений	Значение
1	2	3	4	5
1 Диаметр полуфабриката	мм	Dn		160,76
2 Внутренний диаметр верхней части	мм	do		113,79
3 Толщина стенки верхней части	мм	S		1,80
4 Допуск на толщину стенки верхней части	мм	dS		-0,60
5 Диаметр полуфабриката в точке ската	мм	d3		152,60
6 Высота до начала ската	мм	Ick		384,88
7 Высота до начала верхней части	мм	Id		459,88
8 Высота полуфабриката	мм	h		730,00
9 Диаметр полуфабриката под фланцем	мм	d5		160,76
10 Высота точки сопряжения радиуса и конуса	мм	hнк		59,86
11 Диаметр в точке сопряжения радиуса и конуса	мм	dnк		155,19
12 Допуск на внутренний диаметр верхней части	мм	d_dO		0,20
13 Средняя операционная степень деформации	%	sosd		15,00
14 Допуск на толщину фланца	мм	dS3		0,40
15 Припуск верхнего торца фланца	мм	a2	0,5-1,5	1,00

Продолжение таблицы 7

1	2	3	4	5
16 Припуск на обрезку верхней части	мм	a4	30-50	40,00
17 Припуск на обточку фланца	мм	ai	1,1 -1,2	1,20
18 Высота обточки корпуса над фланцем	мм	hi		16,00
19 Коэфф. упругой деформации верхней части		bd	0,002-0,003	0,003
20 Коэфф. упругой деформации ската		bck	0,003-0,004	0,004
21 Коэфф. упругой деформации корпуса		bk	0,005-0,006	0,005

Параметры позиций от 1 до 13, передаваемые в таблицу являются информационными (отображение данных, полученных с предыдущих этапов).

Параметры позиций от 14 до 21, доступны для редактирования. Кнопка «Расчет» запускает алгоритм расчета количества обжимных операций.

Количество операций обжима Π определяется в зависимости от средней операционной степени деформации по формуле [24]:

$$\Pi = \frac{\lg d'_g - \lg d_g}{\lg 1 - E_{cp}}, \quad (86)$$

где E_{cp} – средняя операционная степень деформации, определяемая как:

$$E_{cp} = \frac{d'_g - d_1}{d_g} \cdot 100\%, \quad (87)$$

где d'_g – наружный диаметр части полуфабриката до обжима, мм;

d_g – наружный диаметр части полуфабриката, мм;

d_1 – наружный диаметр части полуфабриката после обжима на данной операции, мм.

Результаты расчета округляются в большую сторону, то есть даже при получении значения в 2,1 обжима, происходит увеличение количества операций до трех.

В процессе расчета количества обжимов автоматически выполняется назначение степеней деформации на каждую операцию. После расчета открывается вкладка, содержание которой представлено на рисунке 70.

По окончании расчета технолог может изменить количество обжимных операций путем изменения средней степени деформации. Увеличение значения средней степени приведет к снижению количества обжимных операций. Вместе с тем это может привести к дефектам полуфабриката.

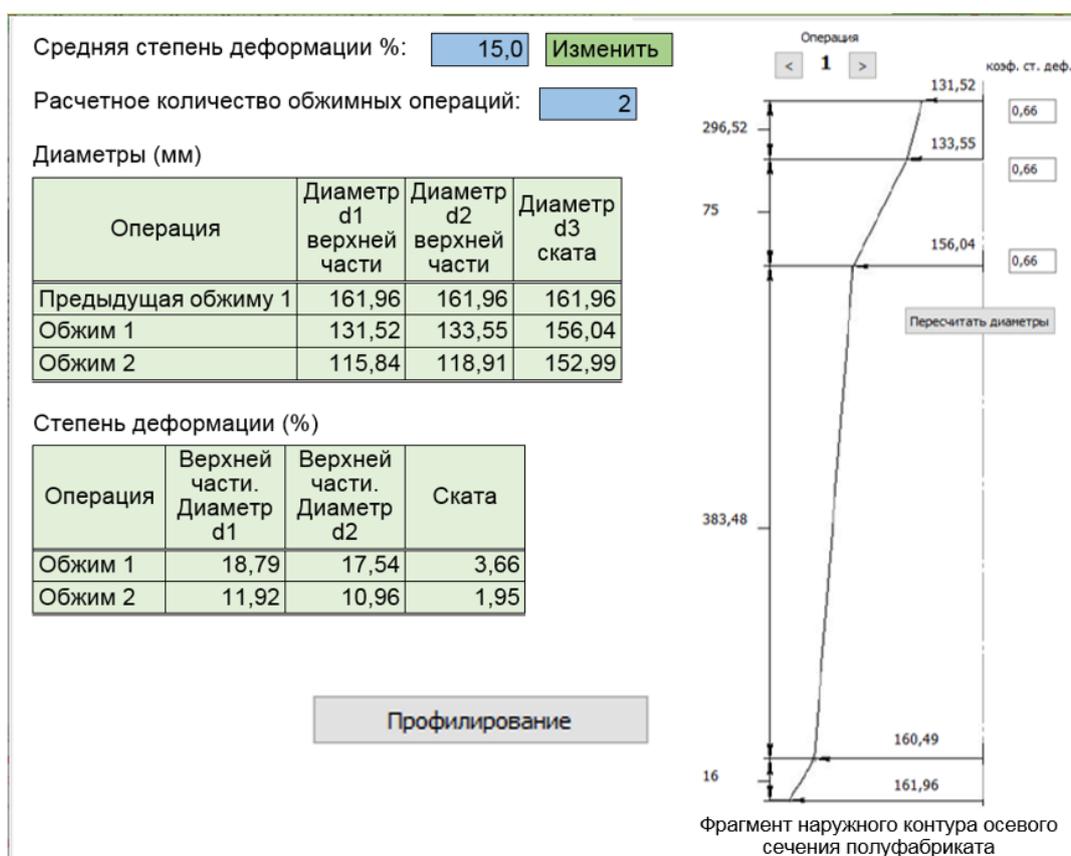


Рисунок 70 – Вкладка назначения степени деформаций

Уменьшение значения средней степени деформации приведет к увеличению количества обжимных операций, что позволит провести процесс обжима с меньшими рисками возникновения дефектов, однако поведет за собой удорожание производственного процесса.

Пользователю доступно переназначение степени деформации на каждой опе-

рации. В соответствии с этим, при нажатии кнопки «Пересчитать диаметры», произойдет автоматический пересчет диаметров и степеней деформации, отображаемых в таблицах и на эскизе (рисунок 70).

Набор полей ввода «коэф. ст. деф.» представляет собой значение из интервала от 0 до 1, отображающее долю текущей деформации по отношению к соседним операциям. В частности, коэффициент 0,66 означает, что из двух смежных операций первая выполнит деформацию на 66 % от суммарного изменения объема, вторая – на оставшиеся 34 %. Это позволяет гибко назначать параметры процессов деформаций и управлять прочностными характеристиками полуфабриката.

Диаметральные размеры рабочих частей матриц предварительного обжима определяются в зависимости от диаметральных размеров полуфабрикатов окончательного обжима и принятых степеней деформации.

Разбивка на верхнюю и нижнюю матрицу производится программным модулем автоматически в точке существенного изменения угла наклона ломанной, образующей контур полуфабриката.

Интерфейс программного модуля с активной вкладкой «Верхняя матрица» представлен на рисунке 71. Вкладка «Нижняя матрица» представлена на рисунке 72.

Интерфейс позволяет пользователю переключаться между эскизами верхней и нижней матриц для каждой из обжимных операций.

Для перехода между операциями следует использовать кнопки «<>» и «>>». Размеры матриц будут выводиться автоматически, в зависимости от выбранной операции.

Разработанный программный модуль обжима позволяет оперативно проектировать и получать значения параметров процесса обжима: количество обжимных операций и пооперационные диаметры инструмента и полуфабрикатов.

Выходные данные программы могут быть использованы для моделирования в системах конечно-элементного анализа. Применение разработанного модуля в совокупности с системами конечно-элементного анализа, например Deform, позволит сократить сроки изготовления и снизить себестоимость выпускаемой продукции за счет уменьшения времени, необходимого на проектирование процесса обжима и

технологического инструмента, а также сокращения комплектов опытных образцов обжимного инструмента.

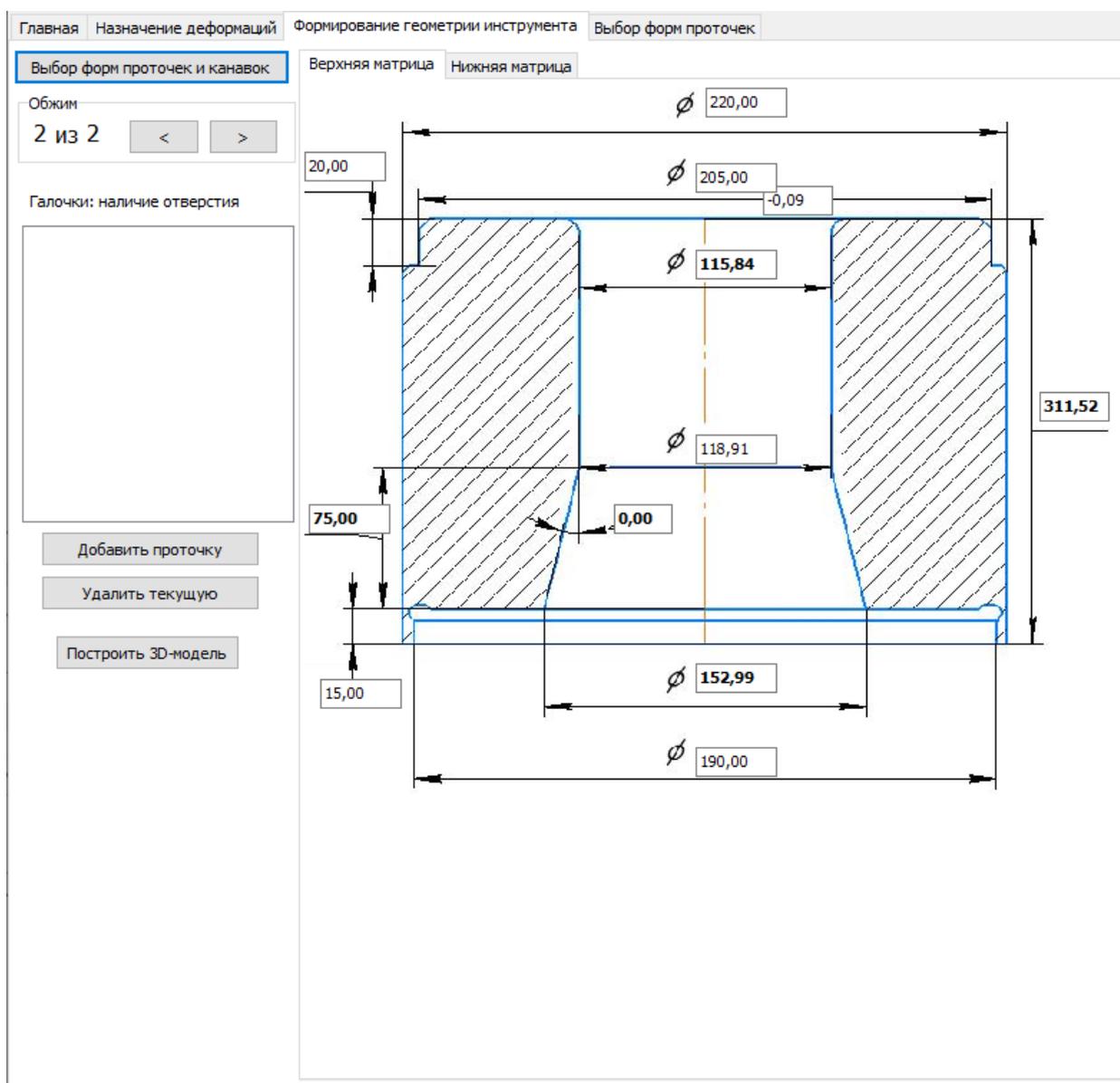


Рисунок 71 – Интерфейс проектирования верхней обжимной матрицы

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Оренбургской области в рамках проекта №37 от 14.08.2019 «Внедрение в хозяйственный оборот машиностроительных предприятий Оренбургской области» методологии конструкторско-технологической подготовки прессовых операций».

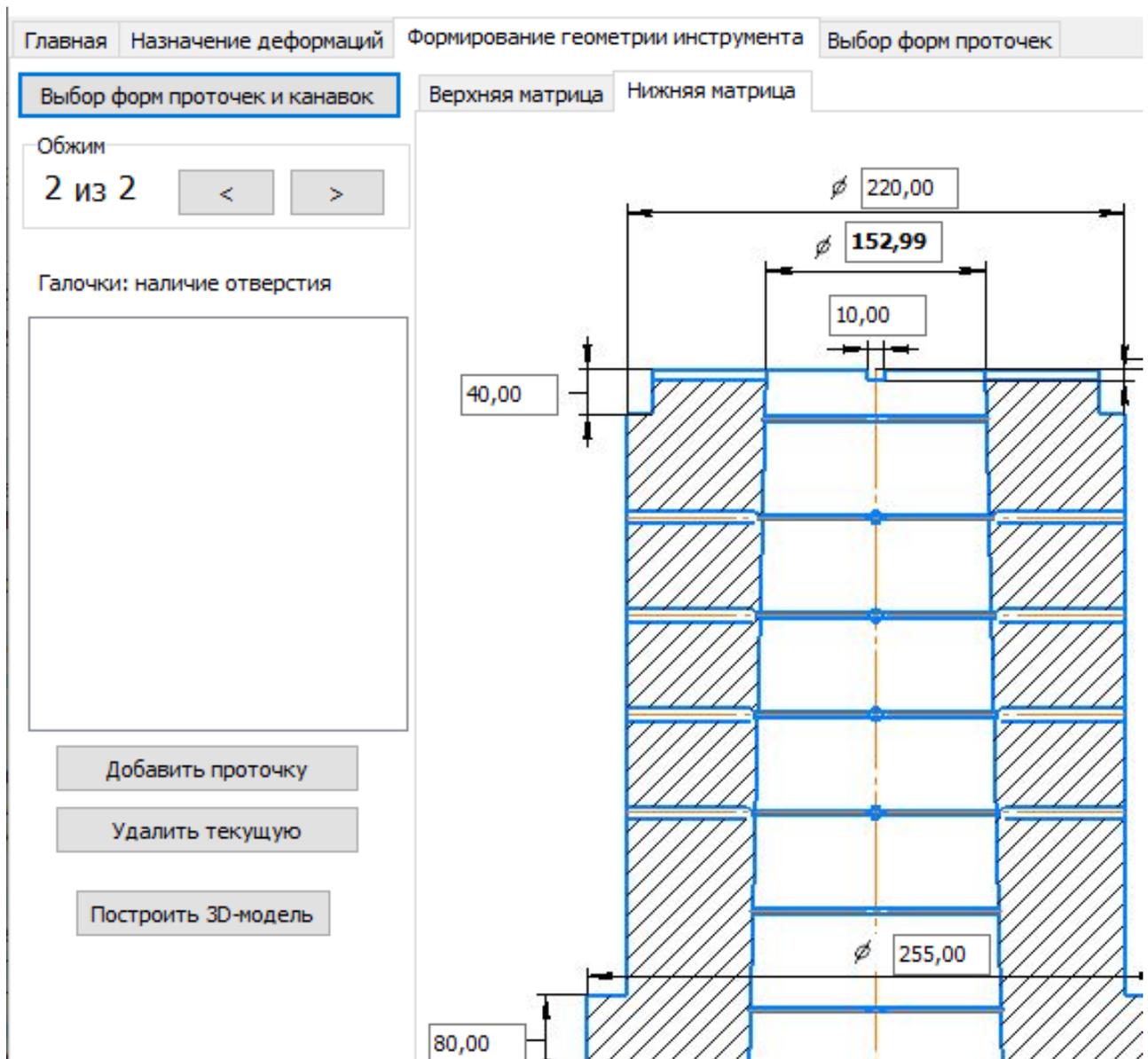


Рисунок 72 – Интерфейс проектирования нижней обжимной матрицы

Заключение

Конструкторско-технологическая подготовка прессовых операций направлена на решение задач автоматизации конструкторской подготовки производства, автоматизации технологической подготовки производства, управления нормативно-справочной информацией.

Проведенный анализ литературы в виде периодических и учебных изданий, а также таких систем в области автоматизированного проектирования прессового инструмента как КОМПАС Пресс-формы 3D, AutoCAD Inventor Tooling Suite, T-FLEX/Штампы, AutoForm-DieDesignerplus, IMOLD, CimatronE DieDesign, QForm и системы конечно-элементного моделирования течения металла в процессах обработки металлов давлением DEFORM™ - 3D показал, что на сегодняшний день существует множество инструментов решения задач автоматизации конструкторской подготовки производства. Однако, отсутствуют программно-воплощенные методики расчета и проектирования специфических инструментов для операций холодной вытяжки.

Каскадная модель жизненного цикла ПО подразумевает комплексный подход к автоматизации, заключающийся в проектировании полуфабриката на основе геометрии изделия, разработке обеспечений САПР, эксплуатационно-технического проектирования.

Конструкторские отделы разрабатывают эскизы, технические и рабочие проекты изделий, используя средства автоматизации проектирования, обеспечивают соответствие разрабатываемых конструкций техническим заданиям, стандартам, нормам техники безопасности, требованиям наиболее экономической технологии производства, а также использования в них стандартизованных и унифицированных деталей и сборочных единиц.

Описанные в монографии модели и алгоритмы автоматизации конструкторской подготовки производства позволяют повысить эффективность производства за счет ускорения времени выполнения подготовки и повышения общего уровня информатизации предприятия.

Список использованных источников

- 1 Автоматизация профилирования осевых сечений пуансонов гладкой совокупностью дуг кривых третьего порядка в технологических процессах глубокой вытяжки / Лысов В.А., Абрамова Н.Б., Янё В.С., Шевченко О.В., Щеголев А.В. // Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России. 2013, № 4 (120). С. 31-39.
- 2 Арлоу Д., UML 2 и Унифицированный процесс. Практический объектно-ориентированный анализ и проектирование : пер. с англ. / Д. Арлоу, И. Нейштадт. - 2-е издание. – СПб: Изд-во Символ-Плюс, 2007. 624 с.
- 3 Бобровский, С. И. Delphi 7. Учебный курс / С. И. Бобровский. – СПб.: Питер, 2004. – 736 С.
- 4 Виленкин, Н. Я. Математический анализ. Интегральное исчисление : учебное пособие для студентов 2 курса физико-математических факультетов педагогических институтов / Н. Я. Виленкин, Е. С. Куницкая, А. Г. Мордкович. – М. : Просвещение, 1979, – 176 с. – Режим доступа : http://lib.almam.ru/book_ma2.php?id=57. – Проверено: 01.09.2016.
- 5 Дмитриев, А. М. Повышение стойкости пуансонов при холодном выдавливании детали типа стакана при активном действии сил трения / А. М. Дмитриев, Н. В. Коробова, И. А. Якубовская // Вестник машиностроения, 2015. - № 9. - С. 24-29. - Библиогр.: с. 28-29.
- 6 Дмитриев, А. М. Повышение стойкости ступенчатых пуансонов при холодном выдавливании стаканов / А. М. Дмитриев, Ф. В. Гречников, Н. В. Коробова // Вестник машиностроения, 2017. - № 2. - С. 73-81. - Библиогр.: с. 80-81.
- 7 Евдокимов, С. Проектирование штампов листовой штамповки в системе T-FLEX/Штампы : [Электронный ресурс] / С. Евдокимов, А. Краснов, В. Пичугин, А. Рыбаков // САПР и графика, №3. – 2002. – Режим доступа: <http://www.sapr.ru/article.aspx?id=7010&iid=286>. - Дата обращения: 21.10.2016.
- 8 САПР и Графика : журнал [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sapr.ru/article.aspx?id=7195&iid=294>. – Дата обращения: 12.10.2016.

- 9 Использование изменения механических характеристик конструкционных углеродистых сталей при холодной объемной штамповке / А. М. Дмитриев [и др.] // Вестник машиностроения, 2015. - № 4. - С. 54-56. - Библиогр.: с. 56.
- 10 Каневский, И.Н. Неразрушающие методы контроля: учеб.пособие / И.Н. Каневский, Е.Н. Сальникова. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с.
- 11 Канюков, С.И. Входной язык системы автоматизированного проектирования поковок типа валов / С.И. Канюков, Л.В. Коновалов, О.Ю. Муйземнек // Программные продукты и системы. 2018. № 3. С. 614-619.
- 12 Ковка и штамповка: Справочник. В четырех томах. Том 3. Холодная объемная штамповка. Штамповка металлических порошков / Е.Г. Белков [и др.].— М.: Машиностроение, 2010. — 352 с.
- 13 Колесников, Р. Ядерные технологии в САПР. Опыт интеграции ядра С3D в САПР «БАЗИС» / Р. Колесников // САПР и графика. – 2015. - № 9 (227). - С. 36-39.
- 14 Кондусова, В.Б. Применение имитационного моделирования в рамках контракта жизненного цикла с целью определения его нормируемых показателей / В.Б. Кондусова // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2018, – №2 (172). – С. 49-52.
- 15 Кондусова, В.Б. Разработка имитационной модели жизненного цикла сложных изделий машиностроения с длительным сроком эксплуатации на основе применения контракта жизненного цикла / В.Б. Кондусова, Д.В. Кондусов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2019, – №2 (174). – С. 30-34.
- 16 Константинов, И. Л. Технологияковки и горячей объемной штамповки: Учебное пособие / И.Л. Константинов; СФУ - М.: НИЦ ИНФРА-М; Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2014. - 551 с.
- 17 Кузнецов, С.А. Специализированные САПР - результат технологии предметно-ориентированного проектирования программных продуктов / С.А. Кузнецов // Автоматизация. Современные технологии. – 2015, – № 2. – С. 14-19.
- 18 Лобов, В.А. Методика проектирования процесса вытяжки с утонением стенки по внутреннему контуру в производстве полых фланцевых изделий / В.А.

Лобов, Е.В. Затеруха // ИзвестияТулГУ. Технические науки. – 2019, – № 5. – С. 222-228.

19 Лысов, В.А. Автоматизация профилирования осевых сечений пуансонов гладкой совокупностью дуг кривых третьего порядка в технологических процессах глубокой вытяжки / В.А. Лысов, Н.Б. Абрамова, В.С. Янё, О.В. Шевченко, А.В. Щеголев // Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России. 2013. № 4. С. 31-39.

20 Малов, А. Н. Технология холодной штамповки / Малов А.Н. – М. : Машиностроение, 1969. – 568 с.

21 Мамаев, В. Б. Учет сил контактного трения при объемной штамповке / В. Б. Мамаев, М. Л. Первов // Вестник машиностроения, 2016. - № 3. - С. 74-78. - Библиогр.: с. 78.

22 Медведева С. А. Основы технической подготовки производства: Учебное пособие / С. А. Медведева. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 69 с.

23 Методика проектирования технологии холодного деформирования современных артиллерийских гильз : автореф. дисс. канд. техн. наук. / В.Ю.Травин – Тула. – 1999.

24 Навороцкий, Г.А. Ковка и штамповка. Том 3. Холодная объемная штамповка / Г.А. Навороцкий. - М: Машиностроение, 1987. - 384 с.

25 Научно-образовательный кластер CLAIM. Модели жизненного цикла ПО, проектирование как конструирование. – Режим доступа : http://it-claim.ru/Education/Course/ISDevelopment/Lecture_5.pdf . – Проверено: 07.11.2016.

26 Норенков, И. П. Основы автоматизированного проектирования [Текст] : учеб.для вузов / Норенков И.П. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. - 336 с.

27 Норсеев, С. Разработка приложений под КОМПАС в Delphi [Электронный ресурс] / С. Норсеев - 346 с. – Режим доступа: <http://forum.ascon.ru/index.php?topic=15837.20>. – Дата обращения: 12.10.2016.

28 Овечкин, М.В. Автоматизация расчета матриц объемной штамповки заготовок круглого сечения / М.В. Овечкин, А.В. Щеголев, В.Н. Шерстобитова // СТИН – 2017. – №12 – С.33-36.

- 29 Овечкина, Ю.И. Отличительные особенности методов холодного выдавливания металлов / Ю.И. Овечкина, М.В. Овечкин, А.И. Сергеев, В.Н. Шерстобитова, А.В. Щеголев // Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии: материалы VIII всероссийской науч.-практ. конф. Оренбург : Изд-во Оренбургский государственный университет, 2017. – С. 109-111.
- 30 Оленин, Л. Д. Безотходное изготовление точных заготовок под холодное выдавливание деталей автостроения / Л. Д. Оленин // Грузовик, 2012. - № 4. - С. 19-23.
- 31 Паршин, В. С. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D / В. С. Паршин, А. П. Кармышев, И. И. Некрасов, А. И. Пугин, А. А. Федулов. Екатеринбург: УрФУ – 2010. – 266 с.
- 32 Пелипенко, А. CimatronE DieDesign — проектирование штампов в рекордные сроки:[Электронный ресурс] / А. Пелипенко // САПР и графика. – 2008. – №5. – Режим доступа: <http://sapr.ru/article.aspx?id=19095&iid=886>. - Дата обращения: 12.10.2016.
- 33 Попова, Т. В. Анализ факторов, влияющих на эффективность применения технологических смазок при холодной объемной штамповке / Т. В. Попова, А. Г. Вяткин // Технология машиностроения, 2017. – № 9. – С. 10-14. – Библиогр.: с. 14.
- 34 Потемкин, В. IMOLD 2003 как инструмент конструктора пресс-форм :[Электронный ресурс] / В. Потемкин // CAD/CAM/CAE Observer №1 (10). - 2003. – Режим доступа: <http://www.cadcamcae.lv/hot/colla/imold.pdf>. – Дата обращения: 12.10.2016.
- 35 Пресс-формы 3D :[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://machinery.ascon.ru/software/developers/items/?prpid=946>.- Дата обращения: 21.10.2016.
- 36 Прикладная математика. Координаты середины отрезка. Определение площади треугольника по известным координатам его вершин. Площадь многоугольника. – Режим доступа : <http://www.pm298.ru/reshenie/fha0503.php>. – Проверено: 14.10.2016.

- 37 Прусаков, М.А. Расчет профиля пуансона для глубокой вытяжки тонкостенной полусферы / М.А. Прусаков, С.В. Бушуев // Вестник МГТУ «Станкин». – 2015. – № 2. – С. 50-55.
- 38 Романовский, В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. – 6-е изд. - Ленинград, Машиностроение, 1979 – 520 с.
- 39 Сергеев, А.И. Влияние скорости движения пуансона на толщину стенки при изготовлении баллонов высокого давления / А.И. Сергеев, А.И. Сердюк, А.В. Щеголев, М.В. Иванюк, А.В. Кузьмин // Вестник Курганского государственного университета. - Серия «Технические науки». 2017. № 12. С. 61-65.
- 40 Сергеев, А.И. Обзор систем моделирования процессов обработки металлов давлением / А. В. Щеголев, М. В. Овечкин, А.И. Сергеев // Материалы V Международной научно-практической конференции «Решение проблем развития предприятий: роль научных исследований»: Сборник научных трудов. - Краснодар, 2014. – С. 119 - 121.
- 41 Системы автоматизированного проектирования технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов : учеб. для вузов / под общ. ред. С. Н. Корчака. - М. : Машиностроение, 1988. - 350 с.
- 42 Судариков, М.Д. Анализ проблем развития инновационного предпринимательства на предприятиях машиностроительной отрасли / М.Д. Судариков, М.И. Ляпин // Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России. 2018, №2(138). – С. 62-70.
- 43 Сухов, С. В. Основы проектирования технологий листовой штамповки : учебное пособие / Сухов С. В., Жаров М. В., Соколов А. В. - НИЦ ИНФРА-М, - 2015. – 124 с.
- 44 Тела вращения. Материал из Википедии – свободной энциклопедии. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/Тела_вращения. – Проверено: 01.09.2016.
- 45 Титов, Ю А Технологияковки и объемной штамповки : учебное пособие / Ю. А. Титов, В. Н. Кокорин, О. И. Морозов. – Ульяновск : Ул- ГТУ, 2016. – 111 с. ISBN 978-5-9795-1613-4.

- 46 Щеголев, А.В. Автоматизация процесса профилирования пуансонов вытяжки с утонением / А.В. Щеголев, А.И. Сергеев, А.С. Русяев, В.Н. Шерстобитова // СТИН. – 2017. – № 11. – С. 8-11.
- 47 Щеголев, А.В. Методика анализа процесса глубокой вытяжки / А.В. Щеголев, А.И. Сердюк, А.И. Сергеев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 2. – С. 232-234.
- 48 AutoCAD Inventor Tooling Suite 2011 :[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.csoft.ru/catalog/soft/autocad-inventor-tooling-suite/autocad-inventor-tooling-suite-2011.html>.- Дата обращения: 21.10.2016.
- 49 AutoForm-DieDesigner^{®plus}:[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.autoform.com/ru/products/autoform-diedesigner-plus>. – Дата обращения: 12.10.2016.
- 50 DEFORM[™] - 3D: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://tesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_3d.pdf. - Дата обращения: 12.10.2016.
- 51 QForm VX :[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.qform3d.ru/products/qfv8>. - Дата обращения: 12.10.2016.
- 52 Shchegolev, A.V. Automated Shaping of Punches for Deep Extrusion with Thinning / A.V. Shchegolev, A.I. Sergeev, A.S. Rusyaev, V.N. Sherstobitova // Russian Engineering Research, 2018, vol. 38, no 5, pp. 387-389.
- 53 T-FLEX/Штампы : [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://plmpedia.ru/wiki/T-FLEX/Штампы>. - Дата обращения: 21.10.2016.

Приложение А
(справочное)
Код основных процедур

Модуль автоматизации проектирования обжимных операций

```
typeobj = record
```

```
  d_dulce:real; {d1} def_dulce:real;
```

```
    d_dulce2:real;{d2} def_dulce2:real;
```

```
    d_sk:real; {d3} def_sc:real;
```

```
    d_korp:real; {d4} def_korp:real;
```

```
    d_flan:real; {d5} def_flan:real;
```

```
//верхняя
```

```
l1,l2,l3,l4:real;
```

```
d1,d2,d3,d4,dgmin,d25:real;
```

```
  r1:real;
```

```
//нижняя
```

```
d4_,d5_,d05_:real;//расчетные
```

```
d6_,d11_,d1_,l1_,l2_,l3_,l4_,l5_,l6_:real;
```

```
rad_all,rad1_:real;
```

```
a1_,a2_:real;
```

```
end;
```

```
type protochka=record
```

```
  rc,rc2:real;
```

```
    rcl2,rcl1,rcl:real;
```

```
  rcr:boolean;
```

```
    hb1,hb2,ha:real;
```

```

h:real;
end;
type rec_SOJ=record
    dotv1,lotv,aotv,dotv2:real;
end;

procedure tform1.updown(left: Boolean);
var c:integer;
begin
c:=strtoint(lab1.Caption);
if (not left) and (c<strtoint(lab2.Caption)) then inc(c);
if (left) and (c>1) then dec(c);
lab1.Caption:=inttostr(c);
//геометрияматриц
edit_11.text:=FormatFloat('0.00', m[c].11);
edit_12.text:=FormatFloat('0.00', m[c].12);
edit_13.text:=FormatFloat('0.00', m[c].13);
edit_14.text:=FormatFloat('0.00', m[c].14);
editd1.text:=FormatFloat('0.00', m[c].d1);
editd2.text:=FormatFloat('0.00', m[c].d2);
editd3.text:=FormatFloat('0.00', m[c].d_sk);
editd4.text:=FormatFloat('0.00', m[c].d4);
editdgm_in_.text:=floattostr(m[c].d_dulce);
editr1.text:=FormatFloat('0.00', m[c].r1);
edit25.text:=FormatFloat('0.00', m[c].d_dulce2);

```

```

editd4_.text:=FormatFloat('0.00', m[c].d_korp);
edit2.Text:=editd3.Text;
editd5_.Text:=FormatFloat('0.00', m[c].d_flan);
editd11_.text:=FormatFloat('0.00', m[c].dl1_*2);
editl2_.text:=FormatFloat('0.00', m[c].l2_*2);
editl3_.text:=FormatFloat('0.00', m[c].l3_*2);
editl4_.text:=FormatFloat('0.00', m[c].l4_);
end;

```

Procedure TForm1.Raschet;

begin

```

labeld0.Caption:=stringgrid1.Cells[1,1];d0:=strtofloat(labeld0.Caption);

```

```

labels.Caption:=stringgrid1.Cells[1,2]; s:=strtofloat(labels.Caption);

```

```

labelds.Caption:=stringgrid1.Cells[1,3];ds:=strtofloat(labelds.Caption);

```

```

labeld3.Caption:=stringgrid1.Cells[1,4];d3:=strtofloat(labeld3.Caption);

```

la-

```

beld_d0.Caption:=stringgrid1.Cells[1,11];d_d0:=strtofloat(labeld_d0.Caption);

```

```

l_ck:=strtofloat(stringgrid1.Cells[1,5]);

```

```

l_d:=strtofloat(stringgrid1.Cells[1,6]);

```

```

l:=strtofloat(stringgrid1.Cells[1,7]);

```

```

d5:=strtofloat(stringgrid1.Cells[1,8]);

```

```

ds3:=strtofloat(stringgrid1.Cells[1,13]);

```

```

a2:=strtofloat(stringgrid1.Cells[1,14]);

```

```

a4:=strtofloat(stringgrid1.Cells[1,15]);

```

```

a1:=strtofloat(stringgrid1.Cells[1,16]);

```

```

h1:=strtofloat(stringgrid1.Cells[1,17]);
memo1.Clear;
d_max:=d0+d_d0+2*s;

labell1.Caption:=floattostr(Lk_);
d_k:=roundto(dnk,-2);//}d_n-(dnk-h1)*(d_n-d3)/(l_d-h1);
//формулаеслидиаметрвт. сопр. радиусаиконусанезадан
labeldnk.Caption:=floattostr(d_k);
labelhnk.Caption:=floattostr(hnk);

memo1.Lines.Add("");
memo1.Lines.Add('Изменение толщин стенок вследствие упругих
деформаций полуфабриката после обжатия:');
bd:=strtofloat(stringgrid1.Cells[1,18])*d_max;
memo1.Lines.Add(stringgrid1.Cells[1,18]+'*'+floattostr(d_max)+'='+'floa
ttostr(bd));
bck:=strtofloat(stringgrid1.Cells[1,19])*d3;
memo1.Lines.Add(stringgrid1.Cells[1,19]+'*'+floattostr(d3)+'='+'floattost
r(bck));
memo1.Lines.Add('Ската: '+floattostr(bck));

bk:=strtofloat(stringgrid1.Cells[1,20])*d5;
memo1.Lines.Add(stringgrid1.Cells[1,20]+'*'+floattostr(d5)+'='+'floattost
r(bk));
memo1.Lines.Add('Корпуса: '+floattostr(bk));
end;

```

```

Procedure TForm1.RStep;
var ost,ost_v,ost_n,ost_c:real;//верхнизскат
cur:integer;
n:integer;
proc:real;
begin
n:=strtoint(label3.Caption);
ost:=strtofloat(edit1.Text);
if n>1 then ost:=ost*2;
cur:=1;
for cur := 1 to n-1 do
begin
proc:=roundto(ost*2/3,-3);
stringgrid2.Cells[1,cur]:=floattostr(proc);
ost:=ost-proc;
end;
stringgrid2.Cells[1,cur]:=floattostr(ost);
end;

procedure TForm1.btnClick(Sender: TObject);

var s:string;
i:integer;
n:integer;
begin

```

```

Raschet;
edit1.Text:=stringgrid1.Cells[1,12];
label3.Caption:=floattostr(k);
n:=round(k);
setlength(m,n+1);
stringgrid2.RowCount:=round(k+2);
stringgrid3.RowCount:=round(k+1);
stringgrid2.Cells[0,0]:='№ операции';
stringgrid2.Cells[1,0]:='d1 Дульца, мм';
stringgrid2.Cells[2,0]:='d2 Дульца,мм';
stringgrid2.Cells[3,0]:='d3 Скат,мм';
stringgrid3.Cells[0,0]:='№ операции';
stringgrid3.Cells[3,0]:='Деф. ската,%';
for i:=1 to stringgrid2.RowCount-1 do stringgrid2.Cells[0,i]:=inttostr(i-
1);
for i:=1 to stringgrid3.RowCount-1 do stringgrid3.Cells[0,i]:=inttostr(i);
stringgrid2.Cells[0,1]:='0 (дообж.)';
tabsheet2.Show;
//rstep;
button2.Enabled:=true;
{ последнийобжим }
m[n].d_dulce:=roundto(d_min-bd,-2);
stringgrid2.Cells[1,stringgrid2.RowCount-1]:=floattostr(m[n].d_dulce);
if d25=-1 then m[n].d_dulce2:=m[n].d_dulce
else m[n].d_dulce2:=roundto(d25-bd,-2);
stringgrid2.Cells[2,stringgrid2.RowCount-1]:=floattostr(m[n].d_dulce2);

```

```

m[n].d_sk:=roundto(strtfloat(stringgrid1.Cells[1,4])-Edit4_otklon-bck,-
2);//скат
stringgrid2.Cells[3,stringgrid2.RowCount-1]:=floattostr(m[n].d_sk);
m[n].d_korp:=roundto(d5 - Ed_d5_otklon - bk,-2);//корпус
m[n].d_flan:=roundto(d0,-2);//фланец
m[0].d_dulce:=d0;stringgrid2.Cells[1,1]:=floattostr(m[0].d_dulce);
m[0].d_dulce2:=d0;stringgrid2.Cells[2,1]:=floattostr(m[0].d_dulce2);
m[0].d_sk:=d0;stringgrid2.Cells[3,1]:=floattostr(m[0].d_sk);
m[0].d_korp:=d0;stringgrid2.Cells[4,1]:=floattostr(m[0].d_korp);
m[0].d_flan:=d0;stringgrid2.Cells[5,1]:=floattostr(m[0].d_flan);
m[n].l2:=L1_-lk_;
m[n].l4:=m[0].l2+m[0].l1+l_-l1_-h1;
m[n].l4_:=lk_+h1;

for i := 1 to n-1 do
begin
m[i].d_korp:=m[n].d_korp;
m[i].d_flan:=d0;
end;
{в цикле до предпоследнего: назначаем степень, получаем диамет-
ры}
if n>1 then //еслиобжимов>1
begin
for i := 1 to n-1 do
begin
//перваядеформация

```

```

if m[i].def_dulce=0 then m[i].def_dulce:=0.66;
if m[i].def_dulce2=0 then m[i].def_dulce2:=0.66;
if m[i].def_sc=0 then m[i].def_sc:=0.66;
    /////считаем диаметры
    m[i].d_dulce:=roundto(m[i-1].d_dulce-(m[i-1].d_dulce-
m[n].d_dulce)*m[i].def_dulce,-2);
    m[i].d_dulce2:=roundto(m[i-1].d_dulce2-(m[i-1].d_dulce2-
m[n].d_dulce2)*m[i].def_dulce2,-2);
    m[i].d_sk:=roundto(m[i-1].d_sk-(m[i-1].d_sk-m[n].d_sk)*m[i].def_sc,-
2);
    stringgrid2.Cells[1,i+1]:=floattostr(m[i].d_dulce);
    stringgrid2.Cells[2,i+1]:=floattostr(m[i].d_dulce2);
    stringgrid2.Cells[3,i+1]:=floattostr(m[i].d_sk);
    m[i].l2:=m[n].l2;
    m[i].l4:=m[n].l4;
    m[i].l4_:=m[n].l4_;
end;
end;

//Заполним таблицу деформаций
fori:= 1 tondo
begin
    stringgrid3.Cells[1,i]:=floattostr(roundto((1-m[i].d_dulce/m[i-
1].d_dulce)*100,-2));
    stringgrid3.Cells[2,i]:=floattostr(roundto((1-m[i].d_dulce2/m[i-
1].d_dulce2)*100,-2));

```

```
stringgrid3.Cells[3,i]:=floattostr(roundto((1-m[i].d_sk/m[i-1].d_sk)*100,-  
2));  
end;
```

```
lab2.Caption:=floattostr(n);//КОЛ-ВО шагов в переключалке эскизов-  
размеров
```

```
for i:=0 to length(m)-1 do  
begin  
m[i].l1:=strtofloat(edit_l1.text);  
m[i].l3:=strtofloat(edit_l3.text);  
m[i].d1:=strtofloat(editd1.text);  
m[i].d2:=strtofloat(editd2.text);  
m[i].d4:=strtofloat(editd4.text);  
m[i].l6_:=strtofloat(editl6_.text);  
m[i].d6_:=strtofloat(editd6_.text)/2;  
m[i].rad1_:=strtofloat(editrad1_.text);  
m[i].dl1_:=strtofloat(editdl1_.text)/2;  
m[i].l2_:=strtofloat(editl2_.text);  
m[i].l3_:=strtofloat(editl3_.text);  
m[i].rad_all:=strtofloat(editRad_all.text);  
m[i].l1_:=strtofloat(editl1_.text);  
m[i].d1_:=strtofloat(editd1_.text)/2;  
end;  
updown(false);  
end;
```

```
procedure TForm1.Button10Click(Sender: TObject);  
begin  
  updown(true);  
end;
```

```
procedure TForm1.Button11Click(Sender: TObject);  
begin  
  checklistbox1.Items.Delete(checklistbox1.ItemIndex);  
end;
```

```
procedure TForm1.Button12Click(Sender: TObject);  
begin  
  updown(false);  
end;
```

```
procedure TForm1.Button13Click(Sender: TObject);  
const  
  pTop_Part = -1;  
  vm_Shaded = 3;  
  
  o3d_planeXOY = 1;  
  o3d_sketch = 5;  
  o3d_bossRotated = 28;  
  o3d_cutExtrusion = 26;  
  o3d_planeOffset = 14;  
  o3d_axis2Planes = 9;
```

```

o3d_planeYOZ = 3;
o3d_planeXOZ = 2;
o3d_circularCopy = 36;
var
newKompasAPI: IApplication;
  Document3D: ksDocument3D;
  Part: ksPart;
  VariableCollection: ksVariableCollection;
  Variable: ksVariable;
i,ii,j:integer;

```

EntityPlaneX-

```

OY,EntityPlaneXOZ,EntityPlaneYOZ,EntitySketch,EntityBossRotated,Entity
Axis:ksEntity;
  SketchDefinition,SketchDefinition_ofset: ksSketchDefinition;
  Document2D,Document2D_ofset: ksDocument2D;
  BossRotatedDefinition: ksBossRotatedDefinition;
  CutDefinition: ksCutRotatedDefinition;
  GroupID: integer;
  EntitySketch1, EntitySketch2,EntityCircularCopy: ksEntity;
  EntityExtrusion, EntityCutExtrusion: ksEntity;
  CutExtrusionDefinition: ksCutExtrusionDefinition;
iMath: ksMathematic2D;
iCon,icon2,icon3: ksCON;
  Axis2PlanesDefinition: ksAxis2PlanesDefinition;
  EntityPlane, EntityOffsetPlane: ksEntity;

```

```
PlaneOffsetDefinition: ksPlaneOffsetDefinition;  
CircularCopyDefinition: ksCircularCopyDefinition;  
EntityCollection: ksEntityCollection;
```

```
dx42m:array of real;//x начала проточек
```

```
a,b,a2:real;
```

```
h2,d42,l62:real;
```

```
botv:real;
```

```
apr,aprx:real;
```

```
jx,jy,jx2,jy2,jj:real;
```

```
begin
```

```
if opendialog.Execute then
```

```
begin
```

```
// Подключаемся к КОМПАСу
```

```
  KompasStart;
```

```
for i:= 1 to length(m)-1 do
```

```
begin
```

```
  // Открываем документ-модель
```

```
  Document3D := ksDocument3D(kompas.Document3D());
```

```
  Docu-
```

```
ment3D.Open(Pchar(ExtractFilePath(paramstr(0))+ 'bin\objim_top.m3d')  
  ,  
  FALSE);
```

```
  // Получаем интерфейс компонента
```

```

Part := ksPart(Document3D.GetPart(pTop_Part));
    // Получаем массив переменных модели
VariableCollection := ksVariableCollection(Part.VariableCollection());

    // Изменяем значение переменной
Variable := ksVariable(VariableCollection.GetByName('d1', true, true));
Variable.value := m[i].d_dulce;
Variable := ksVariable(VariableCollection.GetByName('d2', true, true));
Variable.value := m[i].d_dulce2;
Variable := ksVariable(VariableCollection.GetByName('d3', true, true));
Variable.value := m[i].d_sk;
Variable := ksVariable(VariableCollection.GetByName('d4', true, true));
Variable.value := m[i].d4;
Variable := ksVariable(VariableCollection.GetByName('l4', true, true));
Variable.value := m[i].l1+(L1_-lk_){скат}+(l_-l1_-h1){дутьце};

// Перестраиваем модель
Part.RebuildModel();
    // Перерисовываем документ
Document3D.RebuildDocument();
    // Устанавливаем полутонное отображение модели
Document3D.drawMode := vm_Shaded;
    // Включаем отображение каркаса
Document3D.shadedWireframe := true;

```

```

Document3D.SaveAs(extractfilepath(opendialog.FileName)+inttostr(i)+'
'+extractfilename(opendialog.FileName)+'_верхняя.m3d');
// Делаем КОМПАС ВИДИМЫМ
kompas.Visible := true;
sleep(1000);
end;
for i:= 1 to length(m)-1 do
begin
    m[i].d4_:=m[i].d_flan/2;//фланец
    m[i].d5_:=m[i].d_korp/2;//дно
m[i].d3:=m[i].d_sk;
end;
////////////////////////////////////
//Нижние матрицы
////////////////////////////////////
for i:= 1 to length(m)-1 do
begin
    sleep(1000);
    //Получаем интерфейс документа-модели
    Document3D:=ksDocument3D(kompas.Document3D());
    //Создаем документ-модель
Document3D.Create(FALSE,true);
    //Делаем КОМПАС ВИДИМЫМ
kompas.Visible:=true;
//Устанавливаем полутонное изображение модели
    Document3D.drawMode:=vm_Shaded;

```

```

//Получаем интерфейс компонента
Part:= ksPart(Document3D.GetPart(pTop_Part));
//Получаем интерфейс объекта "плоскость XOY"
EntityPlaneXOY:=ksEntity(Part.GetDefaultEntity(o3d_planeXOY));
////////////////////////////////////
//Эскиз
////////////////////////////////////
//Получаем интерфейс объекта "Эскиз"
EntitySketch:=ksEntity(Part.NewEntity(o3d_sketch));
//Получаем интерфейс параметров эскиза
SketchDefinition:=ksSketchDefinition(EntitySketch.GetDefinition());
//Устанавливаем плоскость XOY базовой для эскиза
SketchDefinition.SetPlane(EntityPlaneXOY);
//Создаем эскиз
EntitySketch.Create();
//Входим в режим редактирования эскиза
Document2D:=ksDocument2D(SketchDefinition.BeginEdit());
iMath := ksMathematic2D(kompas.GetMathematic2D);
iCon := ksCON(kompas.GetParamStruct(ko_CON));
iCon2 := ksCON(kompas.GetParamStruct(ko_CON));
a:=m[i].d4_-m[i].d3/2;
b:=m[i].l4_-m[i].l6_;
a2:=arctan(a/b)*57.3+90;
m[i].a1_:=90-arctan((m[i].d5_-m[i].d4_)/m[i].l6_)*57.3;//+90;

```

```
iMath.ksCouplingLineLine(m[i].d6_,0, 0, m[i].d4_,m[i].l6_,m[i].a1_,  
m[i].rad1_, iCon);//скруглениедно-первыйконус
```

```
Document2D.ksArcByPoint(icon.GetXc(0),icon.GetYc(0),  
m[i].rad1_,icon.GetX1(0),icon.GetY1(0),icon.GetX2(0),icon.GetY2(0),-1,1);
```

```
Docu-  
ment2D.ksLineSeg(m[i].d4_,m[i].l6_,icon.GetX2(0),icon.GetY2(0),1);//первы  
йконус
```

```
Document2D.ksLineSeg(icon.GetX1(0),icon.GetY1(0),m[i].d6_-  
m[i].rad_all,0,1);//дно
```

```
Document2D.ksArcByPoint(m[i].d6_-  
m[i].rad_all,0+m[i].rad_all,m[i].rad_all,m[i].d6_-  
m[i].rad_all,0,m[i].d6_,0+m[i].rad_all,1,1);
```

```
Document2D.ksLineSeg(m[i].d6_,0+m[i].rad_all,m[i].d6_,m[i].l1_-  
m[i].rad_all,1);//нижняянаружняястенка
```

```
Document2D.ksArcByPoint(m[i].d6_+m[i].rad_all,m[i].l1_-  
m[i].rad_all, m[i].rad_all,m[i].d6_,m[i].l1_-  
m[i].rad_all,m[i].d6_+m[i].rad_all,m[i].l1_,-1,1);
```

```
Document2D.ksLineSeg(m[i].d6_+m[i].rad_all,m[i].l1_,m[i].dl1_-  
m[i].rad_all,m[i].l1_,1);//нижняястенкаприлива
```

```
Document2D.ksArcByPoint(m[i].dl1_-  
m[i].rad_all,m[i].l1_+m[i].rad_all, m[i].rad_all, m[i].dl1_-m[i].rad_all,m[i].l1_,  
m[i].dl1_,m[i].l1_+m[i].rad_all,1,1);
```

```
Docu-  
ment2D.ksLineSeg(m[i].dl1_,m[i].l1_+m[i].rad_all,m[i].dl1_,m[i].l1_+m[i].l2  
_-m[i].rad_all,1);//боковаястенкаприлива
```

Document2D.ksArcByPoint(m[i].dl1_-m[i].rad_all,m[i].l1_+m[i].l2_-
m[i].rad_all, m[i].rad_all, m[i].dl1_,m[i].l1_+m[i].l2_-m[i].rad_all, m[i].dl1_-
m[i].rad_all,m[i].l1_+m[i].l2_,1,1);

Document2D.ksLineSeg(m[i].dl1_-m[i].rad_all,m[i].l1_+m[i].l2_,
m[i].dl1_+m[i].rad_all,m[i].l1_+m[i].l2_,1);//верхняястенкаприлива

Docu-

ment2D.ksArcByPoint(m[i].dl1_+m[i].rad_all,m[i].l1_+m[i].l2_+m[i].rad_all,
m[i].rad_all, m[i].dl1_+m[i].rad_all,m[i].l1_+m[i].l2_,
m[i].dl1_,m[i].l1_+m[i].l2_+m[i].rad_all,-1,1);

Document2D.ksLineSeg(m[i].dl1_,m[i].l1_+m[i].l2_+m[i].rad_all,
m[i].dl1_,m[i].l4_-m[i].l3_-m[i].rad_all,1);//средняянаружнаястенка

Document2D.ksArcByPoint(m[i].dl1_-m[i].rad_all,m[i].l4_-m[i].l3_-
m[i].rad_all, m[i].rad_all, m[i].dl1_,m[i].l4_-m[i].l3_-m[i].rad_all, m[i].dl1_-
m[i].rad_all,m[i].l4_-m[i].l3_,1,1);

Document2D.ksLineSeg(m[i].dl1_-m[i].rad_all,m[i].l4_-m[i].l3_,
m[i].d05_+m[i].rad_all,m[i].l4_-
m[i].l3_,1);//переходнаверхнююнаружнуюстенку

Document2D.ksArcByPoint(m[i].d05_+m[i].rad_all,m[i].l4_-
m[i].l3_+m[i].rad_all, m[i].rad_all, m[i].d05_+m[i].rad_all,m[i].l4_-m[i].l3_,
m[i].d05_,m[i].l4_-m[i].l3_+m[i].rad_all,-1,1);

Document2D.ksLineSeg(m[i].d05_,m[i].l4_-m[i].l3_+m[i].rad_all,
m[i].d05_,m[i].l4_-m[i].rad_all,1);//верхняянаружнаястенка

Document2D.ksArcByPoint(m[i].d05_-m[i].rad_all,m[i].l4_-
m[i].rad_all, m[i].rad_all, m[i].d05_,m[i].l4_-m[i].rad_all, m[i].d05_-
m[i].rad_all,m[i].l4_,1,1);

```

Document2D.kslineseg(m[i].d05_-m[i].rad_all,m[i].l4_,
m[i].d3/2,m[i].l4_,1);//верхняястенка
//////////////////////////////////////////проточки
if CheckListBox1.Items.Count>0 then //еслиестьпроточки
begin
    d42:=m[i].d4_;//начальная точка отрезка с прточкой по x
    l62:=m[i].l6_;//y
    {параметры проточек}
    pr.h:=strtofloat(CheckListBox1.Items.Strings[0]); // высота до ниж-
ней проточки
    pr.rc2:=strtofloat(editrc1.Text)/2;//внутр. радиус
    pr.rc:=strtofloat(editrc.Text);
    //pr.hb1:=strtofloat(edithb1.Text);//высота до оси нижнего отверстия
    //pr.hb2:=strtofloat(edithb2.Text); // высота до оси верхнего отвер-
ствия
    //pr.ha:=strtofloat(editha.Text);//расстояние между проточками
    pr.rcl1:=strtofloat(editrcl1.Text);pr.rcl2:=strtofloat(editrcl2.Text);
    pr.rcd:=strtofloat(editrcd.Text);
    h2:=pr.h;//h2 - высота текущей проточки
    jj:=m[i].l4_;//вся высота (нужна?)
    setlength(dx42m,CheckListBox1.Items.Count);
    for ii:=0 to CheckListBox1.Items.Count-1 do //циклповсемпроточкам
    begin
        h2:=strtofloat(CheckListBox1.Items.Strings[ii]);
        apr:=arctan((pr.rcl2-pr.rcl1)/2/pr.rcd)*57.3;

```

```

iMath.ksCouplingLineLine(m[i].d4_,m[i].l6_,a2,      0,h2-pr.rc12/2,0,0,
iCon);//находимточку aprx
aprx:=iCon.GetX1(0);
iMath.ksCouplingLineLine(m[i].d4_,m[i].l6_,a2,      aprx,h2-pr.rc12/2,aprx,
pr.rc, iCon);//находимскруглениеконус-проточканиз
Document2D.ksLineSeg(d42,l62,      iCon.GetX1(3),iCon.GetY1(3),1);
//перемычкаповертикали
Document2D.ksArcByPoint(iCon.GetXc(3),iCon.GetYc(3),
pr.rc,iCon.GetX1(3),iCon.GetY1(3),iCon.GetX2(3),iCon.GetY2(3),-
1,1);//скруглениеконус-проточканиз
if (aprx+pr.rcd)<(iCon.GetX2(3)) then pr.rcd:=pr.rcd+(iCon.GetX2(3)-
aprx-pr.rcd);
Document2D.ksLineSeg(iCon.GetX2(3),iCon.GetY2(3),aprx+pr.rcd,h2-
pr.rc2,1); //подъемнижний
jx:=aprx+pr.rcd;
jy:=h2-pr.rc2;

iMath.ksCouplingLineLine(m[i].d4_,m[i].l6_,a2,aprx+pr.rcd,h2+pr.rc2,180-
aprx,pr.rc, iCon2);//находимскруглениеконус-проточкаверх
Document2D.ksArcByPoint(iCon2.GetXc(3),iCon2.GetYc(3),
pr.rc,iCon2.GetX1(3),iCon2.GetY1(3),iCon2.GetX2(3),iCon2.GetY2(3),1,1);//ск
руглениеконус-проточкаверх

```

```

if      RadioGroup1.ItemIndex=1      then      Docu-
ment2D.ksArcByPoint(aprx+pr.rcd,h2, pr.rc1/2, jx,jy, jx,h2+pr.rc2, 1,1) { ос-
новное скругление }
      else Document2D.ksLineSeg(jx,jy, jx,h2+pr.rc2 ,1); //основная стенка
      Document2D.ksLineSeg(icon2.GetX2(3),icon2.GetY2(3),  jx,jy+pr.rc1
,1); //подъем верхний
      dx42m[ii]:=icon.GetX2(3)-1;;
      d42:=icon2.GetX1(3);
      l62:=icon2.GetY1(3);
      end;
      Docu-
ment2D.ksLineSeg(icon2.GetX1(3),icon2.GetY1(3),m[i].d3/2,m[i].l4_,1); //вто-
рой конус
      end      else      Docu-
ment2D.ksLineSeg(m[i].d4_,m[i].l6_,m[i].d3/2,m[i].l4_,1); //второй конус без п-
роточек
      //вращаем
      Document2D.ksLineSeg(0,0, 0,m[i].l4_,3); //ось
      SketchDefinition.EndEdit();
      EntityBossRotated:=ksEntity(Part.NewEntity(o3d_bossRotated));
      //Получаем интерфейс параметров объекта
      BossRotatedDefini-
tion:=ksBossRotatedDefinition(EntityBossRotated.GetDefinition());
      //Направление вращения - прямое
      BossRotatedDefinition.directionType:=0;
      //Устанавливаем параметры операции

```

```

BossRotatedDefinition.SetSideParam(false,360);
    //Устанавливаемэскизоперации
BossRotatedDefinition.SetSketch(SketchDefinition);
//Создаемоперацию
EntityBossRotated.Create();
//Осьнапересечениидвухплоскостей
////////////////////////////////////
    //Получаеминтерфейсобъекта "ось"
EntityAxis:=ksEntity(Part.NewEntity(o3d_axis2Planes));
//Получаеминтерфейспараметровобъекта
Ax-
is2PlanesDefinition:=ksAxis2PlanesDefinition(EntityAxis.GetDefinition());
//Получаеминтерфейсобъекта "плоскостьXOZ"
//EntityPlaneXOZ:=ksEntity(Part.GetDefaultEntity(o3d_planeXOY));
    EntityPlaneYOZ:=ksEntity(Part.GetDefaultEntity(o3d_planeYOZ));
    //Устанавливаемплоскости
Axis2PlanesDefinition.SetPlane(1,EntityPlaneXOY);
Axis2PlanesDefinition.SetPlane(2,EntityPlaneYOZ);
    //Создаемось
EntityAxis.Create();
    ////////////////////////////////// {отверстия}
if CheckListBox1.Items.Count>0 then //еслиестьпроточки
begin
for ii:=0 to CheckListBox1.Items.Count-1 do //циклповсемпроточкам
if CheckListBox1.Checked[ii] then
begin

```

```

    h2:=strtof(float(CheckListBox1.Items.Strings[ii]);
{смещенная плоскость}
    //Получаем интерфейс объекта "смещенная плоскость"
EntityOffsetPlane:=ksEntity(Part.NewEntity(o3d_planeOffset));
    //Получаем интерфейс параметров смещенной плоскости
PlaneOffsetDefini-
tion:=ksPlaneOffsetDefinition(EntityOffsetPlane.GetDefinition());
    PlaneOffsetDefinition.direction:=TRUE;
//Прямоенаправление смещения
    PlaneOffsetDefinition.offset:=h2; //Величина смещения
    //Устанавливаем базовую плоскость
PlaneOffsetDefinition.SetPlane(ksEntity(Part.GetDefaultEntity(2)));
//Создаем смещенную плоскость
EntityOffsetPlane.Create();
    //Включаем отображение плоскостей
Document3D.hideAllPlanes:=FALSE;
//Получаем интерфейс объекта "Эскиз"
EntitySketch2:=ksEntity(Part.NewEntity(o3d_sketch));
    //Получаем интерфейс параметров эскиза
SketchDefini-
tion_ofset:=ksSketchDefinition(EntitySketch2.GetDefinition());
    //Устанавливаем плоскость
SketchDefinition_ofset.SetPlane(EntityOffsetPlane);
//Создаем эскиз
EntitySketch2.Create();
    //Входим в режим редактирования эскиза

```

Docu-
ment2D_ofset:=ksDocument2D(SketchDefinition_ofset.BeginEdit());

{эскиз}

soj.dotv1:=strtofloat(editdotv1.Text);

soj.dotv2:=strtofloat(editdotv2.Text);

soj.lotv:=strtofloat(editlotv.Text); soj.aotv:=strtofloat(editaotv.Text);

Docu-

ment2D_ofset.ksLineSeg(dx42m[ii],soj.dotv1/2,dx42m[ii],0,1);//вертикальлев
ая

Docu-

ment2D_ofset.ksLineSeg(dx42m[ii],soj.dotv1/2,dx42m[ii]+soj.lotv+pr.rc2*2,s
oj.dotv1/2,1);//горизонтальпервая

botv:=sin(degtorad(soj.aotv/2))/cos(degtorad(soj.aotv/2));

botv:=(soj.dotv2-soj.dotv1)/2/botv;

Docu-

ment2D_ofset.ksLineSeg(dx42m[ii]+soj.lotv+pr.rc2*2,soj.dotv1/2,
dx42m[ii]+soj.lotv+botv+pr.rc2*2,soj.dotv1/2+(soj.dotv2-
soj.dotv1)/2,1);//угол

Docu-

ment2D_ofset.ksLineSeg(dx42m[ii]+soj.lotv+botv+pr.rc2*2,soj.dotv1/2+
(soj.dotv2-soj.dotv1)/2,m[i].d1_,soj.dotv1/2+(soj.dotv2-
soj.dotv1)/2,1);//серлениебольшое

Document2D_ofset.ksLineSeg(m[i].d1_,soj.dotv1/2+(soj.dotv2-
soj.dotv1)/2,m[i].d1_,0,1);

Document2D_ofset.ksLineSeg(dx42m[ii],0, m[i].d1_,0,1);

```

Document2D_ofset.koLineSeg(0,0,1,0,3);//ось
    SketchDefinition_ofset.EndEdit();

    EntityBossRotated:=ksEntity(Part.NewEntity(29));
    //Получаеминтерфейспараметровобъекта
    CutDefini-
tion:=ksCutRotatedDefinition(EntityBossRotated.GetDefinition());
    //Направлениевращения - прямое
    CutDefinition.directionType:=0;
    CutDefinition.cut:=TRUE;
    //Устанавливаемпараметрыоперации
    CutDefinition.SetSideParam(TRUE,360);
    //Устанавливаемэскизоперации
    CutDefinition.SetSketch(SketchDefinition_ofset);
    //Создаемоперацию
    EntityBossRotated.Create();
    //Операция копирования по концентрической сетке
    //////////////////////////////////////
    //Получаем интерфейс объекта операции
    EntityCircularCopy:=ksEntity(Part.NewEntity(o3d_circularCopy));
    //Получаеминтерфейспараметроваоперации
    CircularCopyDefini-
tion:=ksCircularCopyDefinition(EntityCircularCopy.GetDefinition());
    //Количествокопийв радиальном направлении
    CircularCopyDefinition.count1:=1;
    //Устанавливаемосьоперации

```

```

CircularCopyDefinition.SetAxis(EntityAxis);
//Устанавливаемпараметрыкопирования
CircularCopyDefinition.SetCopyParamAlongDir(4,90,FALSE,FALSE);
//Получаеммассивкопируемыхэлементов
EntityCollec-
tion:=ksEntityCollection(CircularCopyDefinition.GetOperationArray());
EntityCollection.Clear();
//Заполняеммассивкопируемыхэлементов
EntityCollection.Add(EntityBossRotated);
//Создаемоперацию
EntityCircularCopy.Create();
end;
end;//SOJ
Docu-
ment3D.SaveAs(extractfilepath(opendialog.FileName)+inttostr(i+1)+'
Нижняя.m3d');
sleep(1000);
end;
end;
end;

procedure tform1.changeloper(no:integer);
begin
loper.Caption:=inttostr(no);
lab_d_dulce.Caption:=floattostr(m[no].d_dulce);
lab_d_dulce2.Caption:=floattostr(m[no].d_dulce2);

```

```

lab_d_sk.Caption:=floattostr(m[no].d_sk);
lab_d_korp.Caption:=floattostr(m[no].d_korp);
lab_d_flan.Caption:=floattostr(m[no].d_flan);
edit_def_dulce.Visible:=false;
edit_def_dulce2.Visible:=false;
edit_def_sc.Visible:=false;
if no<k then
begin
    edit_def_dulce.Text:=floattostr(roundto(m[no].def_dulce,-5));
    edit_def_dulce2.Text:=floattostr(roundto(m[no].def_dulce2,-5));
    edit_def_sc.Text:=floattostr(roundto(m[no].def_sc,-5));
    edit_def_dulce.Visible:=true;
    edit_def_dulce2.Visible:=true;
    edit_def_sc.Visible:=true;
end;
end;

procedure TForm1.Edit_def_dulce2Change(Sender: TObject);
begin
m[strtoint(loper.Caption)].def_dulce2:=strtofloat(edit_def_dulce2.Text);
end;

procedure TForm1.Edit_def_dulceChange(Sender: TObject);
begin
m[strtoint(loper.Caption)].def_dulce:=strtofloat(edit_def_dulce.Text);
end;

```

```
procedure TForm1.Edit_def_scChange(Sender: TObject);
begin
m[strtoint(loper.Caption)].def_sc:=strtofloat(edit_def_sc.Text);
end;
```

```
procedure TForm1.Button5Click(Sender: TObject);
var numb:integer;
begin
numb:=strtoint(loper.Caption);
if numb>1 then changeloper(numb-1);
end;
```

```
procedure TForm1.Button6Click(Sender: TObject);
var numb:integer;
begin
numb:=strtoint(loper.Caption);
if numb<strtoint(label3.Caption) then changeloper(numb+1);
end;
```

```
procedure TForm1.Button9Click(Sender: TObject);
var h:string;
i:double;
begin
i:=0;
repeat
```

```
h:=inputbox('Задание высоты','Задайте высоту от торца (снизу)',");
trystrtofloat(h,i);
if {abs(i-(h1+lк_))<10} i>(h1+lк_-strtofloat(edit_13.Text)) then
begin
    i:=0;
    showmessage('Указанная высота выходит за пределы нижней мат-
рицы!');
end;
until i>0;
checkboxlistbox1.Items.Add(h);
end;
```