

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

(наименование кафедры)

15.04.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Системы автоматизированного проектирования в машиностроении

(направленность(профиль))

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

на тему Проект снижения износа инструмента для разделительных операций  
на основе численного моделирования в САЕ

Студент

С. А. Потеребух

(И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (подпись)

Научный

руководитель

А.В. Скрипачев

(И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (подпись)

Консультанты

П.Н. Шенбергер

(И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (подпись)

П.А. Путеев

(И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (подпись)

Руководитель программы

д. т. н., доцент

Почекуев Е.Н.

(ученая степень, звание И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (подпись)

«  » \_\_\_\_\_ 20   г.

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой

д.т.н., проф.

В.В. Ельцов

(ученая степень, звание И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (подпись)

«  » \_\_\_\_\_ 20   г.

Тольятти 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Анализ процедуры износа режущего инструмента в разделительных штампах.....	7
1.1 Особенности износа рабочего инструмента при вырубке-пробивке	7
1.2 Напряженно-деформированного состояния в зоне реза материала.....	11
1.3 Способы восстановления рабочих поверхностей пуансона и матрицы.....	12
1.4 Повышение стойкости штампов.....	13
1.5 Проблемы обеспечения стойкости рабочих инструментов штампа.....	18
1.6 Выбор материала для рабочих частей разделительных штампов....	24
1.7 Влияние технологического зазора и скорости деформирования на износ и стойкость рабочих частей штампа.....	30
1.8 Влияние смазочно-охлаждающих жидкостей на износ штампового инструмента и качество получаемых деталей при вырубке и пробивке.....	34
1.9 Цель и задачи исследования.....	39
Глава 2. Моделирование процесса износа рабочего инструмента при выполнении разделительной операции.....	40
2.1 Моделирование износа режущего инструмента в DEFORM 2D.....	42
2.2 Выбор материала для инструмента и заготовки.....	43
2.3 Модель износа инструмента.....	44
2.4 Разработка алгоритма расчета износа рабочих частей штампа из сталей У10А и Х12М.....	47
Глава 3. Оценка влияния параметров конструкции инструмента и технологического процесса на степень износа.....	60

3.1 Анализ влияния притупления режущей кромки инструмента на интенсивность роста заусенца.....	60
3.2 Анализ влияния притупления режущей кромки инструмента на степень износа инструмента.....	61
3.3 Анализ сравнительной оценки износостойкости рабочих частей штампа из сталей У10А и Х12М.....	68
Заключение.....	71
Список использованных источников.....	72

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Процент изготовления деталей при помощи разделительных операций в области современного машиностроения составляет от 70-90% и обеспечивает высокий показатель производительности при относительно низкой себестоимости изготовления изделия. Особое внимание в проектировании технологических процессов и штамповой оснастки уделяется стойкости рабочего инструмента, который подвергается ударным нагрузкам и действию высоких давлений в зоне контакта инструмента и заготовки. На снижение срока эксплуатации разделительных штампов влияют: адгезионное и абразивное изнашивание, выкрашивание рабочих поверхностей, а также отпуск поверхностного слоя инструмента и др.

К базовому условию рентабельности производства можно отнести требуемую износостойкость рабочего инструмента разделительных штампов. Стойкость рабочего инструмента оказывает влияние на точность и качество получаемых деталей.

Износ рабочих частей разделительного штампа способствует увеличению общей работы разделительной операции до 40%, а сопротивление разделению до 20% в отличие от инструмента с острозаточенными кромками, что подтверждается производственным опытом.

Рост производительности труда определяется увеличением износостойкости рабочих частей штампа.

Таким образом, разработка методики повышения стойкости разделительных штампов является актуальной задачей, направленной на увеличение срока службы рабочего инструмента и способствующей повышению качества получаемых деталей.

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является: разработка методики повышения износостойкости рабочих элементов разделительных штампов на основе результатов численного моделирования процесса разделительной операции и износа режущего инструмента.

Для решения обозначенных в работе проблем были сформулированы основные **задачи исследования:**

- 1 Выполнить анализ механизма износа рабочих частей штампа на основе существующих методов исследования стойкости.
- 2 Осуществить моделирование процесса разделительной операции и износа рабочего инструмента в программном продукте DEFORM 2D.
- 3 Провести оценку результатов исследования и дать рекомендации по снижению износа рабочего инструмента.

**Научная новизна работы.** Разработанная методика оценки степени износа рабочего инструмента позволяет установить на основе выявленных закономерностей и особенностей износа рабочих частей штампа степень влияния радиуса притупления режущей кромки на величину износа в среде численного моделирования.

**Методы исследования.** Для решения поставленных в работе задач были использованы:

- метод конечных элементов;
- научные основы технологии ОМД;
- основы теории исследования стойкости разделительных штампов.

**Предмет исследования:** способы повышения стойкости разделительных штампов.

**Объект исследования:** механизмы износа рабочего инструмента.

**Практическая ценность.** Использование разработанной расчетной конечно-элементной модели позволит осуществлять оценку степени износа инструмента в процессе осуществления разделительных операций, а также сформулировать рекомендации повышения стойкости рабочего инструмента.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано две печатные работы в сборнике тезисов студенческих работ «Студенческие дни науки ТГУ».

**Объем и содержание работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованных источников. Общий объем диссертации – 75 страниц. Список использованных источников состоит из 30 наименований. Диссертация содержит 53 рисунка и 1 таблицу.

# Глава 1 Анализ процедуры износа режущего инструмента в разделительных штампах

## 1.1 Особенности износа рабочего инструмента при вырубке-пробивке

В процессе использования штампа в большинстве случаев становятся неисправными пуансон и матрица. Поэтому при анализе вопроса о работоспособности разделительных частей штампа следует различать:

- стойкость штампа до переточки его рабочих частей штампа (матрицы и пуансона);
- стойкость штампа до замены его рабочих частей;
- стойкость штампа до полного износа.

Износостойкость разделительного штампа подразумевает способность инструмента выдержать определенное число штамповударов между перешлифовкой или сменой его рабочих частей, другими словами, пока штамповое оборудование обеспечивает получение деталей, которые соответствуют техническим требованиям по качеству.

Число переточек определяется по формуле

$$n = \frac{H}{h},$$

где  $H$  – толщина слоя металла, снимаемого с матрицы за все переточки;

$h$  – толщина слоя металла, снимаемого с матрицы за одну переточку.

Работоспособность штампа до полного износа измеряется числом деталей, которые снимают со штампа до такого состояния, что замена рабочих частей невозможна и восстановлению не подлежит.

Стойкость штампа до полного износа

$$T = nNn_1,$$

где  $n$  – число переточек;

$N$  – число штамповударов за период между двумя переточками;

$n_1$  – число рабочих мест в штампе.

Работоспособность штампов до переточки рабочих частей имеет значимую роль для обеспечения его непрерывной эксплуатации на производстве. Для более выгодной эксплуатации штампа в плане экономичности, следует использовать его до полного износа, так как изготовление рабочих частей штампа может составлять 65 – 80% от стоимости всего штампа. При массовом и крупносерийном производстве, чем выше срок службы штампа, тем меньше себестоимость штампованной детали.

Износостойкость штампов для вырубки-пробивки в большинстве случаев определяется технологичностью конструкции плоских деталей. Для массового и крупносерийного выпуска готовых деталей одним из ключевых условий является низкая трудоемкость и минимальный расход основного материала.

На стойкость разделительных штампов оказывают влияние различные конструктивно – технологические факторы. Это необходимо учитывать при проектировании, изготовлении и эксплуатации штампов.

Изнашивание режущих частей штампа при вырубки и пробивке происходит в результате:

- истирания контактных поверхностей инструмента с заготовкой;
- пластического деформирования и выкрашивания режущих кромок;
- протекания адгезионных процессов в зазоре между пуансоном и матрицей;
- и т.д.

Эти явления определены существенными по величине удельными нагрузками, наличием силы трения и теплотой, которые выделяются в очаге деформации в условиях циклической знакопеременности нагрузок.

В вырубных и дыропробивных штампах износ рабочих инструментов штампа происходит в следствие затупления их режущих кромок, это можно устранить с помощью переточки рабочей части. При нормальном износе переточкой снимается слой металла, равный 0,1 - 0,15 мм. По этой причине



штамп способен выдержать 15-25 переточек до полного износа матрицы или пуансона.

При разделении листа преобладают три основные формы изнашивания торцов инструмента:

- лункообразное,
- наклонное,
- комбинированное.

По мере увеличения числа резов глубина лунки увеличивается, и форма изнашивания меняется от лункообразной к наклонной или комбинированной. Поэтому износу подвергаются не только торцевые, но и боковые поверхности инструмента.

Под торцовым износом матрицы и пуансона (рисунок 1.1) следует понимать вызванное скользящим движением постоянное истирание и смятие инструмента по режущим кромкам под действием контактного трения, возникающего при многократном приложении сжимающих внешних сил, вызывающих относительное перемещение материала заготовки при вырубке. Обычно торцовый износ наблюдается при вырубке толстолистовой заготовки, когда происходит также подсаживание режущих кромок значительными сжимающими напряжениями, развиваемыми не только на режущих кромках, но и в теле вырубаемой детали.



Рисунок 1.1 - Абразивное изнашивание торцевой поверхности

На боковых поверхностях износ матрицы и пуансона происходит преимущественно по механизму когезионного отрыва карбидных частиц, при этом начальная фаза связана с адгезионными явлениями (рисунок 1.2), а завершающая обусловлена разрушением микрообъемов поверхности инструмента. Кроме того, боковые поверхности матрицы и пуансона в процессе эксплуатации могут подвергаться абразивному, окислительному и диффузионному износу.

Наряду с постепенным износом возможно выкрашивание кромок (рисунок 1.3), обусловленное, главным образом, снижением сопротивления разрушению материала инструмента в процессе наращивания малоциклового усталости. Этот вид износа соответствует в основном вырубке тонколистового материала.

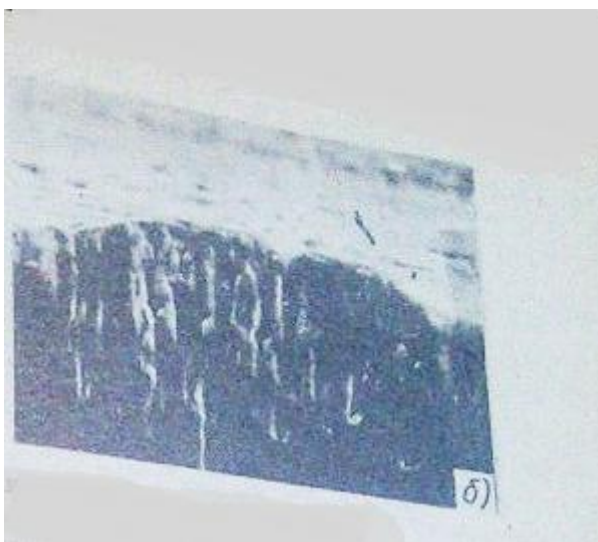


Рисунок 1.2 - Адгезивное изнашивание боковой поверхности

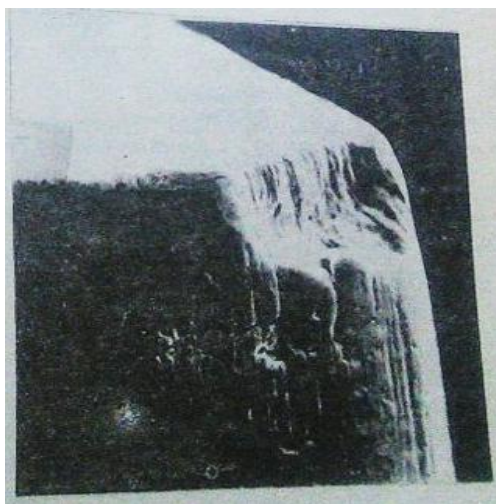


Рисунок 1.3 - Характер разрушения выкрашенной зоны

## 1.2 Напряженно-деформированного состояния в зоне реза материала

При рассмотрении эпюр нормальных и касательных напряжений на различных стадиях отделения одной части металла от другой (рисунок 1.4, а-б) видно, что на стадии проталкивания эпюра нормальных напряжений изменяется ввиду снятия изгибающего момента, а, следовательно, и упругой деформации.

При разделении металла изменяется и направление течения металла по контактному пояску матрицы и пуансона, что приводит к изменению направления касательных напряжений.

Нормальные напряжения оказывают действие на боковые поверхности пуансона и при обратном ходе инструмента (рисунок 1.4, в).

Таким образом, контактные поверхности пуансона и матрицы в процессе разделения работают в условиях знакопеременных нагрузок, что интенсифицирует их изнашивание в процессе эксплуатации

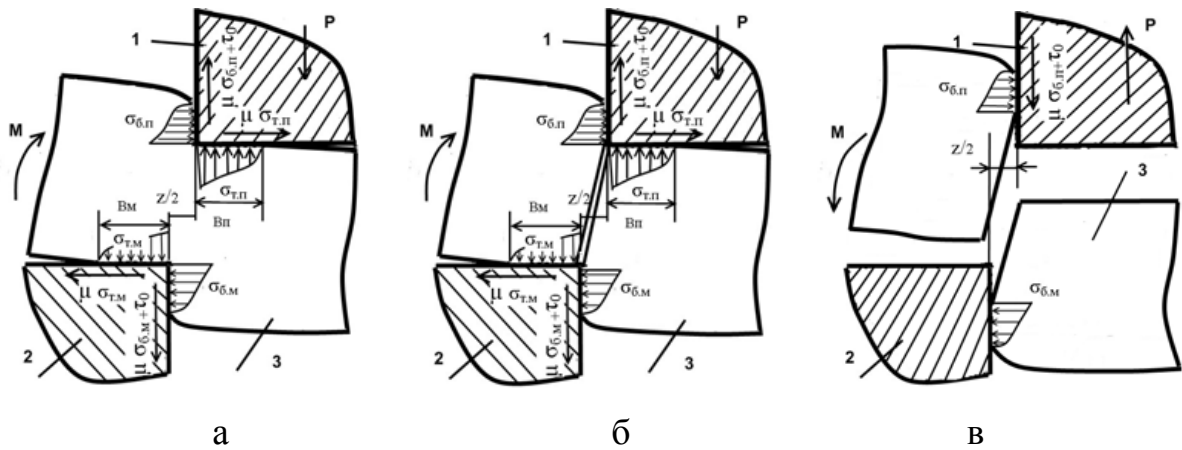


Рисунок 1.4 - Эпюры нормальных и касательных напряжений на стадии разделения металла: а – пластического среза; б – проталкивания отделяемой части заготовки; в – обратного хода пуансона

### 1.3 Способы восстановления рабочих поверхностей пуансона и матрицы

Особенности износа пуансона. После первого износа пуансон можно переделать с одного типа или размера на другой, в этом случае сократится расход металла на изготовление пуансонов. При изготовлении или ремонте штампов, которые предназначены для вырубки заготовок из мягких материалов, можно закаливать только матрицу, а пуансон оставлять незакаленным.

Если в процессе работы пуансон затупится, рекомендуется снять верхнюю часть штампа и легкими ударами молотка осадить всю рабочую кромку пуансона, при этом увеличить размеры его рабочей части. После этого верхнюю часть штампа ставят на место и под прессом вдавливают пуансон в матрицу, благодаря чему незакаленный пуансон получает контур и размер окна закаленной матрицы. Затем правят края пуансона для получения нужного зазора и затачивают его торец на плоскошлифовальном станке. Такие пуансоны состоят из двух частей: хвостовика и рабочей части, изготавливаемой из легированной инструментальной стали.

Бывшую в употреблении часть пуансона отжигают, высверливают и нарезают в ней отверстия для крепления рабочей части, которую подгоняют по матрице, закаляют и крепят к хвостовику. Хвостовую часть вновь не закаляют. При износе рабочей части ее заменяют снова, а хвостовик остается прежний.

Ножи для рубки металла, как и пуансоны, изготавливают с наставкой, прикрепляемой упорной планкой и винтом. Ножи восстанавливают сменой наставок.

Особенности износа матрицы. Вкладная матрица в результате многократной заточки может быть сошлифована настолько, что не будет выступать из нижней плиты. Срок ее службы можно продлить, если под матрицу положить стальную шлифованную прокладку и снова шлифовать рабочую поверхность. Матрицы с небольшими трещинами можно заключить в стальную обойму. Для этого изготавливают обойму, внутренние размеры которой уменьшены по сравнению с наружными размерами матрицы на величину натяга при горячей посадке. Обойму нагревают и напрессовывают на холодную матрицу. После остывания обойма она плотно сжимает матрицу, и трещина закрывается. Матрицы с выкрошившимися частями можно восстановить изготовлением точно подогнанной вставки.

#### 1.4 Повышение стойкости штампов

Важнейшим резервом повышения эффективности холодноштамповочного производства в отрасли машиностроения является повышение стойкости стальных штампов при одновременном снижении их стоимости за счет внедрения наиболее совершенной технологии изготовления.

Дальнейшее повышение стойкости вырубных штампов из легированных сталей X12M и X12Ф1, применяемых в отрасли

машиностроения, должно обеспечиваться получением оптимальной структуры металла, совершенствованием конструкций и технологии изготовления штампов, повышением качества заточки и соблюдением норм правильной эксплуатации.

Высокохромистые стали X12M и X12Ф1, применяемые для изготовления рабочих частей вырубных – пробивных штампов, обладают высокой прокаливаемостью, высокой износостойкостью и малыми объемными изменениями при закалке. Существенный недостаток этих сталей – карбидная неоднородность. Располагаясь по границам зерен, карбиды попадают в плоскости режущих кромок пуансона и матрицы и на определенном этапе эксплуатации штампа выкрашиваются, что приводит к существенному снижению стойкости штампа.

Для уменьшения карбидной неоднородности и улучшения свойств этих сталей необходимо применять всестороннюю проковку заготовок рабочих частей штампов. Она измельчает и более равномерно распределяет карбиды в металле, что значительно повышает стойкость штампа. Чтобы обеспечить в заготовках стали X12M структуру с баллом карбидной неоднородности не более трех, технологическая схемаковки должна предусматривать многократные осадки с вытяжками. Ковка с уковом  $10 - 12 \left(\frac{F_H}{F_K}\right)$  снижает карбидную неоднородность на четыре балла, и дальнейшая перековка на снижение карбидной неоднородности не влияет.

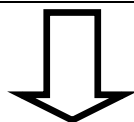
Определение стойкости штампа является количествоштампованных деталей до переточки рабочего инструмента или до полного износа штампа. Взаимосвязь между различными вариантами отказов разделительных штампов и показателями качества штампуемых деталей показана в таблице 1.1.

На стойкость штампов влияет множество факторов, основные из которых приведены на рисунке 1.5.

Повышение стойкости штампов является одной из важных задач, которая должна учитываться при их изготовлении, ремонте и эксплуатации. Учет стойкости рабочего инструмента позволяет значительно сократить потери рабочего времени на его ремонт и изготовление, снизить простои оборудования при смене инструмента, а также увеличить количество отштампованных деталей с одного штампа.

Таблица 1.1 - Взаимосвязь между различными вариантами отказов разделительных штампов и показателями качества штампуемых деталей

Варианты отказов рабочих элементов разделительных штампов				
1	2	3	4	5
Адгезионное изнашивание рабочих поверхностей в результате схватывания микровыступов инструмента и заготовки	Абразивное изнашивание рабочих поверхностей в результате царапин о твердые включения материала заготовки	Налипание (наrost) деформируемого материала заготовки на рабочие поверхности инструмента	Выкрашивание рабочих поверхностей в результате накопления и развития сетки усталостных трещин	Отпуск тонкого поверхностного слоя инструмента в результате превышения допустимого уровня термических напряжений



Показатели качества штампуемых деталей			
1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 3 4	1 3
Изменение размеров детали 	Изменение геометрии профиля разделения детали 	Образование наливов и кратеров на поверхности детали 	Образование заусенцов на детали 



Рисунок 1.5 – Факторы, влияющие на стойкость штампов

Стойкость рабочих частей пуансонов и матриц разделительных штампов может быть повышена за счет применения способов, показанных на рисунке 1.6.





Рисунок 1.6 – Способы повышения стойкости рабочих частей разделительных штампов

Для увеличения срока службы штампов для холодной штамповки и высадки, применяют рабочие вставки к штампам, изготовленные из металлокерамических твердых сплавов вольфрамо-кобальтовой группы.

Особенно широко применяются штампы, армированные твердосплавными вставками, в крупносерийном и массовом производстве, где стойкость обычных стальных матриц и пуансонов оказывается недостаточной и приводит к необходимости изготовления большого числа штампов-дублеров.

С применением твердых сплавов для вырубных штампов стойкость их увеличивается в 8 и более раз, а при штамповке высокопрочных листовых материалов типа нержавеющей, электротехнических и им подобных сталей, применение твердых сплавов для рабочих частей штампов позволяет повысить их стойкость до 50 раз.

При изготовлении деталей технологической оснастки металлокерамические твердые сплавы применяют в следующих случаях:

- ВК6 - для пуансонов и матриц штампов холодной штамповки, быстроизнашивающихся деталей приспособлений, работающих на трение (центры и т. п.);
- ВК8 - для холодновысадочных матриц; дыропробивного инструмента; волочильных и калибровочных вставок, работающих по стали, цветным металлам и сплавам; для быстроизнашивающихся деталей приспособлений, работающих на трение; для направляющих, работающих с сильным износом и т. п.;
- ВК10 - для деталей высадочных, дыропробивных и гибочных штампов, работающих в условиях умеренных нагрузок; для волочильных и калибровочных вставок, работающих по стали; для быстроизнашивающихся деталей приспособлений;
- ВК15 - для деталей штампов, работающих при средних ударных нагрузках; для высадочного и дыропробивного инструмента, работающего в условиях повышенных напряжений.

### 1.5 Проблемы обеспечения стойкости рабочих инструментов штампа

Обеспечение необходимой твердости рабочих инструментов штампа связано с рядом проблем. В частности, с тем что в настоящее время ведется поиск и исследования новых технологических решений, которые направлены на повышение работоспособности разделительных штампов при различных степенях их нагружения и улучшение качества штампуемых деталей.

Рабочей гранью матрицы и пуансона является их режущая кромка. Форма рабочих граней матрицы и пуансона оказывает значительное влияние на стойкость штампа, а, следовательно, и на качество деталей.

В практике изготовления и эксплуатации вырубных-пробивных штампов применяют несколько форм (профилей) рабочих частей матриц. К первому типу относятся: а) матрицы с обратным выталкиванием детали или отхода на зеркало матрицы; б) матрицы сложной конфигурации и составные для особо точных цилиндрических деталей.

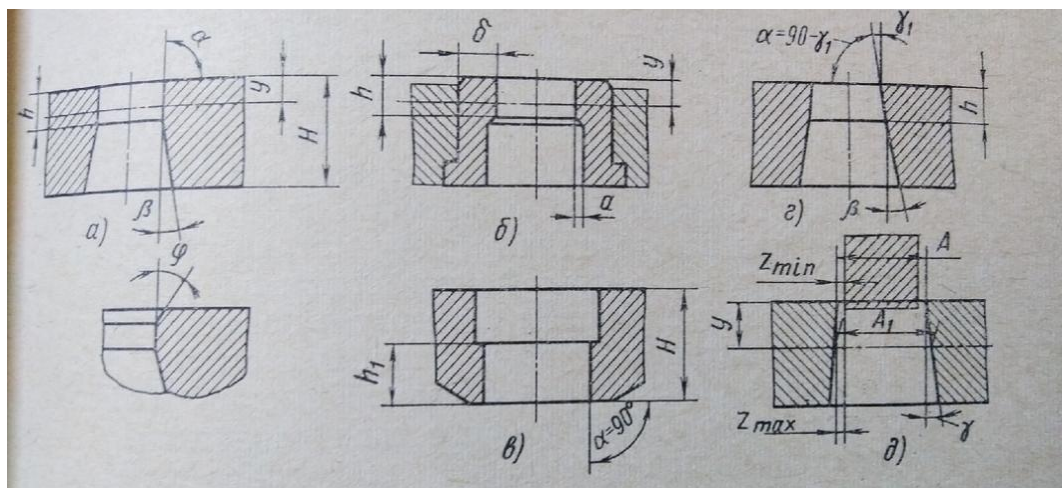


Рисунок 1.7 – Различные формы (профили) режущих частей матриц

Износ рабочей поверхности матрицы первого типа больше, чем матрицы второго типа из-за скопления отходов или деталей в нем, в результате чего происходит увеличение трения вырубленной детали о стенки рабочей поверхности матрицы и появления условий для образования обратного уклона под условным углом  $\varphi$  при их проталкивании, что приводит к довольно значительному дефекту вырубаемой детали.

Толщина поврежденного слоя металла, который должен быть удален при переточке штампа, у матриц второго типа гораздо меньше, чем у матриц первого типа. Преимуществом матриц второго типа является и то, что можно применять для штамповки всех видов материалов: мягких, твердых и высокотвердых. Матрицы второго типа (д) являются более экономичными, так как они допускают больше число переточек, при этом суммарная толщина сошлифовываемого слоя достигает в некоторых случаях 15-20 мм.

Допускаемую толщину слоя  $u$  определяют, исходя из сохранения максимально допускаемого зазора между матрицей и пуансоном.

Для упрощения изготовления матриц второго типа рабочее отверстие в них с точными размерами и углом  $\gamma_1 = \gamma$  выдерживают только на высоте шейки  $h$  (г). Матрицы с вертикальными стенками (в) применяют в штампах совмещенного действия.

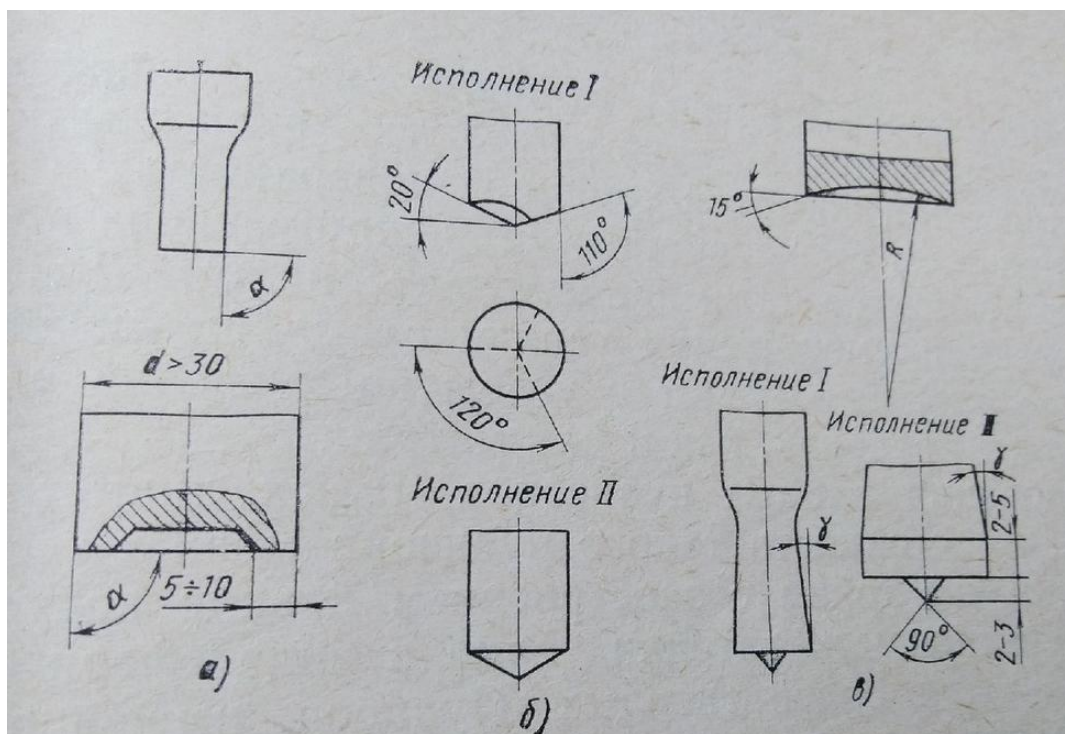


Рисунок 1.8 – Наиболее распространенные формы режущих частей пуансонов для резки металлов

Форма рабочих граней пуансона разделительных штампов так же весьма разнообразна. При разделительной операции резка металлов совершается с помощью пуансона, имеющим угол резания  $\alpha=90^\circ$ . Пуансоны малого диаметра изготавливают с плоским торцом, а пуансоны с большим диаметром – с выточкой для уменьшения площади шлифования (а). При пробивке отверстий относительно малого диаметра в металле толщиной более 4 мм пробивные пуансоны рекомендуется выполнять с углом  $\alpha=110^\circ$  (б), что значительно повышает их стойкость. Однако при этом заточка

режущей части существенно усложняется. Для пробивки отверстий относительно больших диаметров в толстых материалах рекомендуется использовать пуансоны с заостренным центром или вогнутой торцевой поверхностью (в), так как при этом предотвращается сдвиг пуансона в начальный момент контакта со штампуемым материалом.

В процессе разделительной операции поверхность рабочего инструмента меняется из-за наличия высокого удельного усилия по контактными парам. В результате чего изменяется и величина образующегося заусенца на штампуемой детали или пробиваемого отверстия.

В ходе процесса вырубки – пробивки напряжения в деформируемом материале распределяются неравномерно. Материал испытывает сложные деформации, особенно в зазоре между режущими кромками, где образуется упрочненная зона, сопротивляющаяся скалыванию. В результате трещины скалывания возникают в упрочненной зоне не у самих режущих кромок, а на некотором расстоянии от них по направлениям линий наибольшей твердости.

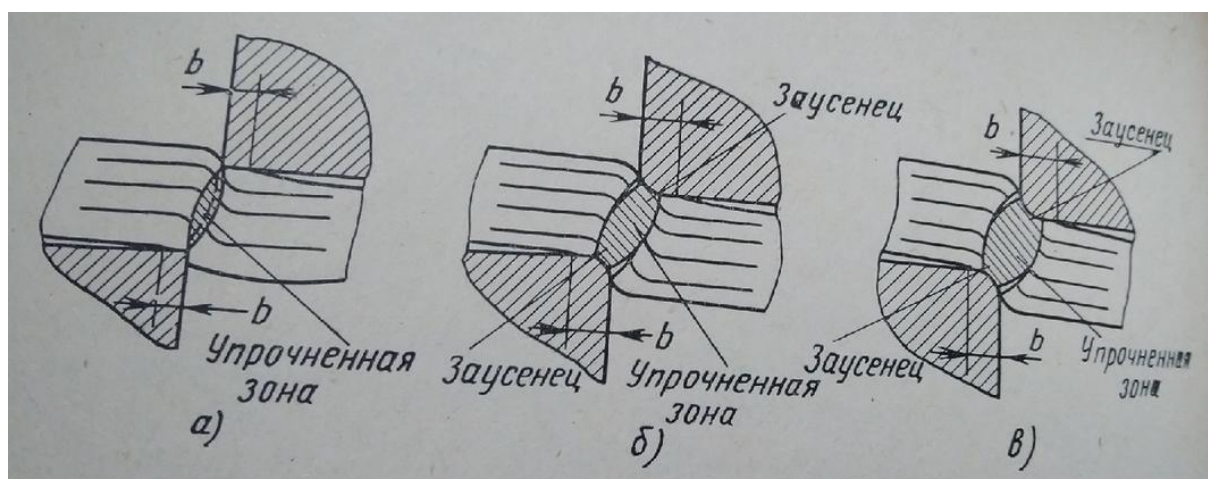


Рисунок 1.9 – Схема образования упрочненной зоны и заусенца при вырубке–пробивке инструментом с острыми режущими кромками (а) и притупленными (б, в) кромками

Для совершения операции по разделению деформируемого материала требуются острозаточенные режущие кромки (а) и оптимальный зазор. При вырубке и пробивке инструментом с притупленными режущими кромками (б) наблюдается более интенсивное скольжение материала по торцевым поверхностям матрицы и пуансона. В результате скалывающиеся трещины появляются при более глубоком внедрении инструмента в деформируемый материал, а зона пластического деформирования до момента скалывания увеличивается. Эта пластическая деформация сопровождается более интенсивным упрочнением материала в зоне разделения, что, в свою очередь, приводит к повышению сопротивления разделению  $\sigma_p$ .

Чем больше сопротивление разделению деформируемого материала, тем интенсивнее будет изнашиваться инструмент и тем меньше будет его стойкость. При этом величина образующего заусенца будет увеличиваться с нарастающей интенсивностью.

Образующийся при вырубке – пробивке заусенец является частью упрочненной зоны (б и в). Его величина растет с увеличением притупления режущих кромок инструмента в ходе эксплуатации штампа.

В работе Ф.П. Михаленко «Стойкость разделительных штампов» [14] для оценки влияния притупления режущих кромок на сопротивление разделению вводится критерий ( $K_{пр}$ ) равный отношению радиуса притупления ( $r_{притупления}$ ) к толщине штампуемого материала ( $S$ ):

$$K_{пр} = \frac{r_{притупления}}{S}.$$

Максимальное значение критерия  $K_{пр}$ , соответствующее увеличению сопротивления разделению, определяется по работам Михаленко Ф.П. [11] интервалом от 0,8 до 1,3 при условии - оптимальная величина зазора в сочетании притупленный пуансон – притупленная матрица:

$$\frac{r_{\text{притупления}}}{S} = 0,8 \div 1,3.$$

Данный интервал значений применим для материалов толщиной более 1 мм.

Чем больше отношение радиуса притупления ( $r_{\text{притупления}}$ ) к толщине штампуемого материала ( $S$ ), тем интенсивнее будет изнашиваться инструмент и тем меньше будет его стойкость. При этом величина образующего заусенца должна увеличиваться с нарастающей интенсивностью.

Таким образом, для оценки практической применимости и корректировки предлагаемого интервала, характеризующего предельные значения притупления кромок режущего инструмента, а также оценки роста величины заусенца на первом этапе работы необходимо выявить зависимости влияния величины притупления режущих кромок рабочего инструмента на интенсивность роста заусенца и степень износа инструмента.

Оценке степени износа инструмента посвящено множество работ. Так, например, в работе В.С. Попова, В.Н. Брыкова [18] показан метод повышения стойкости инструмента за счет разработки математической модели разделительных операций листовой штамповки, позволяющей на современном научно-техническом уровне оценить влияние формы инструмента на напряженное состояние контактирующих поверхностей и энергосиловые параметры процесса. Была применена разработка конечно-элементной математической модели, которая представляла собой двумерную осесимметричную задачу вырубki круглой заготовки толщиной 1 мм и радиусом 10 мм. Моделирование осуществляли с использованием программного комплекса Abaqus. Результаты показали, что форма матрицы существенно влияет на напряженное состояние металла в зоне контакта с пуансоном и на энергосиловые параметры процесса.

Работа Шеина А. А. посвящена разработке «технологического обеспечения качества деталей в процессах разделительной штамповки путем

нанесения на инструмент вакуумно-плазменных покрытий. Научная новизна его работы заключается в разработке систематизации причин отказа и путей повышения работоспособности рабочих элементов разделительных штампов и качества выпускаемой продукции за счет нанесения различных по конструкции и составу вакуумно-плазменных покрытий. Также он установил функциональную зависимость между условиями нанесения вакуумно-плазменных покрытий и интенсивностью изнашивания рабочих элементов разделительных штампов при обработке различных материалов.» [9].

Таким образом, проблемы обеспечения стойкости рабочих инструментов штампа решаются различными методами.

#### 1.6 Выбор материала для рабочих частей разделительных штампов

На стойкость разделительных штампов влияют следующие факторы: выбор материала для рабочих частей штампа и режим термообработки.

Отсутствие выкрашивания режущей кромки и смятия поверхности рабочих частей по контактным поясам обеспечит нормальное условие для совершения разделительной операции.

Смятие контактных поверхностей рабочих частей штампа происходит в том случае, если удельное усилие по периметру резки больше допустимого удельного усилия на рабочие части штампа:

$$\rho_{\text{рез}} > [\rho_{\text{шт}}],$$

где  $[\rho_{\text{шт}}]$  – допустимое условное удельное усилие на рабочую часть штампа, Н/мм;



$\rho_{\text{рез}}$  – условное удельное усилие резки, отнесенное к длине периметра режущего контура, Н/мм.

Допускаемое условное удельное усилие для незакаленной инструментальной стали в среднем равно 25 Н/мм.

Резка металла в штампах возможна при условии, если потребное условное удельное усилие по режущему контуру меньше допускаемого удельного усилия на рабочую часть штампа:

$$\rho_{\text{рез}} < [\rho_{\text{шт}}],$$

При этом условии можно резать тонколистовой металл в штампе с незакаленными рабочими частями. Однако для повышения стойкости штампа необходимо, чтобы они имели некоторый запас прочности. Опыт показал, что для нормальной резки металла достаточно четырех-, пятикратного запаса прочности.

Выбирать материал для рабочих частей штампа разделительных штампов рекомендуется с учетом масштабов производства, характера штамповочной операции, размеров и формы штампуемой детали, а также свойств штампуемого материала.

В условиях массового производства рабочие части разделительных штампов (пуансоны и матрицы) рекомендуется изготавливать из материалов, обеспечивающих максимальную производительность при высокой стойкости штампов.

Конфигурация пуансона или матрицы оказывает существенное влияние на выбор материала для изготовления. При вырубке-пробивке и обрезке деталей простой формы из материала толщиной до 3 – 4 мм для пуансонов и матриц следует применять инструментальные стали У8А и У10А. Если

рабочие детали имеют сложную форму и нетехнологичны для термообработки, то рекомендуется выбирать высоколегированные хромистые стали (X12Ф1, X12М, 9ХС, ХВГ и др.), которые в меньшей степени подвержены поводке и короблению, а также более износостойки.

Несомненный интерес для практики холодноштамповочного производства многих отраслей промышленности представляют производственные испытания разделительных штампов с рабочими частями из сталей различных марок.

Сохранение постоянства размеров матриц и пуансонов вырубных-пробивных штампов при термообработке оказывает существенное влияние на их стойкость. Если в процессе термообработки происходит изменение исполнительных размеров матриц и пуансонов, то нарушается заданная величина технологического зазора, а также равномерное распределение его по режущему контуру.

Для установления величины деформации в процессе термообработки опытных комплектов замеряли исполнительные размеры матриц и пуансонов на большом инструментальном микроскопе, как после механической обработки, так и после термообработки. Наличие такого рода данных позволяет судить о действительной величине технологического зазора между матрицей и пуансоном в момент начала эксплуатации штампа.

Результаты замеров показывают, что деформация опытных комплектов из легированных сталей значительно меньше, чем из стали У10А. При этом, с точки зрения устойчивости против деформации при термообработке, предпочтительной является сталь ХВГ.

Необходимо отметить, что деформация матрицы по отдельным элементам из стали У10А значительно превышает деформацию пуансона. После доводки термообработанных опытных комплектов из стали У10А

величина технологического зазора между матрицей и пуансоном осталась распределенной крайне неравномерно.

У всех опытных комплектов штампового инструмента, изготовленных из сталей ШХ15 (аналогом ее является инструментальная сталь X), ХВГ и Х12М, только после двукратной доводки их в термообработанном состоянии удалось более или менее выровнять исходную величину технологического зазора по отдельным элементам режущего контура, что положительно сказалось на их стойкости.

В процессе вырубки-пробивки происходит износ пуансона и матрицы, который выражается как в притуплении их режущих кромок, так и в изменении их исполнительных размеров, а также в ухудшении состояния их рабочих поверхностей. Изменение размеров штампового инструмента в процессе его эксплуатации, в свою очередь, приводит к изменению величины технологического зазора между матрицей и пуансоном, что оказывает влияние на ход процесса вырубки-пробивки.

Продолжительность стадии приработки инструмента из различных сталей неодинакова. Так, если для инструмента из стали У10А она заканчивается после штамповки примерно 24 тысячи деталей, то для инструмента из стали Х12М после 160 тысяч деталей. Наиболее стабильными после стадии приработки остаются размеры элементов режущего контура штампового инструмента из стали Х12М.

Размеры пуансонов и матриц, изготовленных из исследуемых сталей, особенно из У10А, в процессе эксплуатации штампа как увеличиваются, так и уменьшаются по сравнению с исполнительными размерами. Можно предположить, что незначительное увеличение размеров пуансона происходит из-за того, что площадь контактной поверхности, находящаяся в узкой зоне вдоль режущих кромок и подверженная действию высоких

удельных усилий, претерпевает при определенных условиях пластическую деформацию, которая превышает размерный износ режущих граней матрицы и пуансона. Такой износ можно отнести к сминающему, заключающемуся в основном в пластической деформации на глубине 1 – 2 мм, а иногда и более.

Размеры рабочих частей матрицы и пуансона изменяются также под влиянием термических напряжений, которые возникают при последовательном циклическом нагреве и охлаждении рабочих частей матрицы и пуансона в процессе эксплуатации штампа.

Рисунки 1.10 и 1.11 иллюстрируют изменение величины двустороннего зазора в зависимости от числа отштампованных деталей. Износ режущих граней матрицы и пуансона при наличии определенных условий перекрывается пластической деформацией смятия инструмента вдоль режущих кромок в зоне высоких удельных усилий. Поэтому происходит как бы периодическое самовосстановление зазора между матрицей и пуансоном.

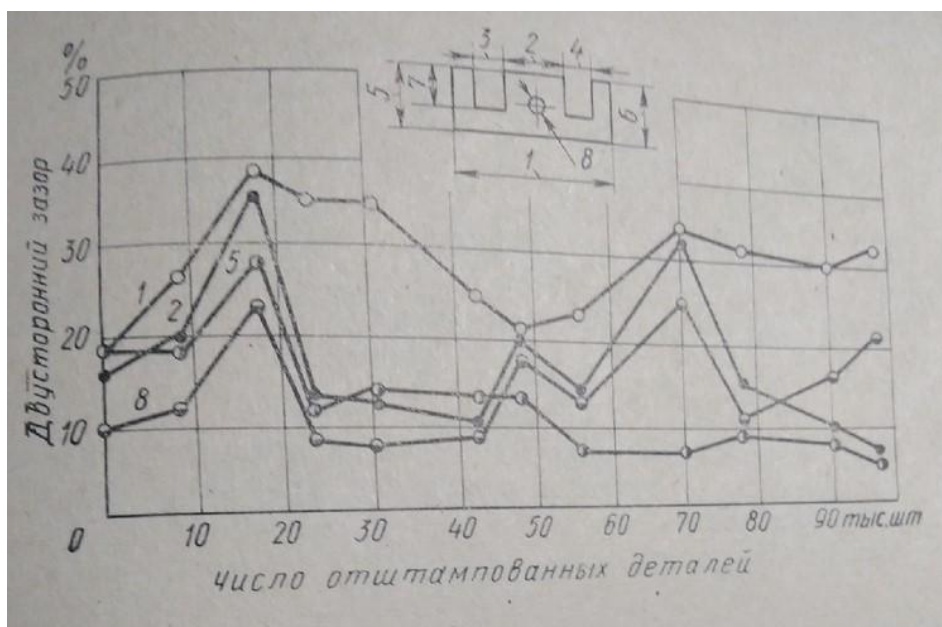


Рисунок 1.10 – Изменение двустороннего зазора в зависимости от числа отштампованных деталей из стали У10А

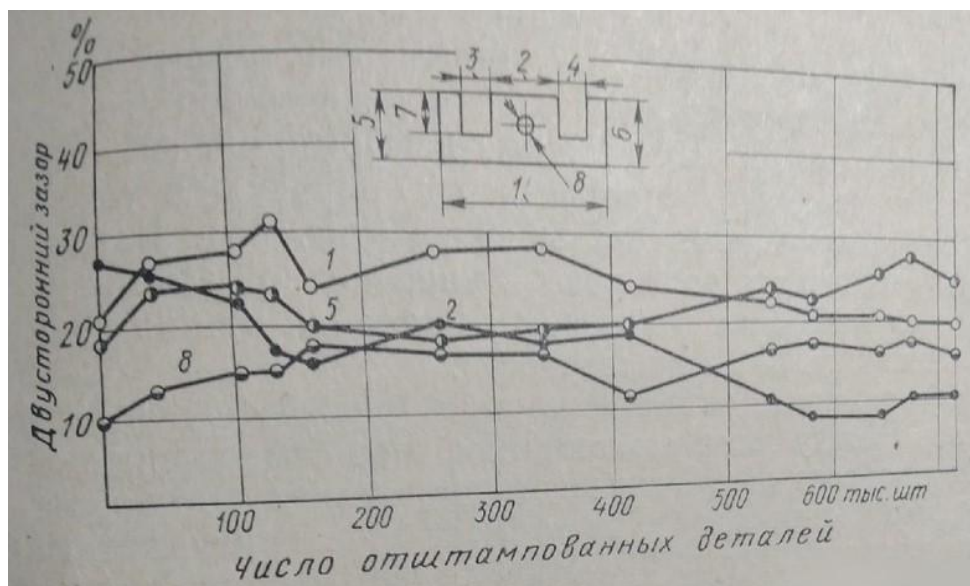


Рисунок 1.11 – Изменение двустороннего зазора в зависимости от числа отштампованных деталей из стали X12M

В стадии приработки по отдельным элементам режущего контура наиболее интенсивно изменяется величина технологического зазора у вырубного инструмента из стали У10А. В то же время для инструмента из стали X12M величина технологического зазора в стадии приработки изменяется меньше.

Из приведенных данных следует, что при вырубке-пробивке инструментом из стали X12M за весь длительный период эксплуатации штампа исходная величина технологического зазора изменяется незначительно, что свидетельствует о высокой износостойкости этой стали. Это позволяет штамповать большое число деталей между переточками и обеспечивает высокую стойкость штампа до окончательного износа.

Сталь X12M значительно отличается от стали У10А. Эта сталь карбидного класса, с большим количеством избыточных карбидов после закалки, которые при сравнительно низкой твердости матрицы обеспечивают достаточно высокую износостойкость. Сталь У10А после закалки содержит в

структуре значительно меньше избыточных карбидов и ее износостойкость определяется в большей мере твердостью матричной фазы.

### 1.7 Влияние технологического зазора и скорости деформирования на износ и стойкость рабочих частей штампа

В разделительных операциях листовой штамповки стойкость штампов между переточками обычно оценивается не по износу рабочих частей штампов (пуансонов и матриц), а косвенным путем – числом деталей, снимаемых со штампа, к моменту появления на них заусенца допускаемой высоты, которая зависит от толщины и рода штампуемого металла.

Такая оценка стойкости штампового инструмента является ориентировочной, так как хотя величина заусенца при штамповке того или иного материала и определяется износом режущих кромок штампа, но из-за отсутствия установленной функциональной зависимости между ними по величине заусенца нельзя найти величину износа матрицы и пуансона и установить его характер. Это необходимо знать при изыскании способов повышения стойкости разделительных штампов и изучении закономерностей их износа.

В работе по исследованию стойкости разделительных штампов в различных условиях деформирования [30], в производственных условиях стойкости рабочих частей штампа помимо величины заусенца оценивали износом их режущих кромок посредством записи с них профилограмм (площадью, заключенной между профилем режущей кромки до и после износа). По профилограммам можно так же определить параметры зоны износа, определяющие толщину слоя металла, снимаемого с пуансона и матрицы при переточке штампа.

Износ профиля режущих кромок пуансона и матрицы можно характеризовать боковым ( $F_{п.б}$ ,  $F_{м.б}$ ) и торцевым ( $F_{п.т}$ ,  $F_{м.т}$ ) износом, имеющим наклонную форму (рисунок 1.12).

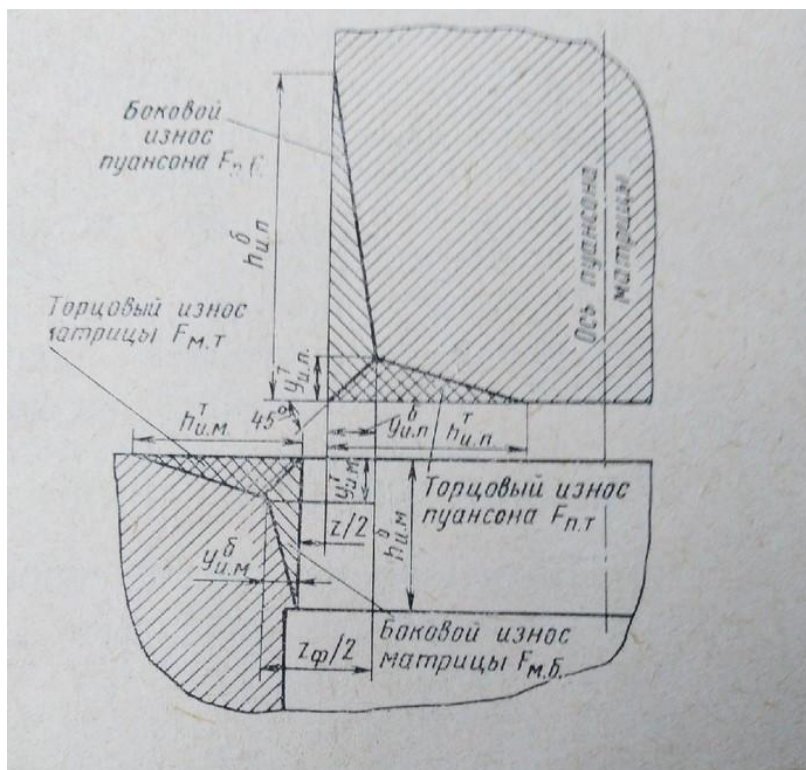


Рисунок 1.12 – Принципиальная схема классификации износа рабочих частей пуансона и матрицы вырубного-пробивного штампа и его основные параметры

Для оценки бокового и торцевого износа режущего контура пуансона и матрицы необходимо знать изношенный геометрический профиль режущих кромок штампового инструмента на той или иной стадии его эксплуатации. Зная величину и характер того или иного вида износа рабочих частей штампа в разделительных операциях листовой штамповки различных материалов, представляется возможным воздействовать тем или иным способом (посредством прижима и смазки, противодавления и т.д.) на величину бокового и торцевого износа и его параметры, а тем самым и на высоту образующегося заусенца.

Исследование износа геометрического профиля режущих кромок штампа в процессе его эксплуатации является особенно важным для установления закономерностей износа штампового инструмента, для определения износостойкости инструментальных сталей, а также для оценки обрабатываемости различных материалов резкой в штампах.

Экспериментальное исследование влияния технологического зазора и скорости деформирования на износ рабочих частей штампа проводили при вырубке дисков диаметром 6 мм из различного рода металлов на быстроходном прессе-автомате с нижним приводом мод. А840, усилием 16 тс.

Пуансоны и матрицы опытного штампа (рисунок 1.13) были изготовлены из стали У10А и термообработаны на твердость HRC 56 – 58 и 58 – 60 соответственно. При этом были заданы такие же величины зазоров, как и при исследовании влияния технологического зазора на сопротивление разделению и работу резки.

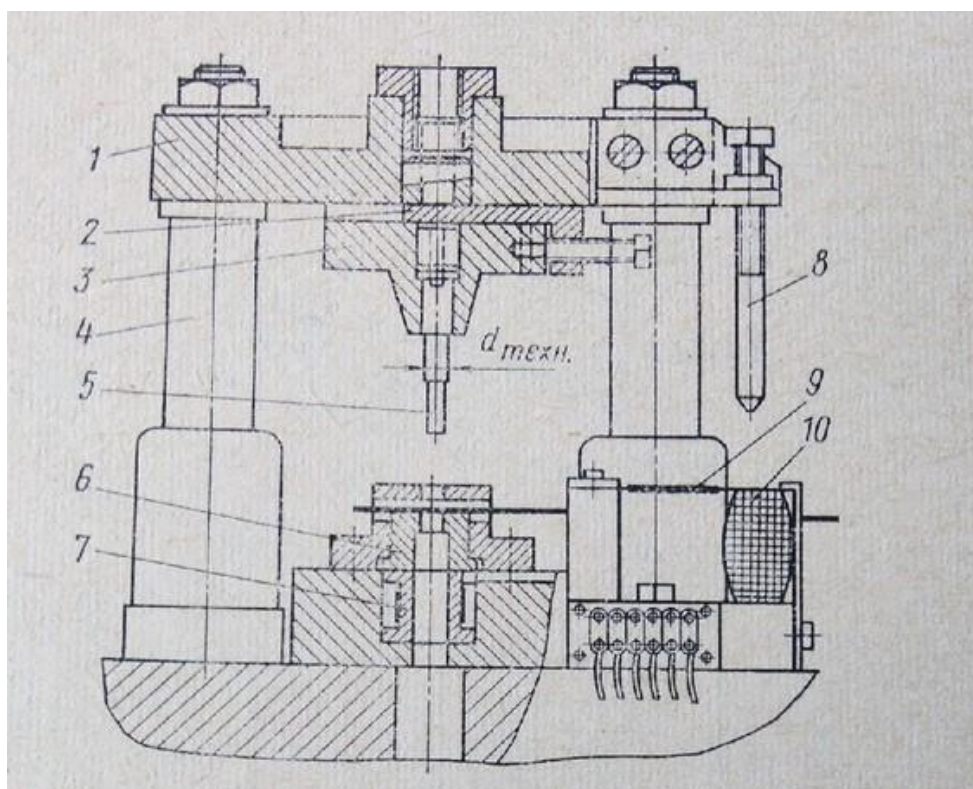




Рисунок 1.13 – Экспериментальный штамп для вырубki-пробивки на прессе-автомате с нижним приводом

Для сохранения постоянной жесткости штампуемой ленты при эксплуатации штампа с различными зазорами раскрой ее выдерживали с одинаковыми перемычками.

Износ матрицы во всех экспериментах характеризовался удельным торцевым износом  $f_{м.ср}$ , т.е. площадью износа, приходящейся на 1000 вырубленных деталей, а износ пуансона – удельным торцевым износом  $f_{п.т.ср}$  и удельным боковым износом  $f_{п.б.ср}$ .

На рисунке 1.14 приведены профилограммы, записанные с рабочих торцевых поверхностей матрицы (а) и пуансона (б) в месте 2 режущего контура со стороны перемычки между отверстиями после штамповки 23 тысяч деталей с различными зазорами из стали 08-ОМ,  $\delta=2$  мм.

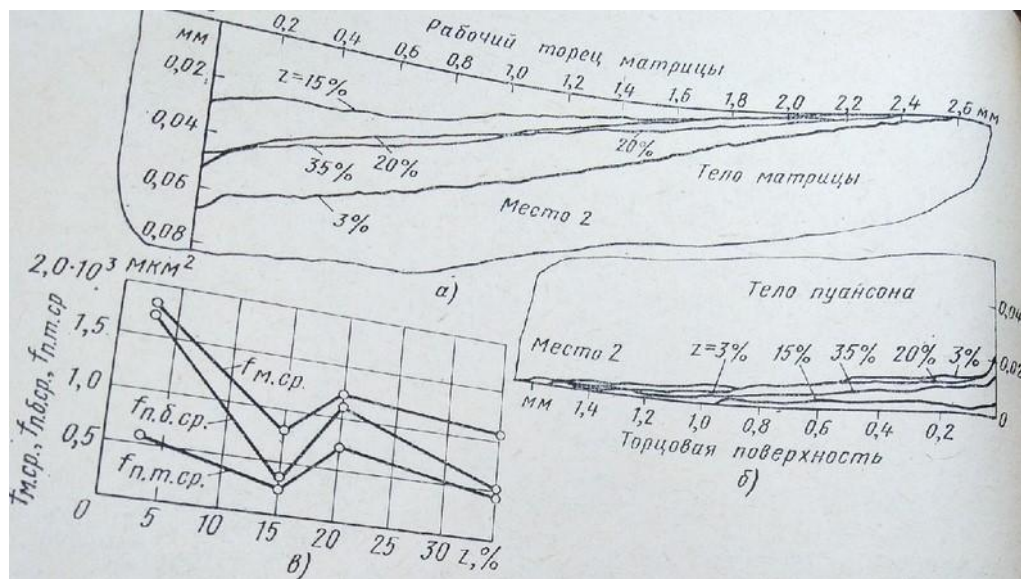


Рисунок 1.14 – Типовые профилограммы, снятые с рабочей торцевой поверхности матрицы (а) и пуансона (б) и зависимость среднего удельного износа матрицы и пуансона по режущему контуру в целом от технологического зазора (в)

Из сравнения профилограмм видно, что минимальный износ матрицы и пуансона происходит при  $z=15\%$ . Ширина контактного пояса матрицы и пуансона зависит от зазора, но у матрицы он больше толщины металла и значительно больше, чем у пуансона.

Результаты обработки профилограмм (рисунок 1.14, а) посредством планиметрирования представлены в виде кривых (рисунок 1.14, б). Износ пуансона ( $f_{п.б.ср}$ ,  $f_{п.т.ср}$ ) и матрицы ( $f_{м.ср}$ ) интенсивно замедляется с ростом зазора от 3 до 15%. При этом  $f_{п.б.ср}$  уменьшается на 80%,  $f_{п.т.ср}$  на 62% и  $f_{м.ср}$  на 55%, а высота заусенца на 240%. Такое существенное замедление износа пуансона и матрицы при  $z=15\%$  обусловлено наличием благоприятных условий для разделения металла в очаге деформации, так как при этой величине зазора общая работа разделения на 51% меньше, чем при  $z=3\%$ .

При  $z=35\%$  удельный износ торцовых поверхностей матрицы и пуансона на 42% больше, чем при  $z=15\%$ , а боковой поверхности пуансона на 51%.

В целом характер изменения удельного износа как матрицы, так и пуансона находится в полном соответствии с характером изменения силовых и энергетических затрат на деформацию при вырубке-пробивке с рассматриваемыми величинами зазоров.

## 1.8 Влияние смазочно-охлаждающих жидкостей на износ штампового инструмента и качество получаемых деталей при вырубке и пробивке

При выборе смазочно-охлаждающих жидкостей для пробивки отверстий в листовой стали следует отдавать предпочтение маслам для резания с активированными эмульсиями. Добавки высокого давления (хлор, сера, фосфор и т. п.) в результате химических реакций с материалом

образуют своего рода твердую смазочную пленку, обладающую меньшим сопротивлением сдвигу по сравнению с самим металлом. Она препятствует образованию наростов на рабочих частях штампа.

В случае применения эмульсии масла в воде, проявляющей высокое охлаждающее действие, граничный слой смазки, наряду с высокой полярностью (адгезией), проявляет боковое сцепление своих углеводородных цепей, предотвращая образование мостиков холодной сварки.

Рекомендуется так же вводить в активированное расточное масло для резания керосин, который способствует повышению капиллярного и адгезионного действия.

Эффективность применения смазки возрастает при использовании дисульфида молибдена ( $\text{MoS}_2$ ), который прочно прилипает к чистым обезжиренным поверхностям инструмента. Он обладает исключительной химической стабильностью и инертностью, хорошо смешивается со всеми минеральными, синтетическими, растительными и животными маслами и жирами, имеет низкий коэффициент трения (0.03 - 0.09). Дисульфид молибдена повышает стойкость вырубных штампов примерно в 2 раза.

При выборе смазок для разделительных операций листовой штамповки особого внимания заслуживает поверхностно – активные смазки в связи с эффектом А. П. Ребиндера, который установил снижение предела прочности и текучести твердых тел в результате адсорбции поверхностно – активных веществ. Механизм воздействия этих веществ объясняется тем, что поверхностно – активные вещества как бы размягчают поверхность металла, облегчая его скольжение при деформации. Глубина адсорбции поверхностно – активных веществ составляет  $10^{-7} - 10^{-6}$  мм. Предполагается, что эти вещества существенно снижают коэффициент внешнего трения, что является важнейшим преимуществом смазок с такими присадками.

При разделительных операциях листовой штамповки площадь поверхности разделения заготовки вследствие контакта с инструментом

увеличивается в 100%. Для предотвращения адгезии обнаженные поверхности разделения должны быть защищены.

При шамповке полос, покрытых клеем БФ-4, в результате защитного действия пленки клея режущая кромка пуансона изнашивается весьма медленно; при этом сохраняется заданная величина зазора и износостойкость штампа.

Полосы, предназначенные для покрытия машинным маслом, смазывали с двух сторон кистью посредственно перед шамповкой. Покрытия из клея БФ-4 и нитролака АВ-4 д/в наносили пульверизатором и после сушки их при комнатной температуре подвергали шамповке в течение 2-3 часов. На Чебоксарском электроаппаратном заводе при вырубке – пробивке коррозионно – стойкой (нержавеющей) и электротехнической стали применяли смазку следующего состава: 45-47% олеиновой кислоты; 45-47% касторового масла; 3-5% медного купороса; 3-5% осветительного керосина.

Сравнительные стойкостные испытания вырубных штампов при вырубке пластин из стали 12Х18Н9Т толщиной 3 мм показывали, что стойкость штампа до переточки с применением указанной смазки составляла 20-21.6 тысяч деталей. В том и другом случаях полосы смазывали перед вырубкой ветошью с двух сторон. Следовательно, стойкость вырубных штампов с применением смазки повышается в 11-13 раз.

Большое значение имеет и способ подачи смазочно-охлаждающих средств на штампуемый материал или на рабочие части штампа.

Для нанесения равномерной смазки на штампуемый материал главным является взаимозависимость между правильной пропорцией смеси масла с воздухом, давлением воздуха, поперечным сечением и формой распылителя, его направлением и расстоянием от обрызгиваемого ленточного материала.

Для уменьшения распространения тумана около прессы и улучшения условий работы производственного персонала распыление масла происходит только во время рабочего хода прессы.

По сравнению с ранее применявшимся пропитыванием рулона маслом с боков описанный способ дает более равномерное и постоянное смазывание ленты. Благодаря осаждению тонкого слоя масла достигается повышение стойкости штампов примерно на 50%. Ранее расход масла за смену составлял 2 литра. При использовании обрызгивающей установки он сократился до 0.35 литра.

В качестве примера, иллюстрирующего использование СОЖ с подачей ее по второму способу, следящего за состоянием пуансона. На боковой поверхности колпачка из листовой стали или латуни толщиной 0.7 мм пробивается 256 отверстий диаметром 1.2 мм. Штамп имеет восемь пробивных пуансонов, по четыре в ряду. При вращении колпачка в такт прессу все отверстия пробиваются за 32 хода.

Для достижения экономической стойкости штампа, минимум 150 тысяч отверстий на пуансон, пуансоны внутри направляющих смазывают и охлаждают масляным туманом. В зарубежной практике находят применение разбрызгивающие тьюбики, при помощи которых на пуансон или деталь наносят суспензию твердой смазки в легко испаряющейся несущей жидкости, превращающейся в сухую скользкую пленку.

Повышение стойкости штампов при вырубке-пробивке низкоуглеродистой стали. Экспериментальное исследование по установлению влияния различных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) и величины их расхода на износ режущих кромок пуансона и матрицы при вырубке-пробивке 08-ОМ толщиной 2 мм проводили на быстроходном прессе-автомате модели А840 усилием тс при 275 ход/мин.

Пуансоны и матрицы с рабочим отверстием диаметром 6 мм опытного штампа, обеспечивающего равномерное распределение зазора между ними, были изготовлены из стали У10А и термообработаны соответственно до твердости HRC 56-58 и 58-60. Исходная величина двустороннего зазора между режущими элементами штампа составляла 15% от толщины штампуемого металла.

Для получения сравнительных данных по износостойкости рабочих частей штампа было проведено три серии экспериментов при штамповке ленты: 1) в состоянии поставки (без смазки); 2) с 1.5%-ной эмульсией (расход 250 г/ч) при давлении воздуха 1.5 Н/см<sup>2</sup>); 3) с распыленным маслом индустриальное 20 (расход 4 г/ч при давлении 1.5 Н/см<sup>2</sup>).

В двух других сериях экспериментов была соблюдена такая же рядность раскроя ленты при штамповке каждых 100 тысяч деталей, как и в первой серии – при штамповке ленты в состоянии поставки, т.е. условия проведения экспериментов во всех трех сериях были идентичными. Учитывая неравномерность износа режущих кромок штампа, в качестве сравнительной характеристики их износа во всех трех сериях экспериментов был принят усредненный суммарный износ по режущему контуру пуансона и матрицы в целом.

В ходе эксплуатации штампа как с применением 1.5%-ной распыленной эмульсии, так и распыленного масла боковой износ пуансона существенно замедляется. Так, например, после штамповки 100 тысяч деталей с распыленной эмульсией боковой износ пуансона по режущему контуру в целом уменьшается на 39%, а с распыленным маслом на 33%. Другими словами, при вырубке-пробивке низкоуглеродистой стали с применением СОЖ можно отштамповать до переточки примерно 100 тысяч деталей, а при штамповке ленты в состоянии поставки только 70 тысяч деталей. При этом величина бокового износа пуансона будет примерно одинаковой.

Состояние рабочих поверхностей штампового инструмента при вырубке-пробивке низкоуглеродистой стали с применением распыленных СОЖ значительно улучшается, так как наличие на рабочей поверхности пуансона устойчивых физических или химических адсорбционных пленок исключает адгезионное схватывание в местах фактического контакта инструмента с обрабатываемым материалом, которое является по сути дела

одной из основных причин интенсивного износа боковых поверхностей рабочих частей штампа при штамповке пластичных металлов.

Экспериментальные данные по износу штампов без применения СОЖ и с обдувом пуансона сжатым воздухом показывают, что обдув не оказывает существенного влияния на износостойкость штампового инструмента

### 1.9 Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является: разработка методики повышения износостойкости рабочих элементов разделительных штампов на основе результатов численного моделирования процесса разделительной операции и износа режущего инструмента.

Для решения обозначенных в работе проблем были сформулированы основные задачи исследования:

- 1 Выполнить анализ механизма износа рабочих частей штампа, существующих методов исследования стойкости, а также показателей качества штампуемых деталей.
- 2 Осуществить моделирование процесса резки и износа рабочего инструмента в программном продукте DEFORM 2D.
- 3 Провести оценку результатов исследования и дать рекомендации по снижению износа рабочего инструмента.

## Глава 2 Моделирование процесса износа рабочего инструмента при выполнении разделительной операции

Во второй главе магистерской диссертации будет рассмотрен анализ рабочих частей штампа, применяемых в процессе холодной листовой штамповки с использованием инструментов программного продукта «DEFORM-2D».

Для улучшения качества штампуемых деталей за счет установления подходящих условий для разделительных операций используется САЕ – система «DEFORM-2D», так как эта система имеет несколько преимуществ:

- Многофункциональность – «DEFORM» может рассчитывать разнообразные технологические процессы, которые применяются на производстве;
- встроенный генератор конечно-элементной сетки;
- значительная база данных, которая содержит характеристики материалов, а также возможность редактирования и приобщения новой базы данных;
- возможность моделирования различных условий взаимодействия между инструментом и заготовкой;
- широкие возможности моделирования различных типов перемещения инструмента;
- практичный в использовании интерфейс.

DEFORM - это система моделирования, в ее основы входит метод конечных элементов (МКЭ), который предназначен для рассмотрения всевозможных процессов формовки и термообработки, применяемых для изготовления металлов и близких отраслей. При моделировании производственных процессов инженерами и дизайнерами, этот усовершенствованный инструмент позволяет:



- снижать необходимость испытаний в цехах и переделке рабочих инструментов и операций;
- совершенствовать рабочий инструмент для того, чтобы снизить производственные и материальные затраты;
- уменьшать количество времени на выполнение заказов.

При помощи удобного графического интерфейса программного продукта DEFORM, можно обеспечить нетрудную подготовку и проанализировать данные. Поэтому у инженеров появляется больше времени для того чтобы сосредоточиться на моделировании и формировании процессов. Ключевой составляющей этого является полностью автоматизированная система построения сетки МКЭ, которая адаптирована для процессов, связанных с большими деформациями.

Модели износа могут определяться в DEFORM для каждой пары объектов, соприкасающихся во время процесса. Норма износа вычисляется для ведущего объекта, у ведущего объекта должна быть сетка конечных элементов.

После получения результатов пользователь может оценить глубину износа, как для последнего шага, так и для определенного шага моделируемого процесса. Кроме вышперечисленного, можно вывести скорость скольжения, давление между контактами и температуру раздела на поверхности контакта. Это означает, что для данной модели были вычислены все возможные данные деформации. Исходя из этого пользователь может проанализировать модель износа без повторного запуска моделирования.

## 2.1 Моделирование износа режущего инструмента в DEFORM 2D

На рисунке 2.1 приведена схема моделируемого процесса. При расчете были задействованы следующие элементы конструкции штампа: матрица, пуансон и прижим. Толщина заготовки назначена равной 1,2 мм. Подготовка 2D моделей заготовки и деталей штампа осуществлялась инструментами DEFORM-2D.

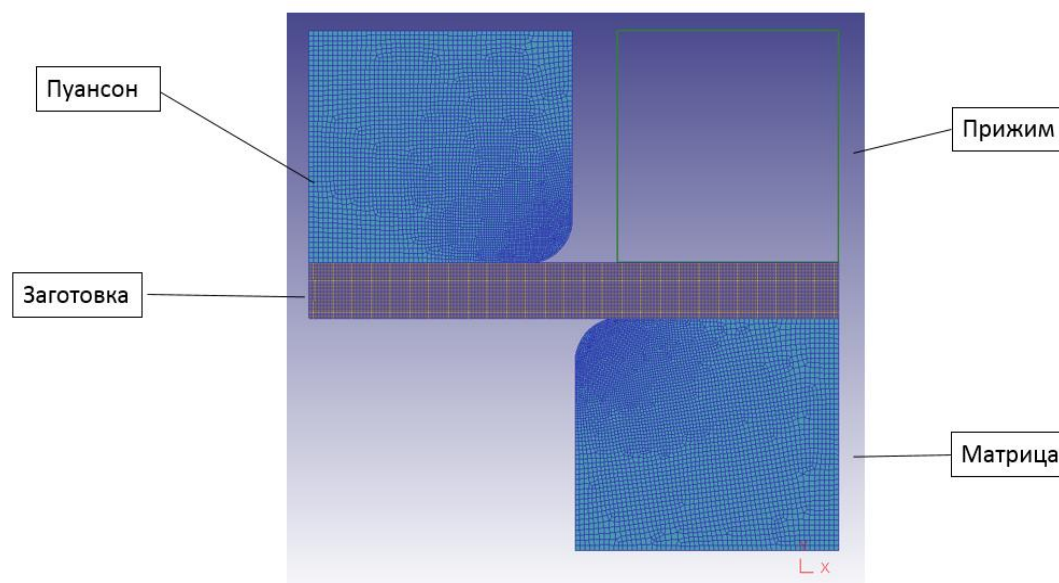


Рисунок 2.1 – Схема расположения частей штампа

В таблице 2.1 приведены основные исходные данные, которые были использованы в расчете.

Таблица 2.1 – Исходные данные для моделирования разделительной операции

Параметр расчета	Значение
Количество шагов расчета	70
Перемещение инструмента, мм/шаг	0,05
Количество конечных элементов:	
- для каждой из рабочих частей штампа	5000
- для заготовки	5000

Продолжение таблицы 2.1	
Материал: -для частей штампа -для заготовки	У10А/Х12М 08пс
Температура, °С	20
Твёрдость: - для частей штампа, HRC - для заготовки, HRC	55/65 25
Скорость перемещения пуансона, мм/сек	10
Коэффициент трения	0,08
Зазор между пуансоном и матрицей, мм	0,06

Исходя из рекомендаций Михаленко Ф.П., критический интервал притупления режущих кромок рабочего инструмента соответствует:

$$\frac{r_{\text{притупления}}}{S} = 0,8 \div 1,3,$$

следовательно, для материала толщиной 1,2 мм радиус скругления режущей кромки составит:

$$r_{\text{притупления}} = S * 0,8 \div 1,3 = 1,2 * 0,8 \div 1,3 = 0,96 \div 1,56 \text{ (мм)}.$$

Проводятся шесть расчетных случаев, отличающихся между собой радиусом скругления режущей кромки на рабочих инструментах штампа. Использовались следующие величины скругления режущей кромки на матрице и пуансоне: 0.96 мм, 1.06 мм, 1.26 мм, 1.36 мм, 1.46 мм и 1.56 мм.

## 2.2 Выбор материала для инструмента и заготовки

На первом этапе работы в роли материала инструмента выбрана инструментальная углеродистая высококачественная сталь У10А. Данную

сталь применяют для производства инструментов небольших размеров, которые работают без разогрева режущей кромки.

Марка стали У10А. Буква У говорит о том, что это инструментальная нелегированная сталь, в которой содержится 1% углерода, буква А на конце марки стали показывает на то, что это высококачественная сталь с малым количеством вредных примесей.

На втором этапе работы в качестве материала инструмента выбирается сталь Х12М. буква Х говорит о том, что это инструментальная легированная сталь с содержанием хрома около 12%, и небольшим содержанием марганца. Эта сталь карбидного класса, с большим количеством избыточных карбидов после закалки, которые при сравнительно низкой твердости матрицы обеспечивают достаточно высокую износостойкость. Высокохромистые стали, такие как Х12М применяется для изготовления рабочих частей вырубных-пробивных штампов, обладают высокой прокаливаемостью, высокой износостойкостью и малыми объемными изменениями при закалке.

В качестве материала заготовки была выбрана сталь 08пс, так как эта сталь зачастую применяется для изготовления различных элементов в автомобилестроении и машиностроении методами холодной листовой штамповки. Сталь 08пс - это конструкционная углеродистая качественная сталь, которая содержит 0,8% углерода.

### 2.3 Модель износа инструмента

При моделировании процесса резки в программном продукте «DEFORM-2D», применяются две модели износа рабочего инструмента:

#### а) Модель «Archard».

В пятидесятых годах двадцатого века британский инженер Джон Ф. Арчард разработал эмпирическую модель расчета скорости абразивного

износа. Данная модель позволяет оценить степень изнашивания твердых поверхностей оборудования за счет ударного воздействия частиц. Этот закон связывает потерю объема материала твердой поверхности с работой сил трения, возникающих между частицами и поверхностью.

Основное предназначение модели Archard состоит в том, чтобы проводить исследование темпа износа инструмента на различных временных отрезках. При помощи этой модели можно учитывать общее влияние факторов таких как: стойкость поверхности режущих инструментов, коэффициент износа, скорость, с которой взаимодействуют рабочие поверхности инструмента, свойства материала инструмента и механические нагрузки.

Стоит учитывать, то, что модель Archard не предназначена для моделирования процессов с высокой скоростью, характерными, для обработки металла резанием. Данная модель не учитывает влияние температуры, так как коэффициент износа и прочность поверхности изменяются при воздействует на поверхность инструмента температура равная примерно 900°C, которая возникает при выполнении операции резки. Из вышесказанного следует то, что модель Archard не предназначена для получения результата по износу рабочего инструмента, который применяется при обработке резанием.

Данная модель износа в большей степени подходит для процессов холодной или горячей штамповки.

В программе «DEFORM» модель Archard имеет следующий вид:

$$W = K \frac{p^a v^b}{H^c} dt, \quad (2.1)$$

где  $W$  – износ инструмента;

$p$  – давление между двумя поверхностями (контактное давление), МПа;

$v$  – скорость скольжения, мм/сек;

$H$  – твердость материала инструмента, HRC (при  $K = 50$ );

$dt$  – приращение времени;

$K$  – коэффициент масштабирования (при  $K$  равном 50 твердость вводится в HRC);

$a, b, c$  – поправочные коэффициенты (для стального инструмента «а» и «b» равно 1, а «с» равно 2).

Значения коэффициентов  $K, a, b, c$  рекомендованы разработчиками программы «DEFORM».

#### б) Модель «Usui».

Модель износа Usui рекомендуется разработчиками «DEFORM» для расчета непрерывных процессов, таких как обработка металла резанием.

В программе «DEFORM» модель Usui имеет следующий вид:

$$W = apVe^{-b/T} dt, \quad (2.2)$$

где  $p$  – давление между двумя поверхностями (контактное давление), МПа;

$v$  – скорость скольжения, мм/сек;

$T$  – температура поверхности;

$dt$  – приращение времени;

$a$  – межфазное давление на границе поверхности ( $a = 1 \times 10^{-5}$ ).

$a$ ,  $b$ , – экспериментально определяемые поправочные коэффициенты ( $a$  – межфазное давление на границе поверхности равное  $1 \times 10^{-5}$ ,  $b$  – порядок абсолютной температуры поверхности равный 1000).

Как правило коэффициенты, которые используются для данных моделей, должны исходить из экспериментов по калибровке. На смену данных, которые были откалиброваны допустимо использование стандартных значений для получения относительной скорости износа для похожих процессов. Верные методы создания модели покрытий и обработки поверхности до сих пор остаются предметом для активного исследования. Из этого следует, что сравнивать эффект различных обработок поверхности бывает затруднительно без дополнительной информации.

В качестве дополнения к моделям «Archard» и «Usui» предоставляется функциональный пользовательский шаблон, где пользователь может проанализировать нужную для него модель, при этом используя стандартные данные, такие как скорость скольжения, давление и температуру.

Следует сделать вывод, что для выполнения разделительной операции, которая предназначена для штамповки из тонколистового металла наиболее приемлемой, является модель износа Archard. Данная модель рекомендуется разработчиками программы «DEFORM» для моделирования износа при осуществлении разделительных операций.

#### 2.4 Разработка алгоритма расчета износа рабочих частей штампа из сталей У10А и Х12М

Подготовка расчетной конечно-элементной модели выполняется инструментами DEFORM-2D согласно представленному ниже алгоритму:

1. Моделирование рабочих частей штампа и заготовки в Deform 2D. На рисунке показана геометрия штампа и заготовкой. Зазор между рабочими частями равен 0,06 мм [12].

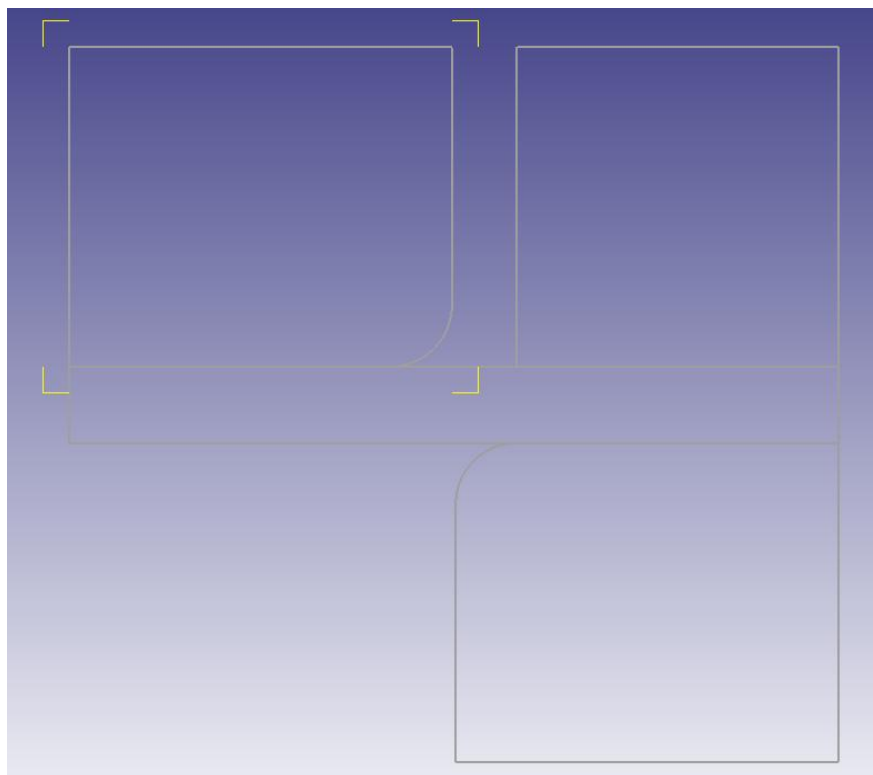


Рисунок 2.2 – Геометрия рабочих частей штампов и заготовки

2. Создание модели конечных элементов (МКЭ) в Deform 2D. Количество элементов на рабочих частях штампа и заготовки равно 5000 (рисунок 2.3). Выполнено местное сгущение сетки конечных элементов в местах скругления режущей кромки инструмента и повышенного износа. Итоговый вид конечно-элементной модели приведен на рисунке 2.4.



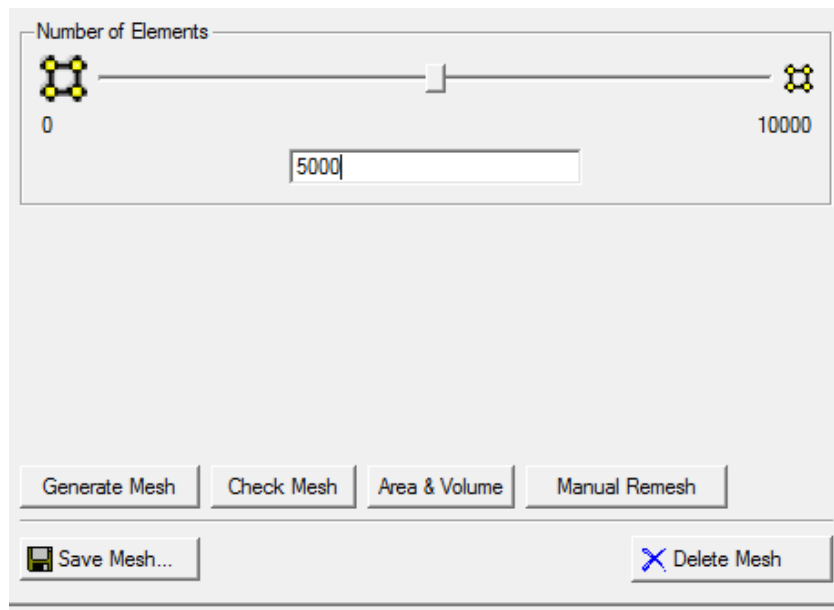


Рисунок 2.3 - Выбор количества конечных элементов на модели

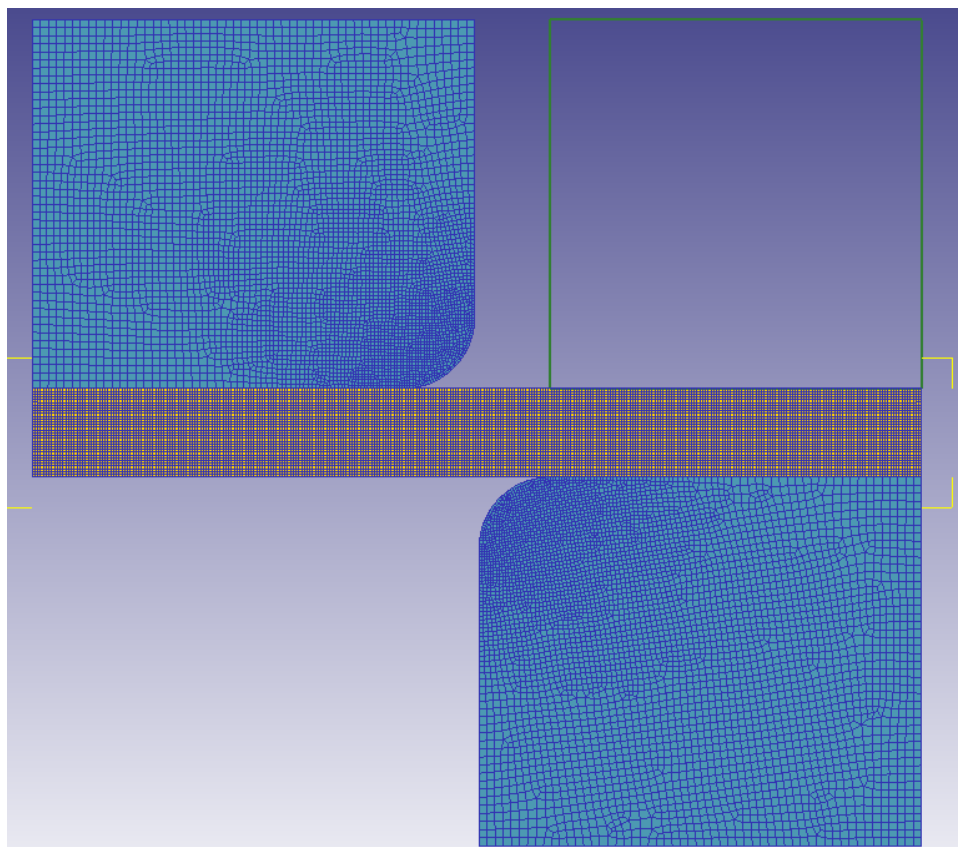


Рисунок 2.4 – Конечно-элементная модель

3. Назначение материала на инструмент и заготовку. Для заготовки был выбран материал 08пс, а для инструмента У10А (рисунок 2.5). На рисунке 2.6 представлено дерево проекта, в котором показано

соответствие между компонентами задачи (инструментом и заготовкой) и назначенным материалом.

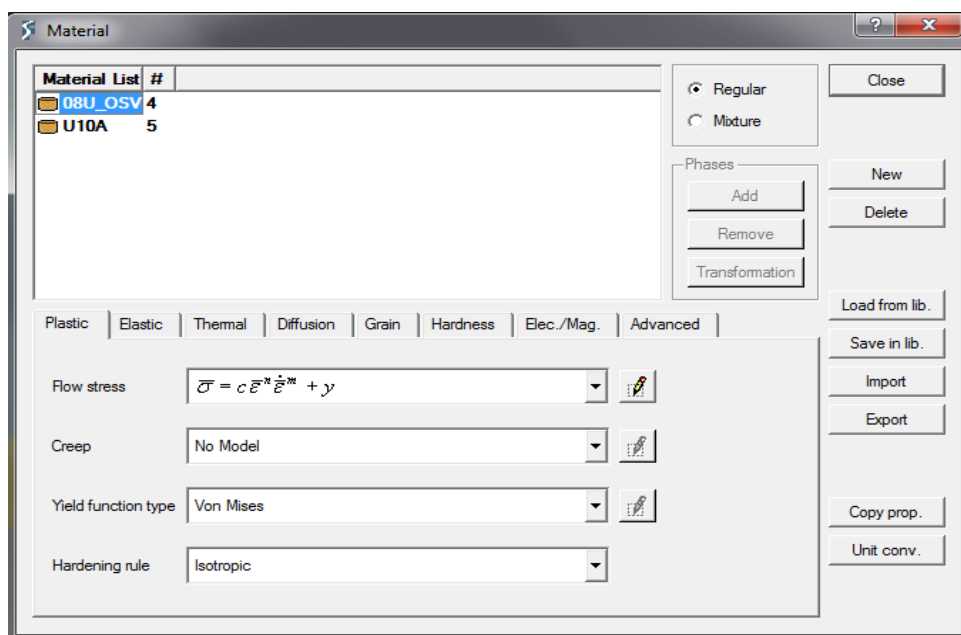


Рисунок 2.5 - Выбор материала для первого расчетного случая

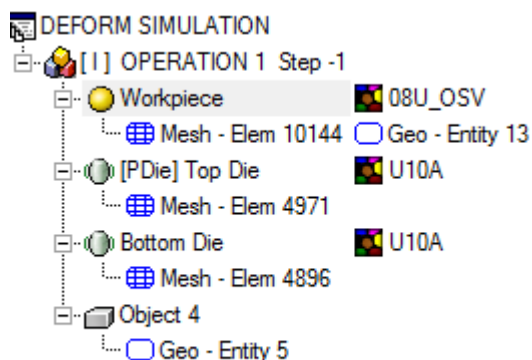


Рисунок 2.6 – Дерево проекта для первого расчетного случая (материал инструмента – У10А)

4. Выбор твердости материала для заготовки и рабочих частей штампа. Для заготовки из стали 08пс задана твердость 25 HRC (рисунок 2.9). Для инструмента – 55 HRC (рисунок 2.10).

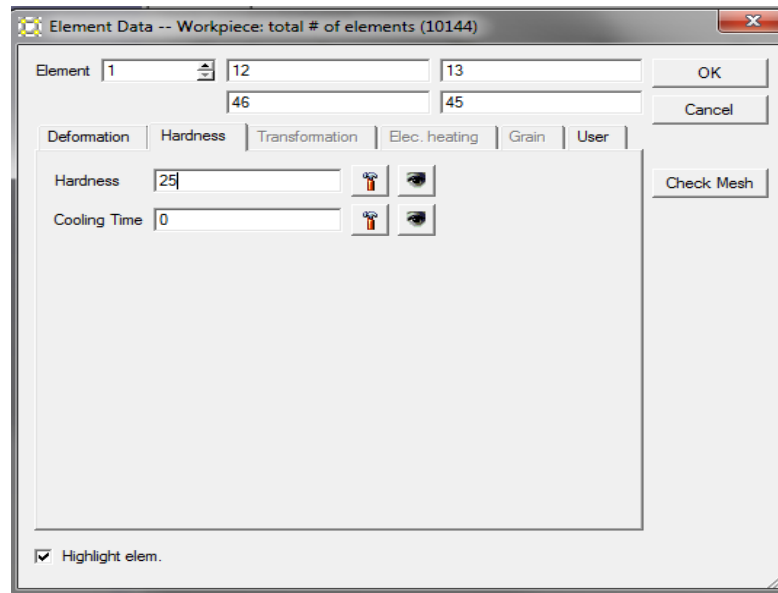


Рисунок 2.9 – Выбор твердости для стали 08 пс

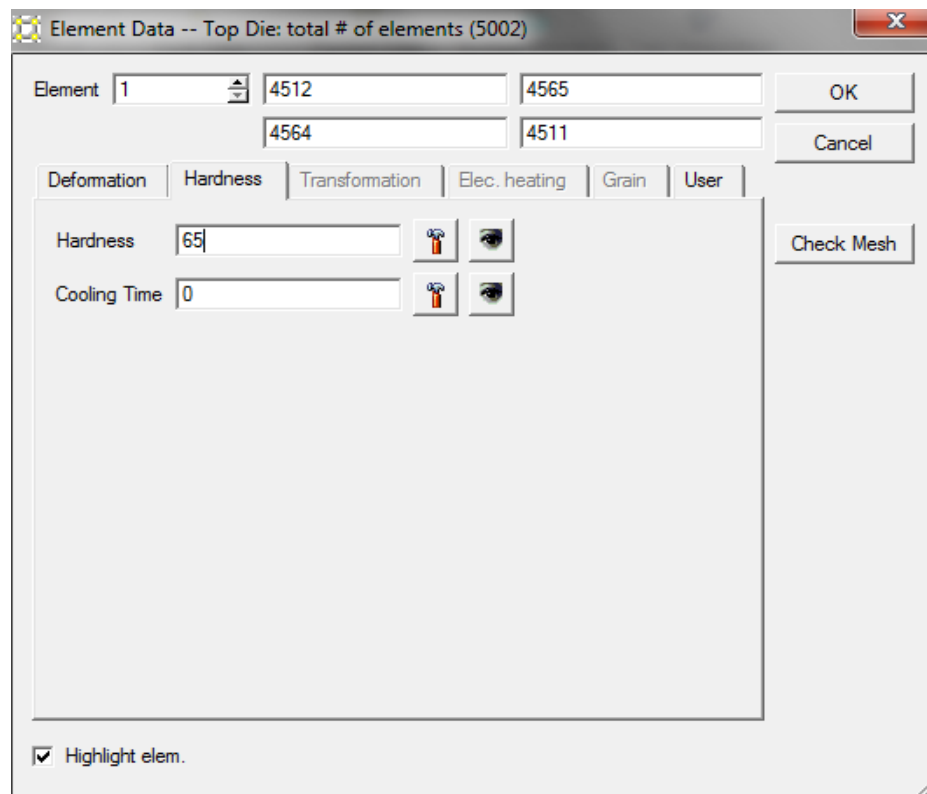


Рисунок 2.10 – Выбор величины твердости для стали X12M

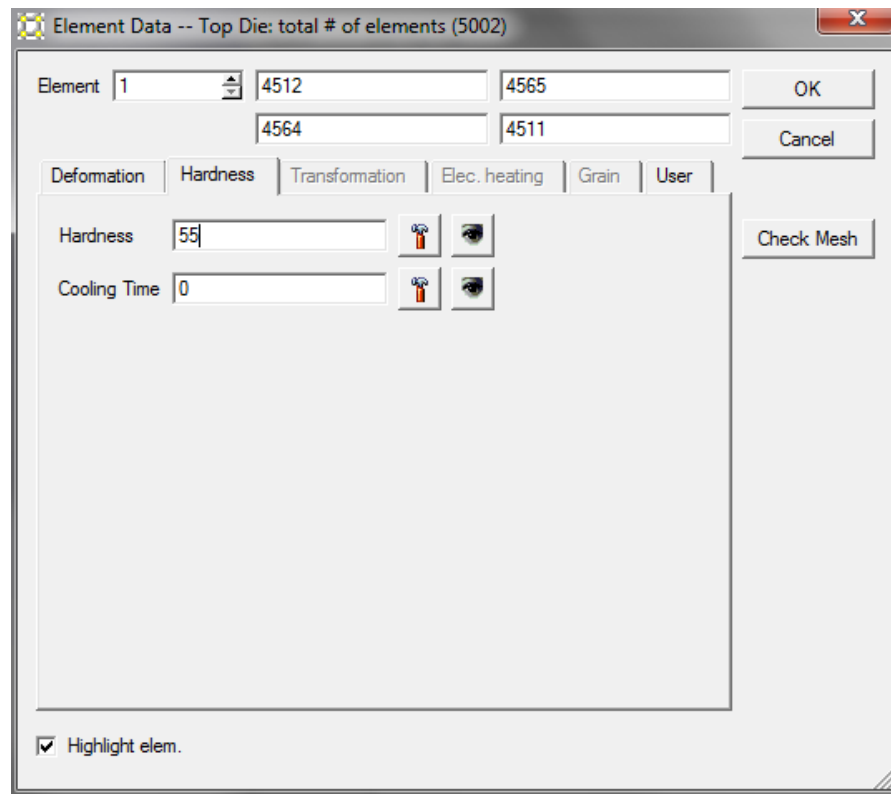


Рисунок 2.11 - Выбор твердости для стали У10А

5. Настройка симуляции процесса. Число шагов расчета – 70. Каждый пятый шаг сохраняемый (рисунок 2.12).

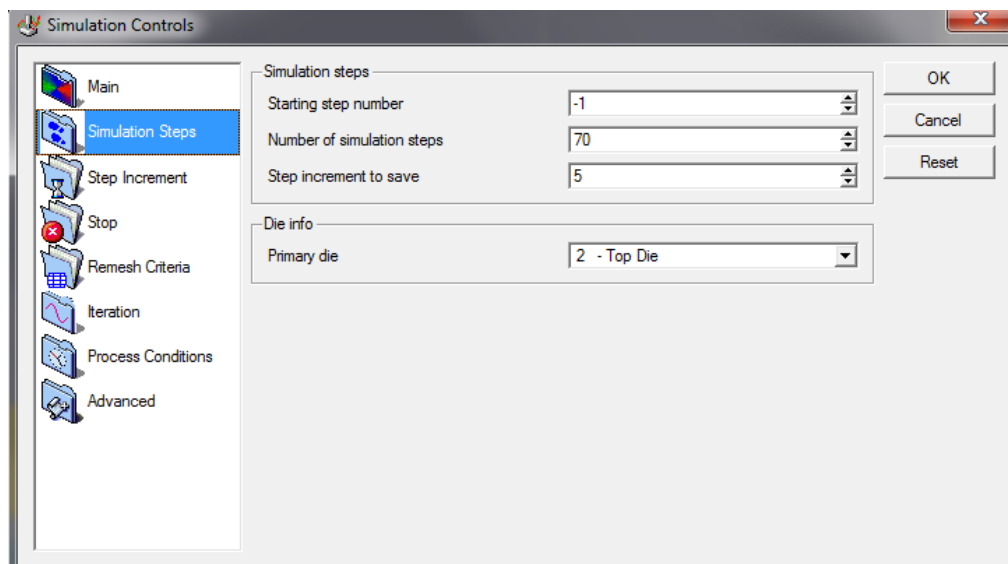


Рисунок 2.12 - Указание количества шагов процесса

6. Задание контакта между объектами. Коэффициент трения равен 0,08 (моделируется процесс со смазкой). Пары контактирующих

компонентов задачи показаны на рисунке 2.13. Визуализация контакта в Deform 2D представлена на рисунке 2.14.

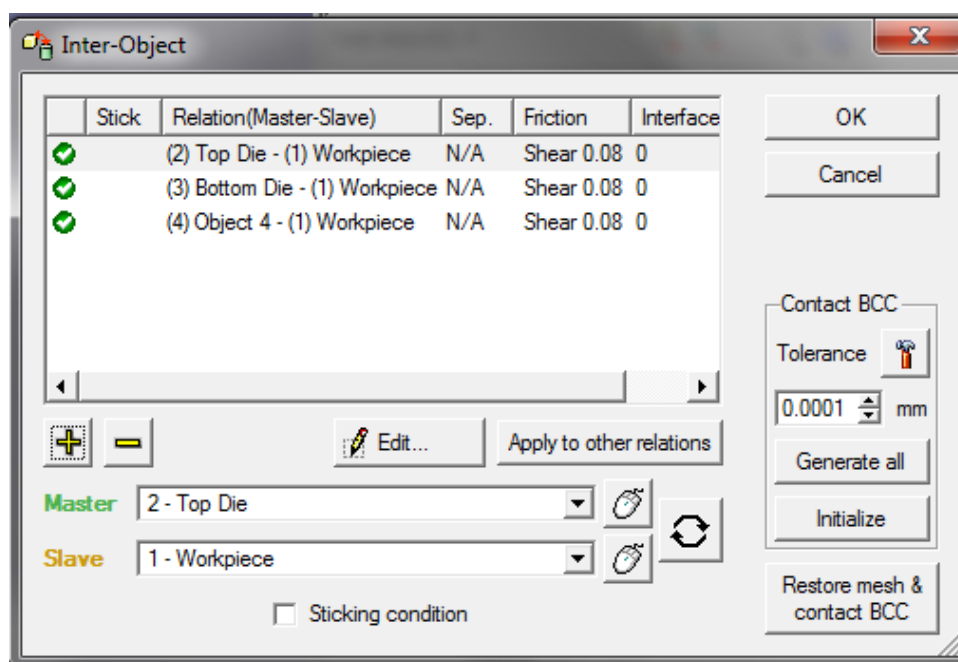


Рисунок 2.13 – Задание контакта между объектами

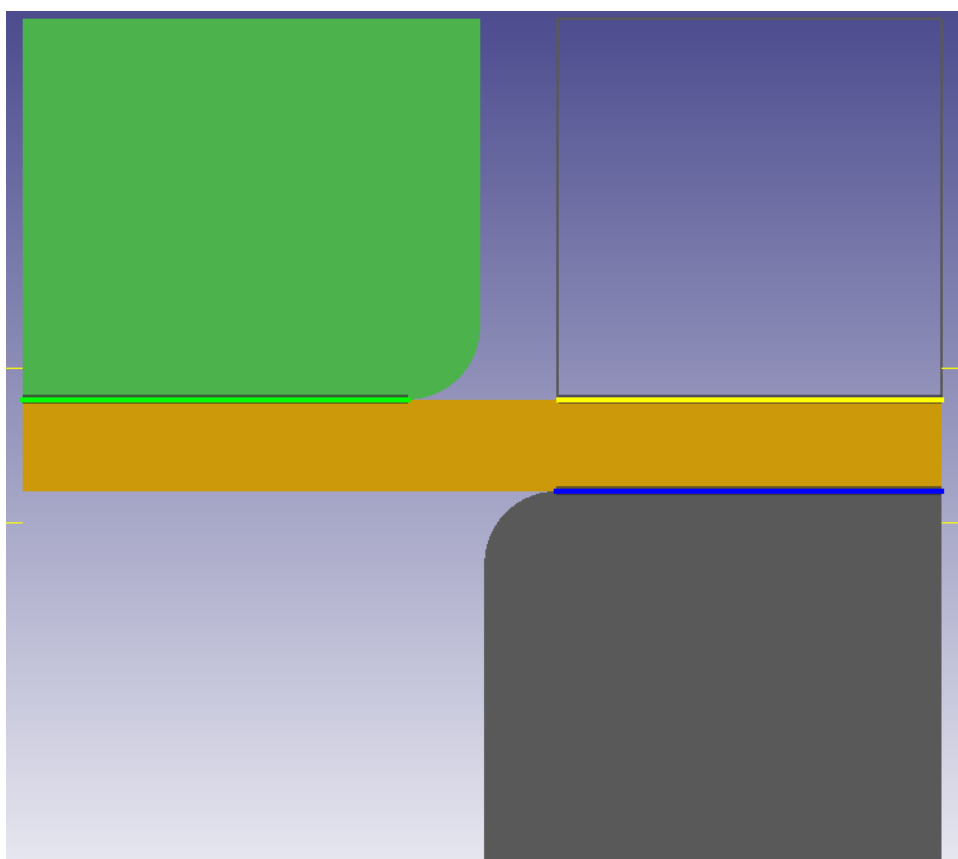


Рисунок 2.14 – Визуализация контакта в Deform 2D

7. Определение движения пуансона. Задается скорость движения пуансона равная 10 мм/с.

The image shows a software dialog box for defining the movement of a punch. It is organized into several sections:

- Type:** Contains radio buttons for Speed (selected), Hammer, Mechanical press, Sliding die, Force, Screw press, Hydraulic press, and Path.
- Direction:** Contains radio buttons for X, Y, Other, -X, and -Y (selected). It also includes an 'Angle' field set to -90 deg and 'Current stroke' fields set to 0 mm.
- Specifications:** Contains radio buttons for Defined (selected) and User Routine.
- Defined:** Contains radio buttons for Constant (selected), Function of time, Function of stroke, and Proportional to speed of other object.
- Constant value:** A field set to 10 mm/sec.

Рисунок 2.15 - Движение пуансона

8. Генерация базы данных и проверка конечно-элементной модели (рисунок 2.16).

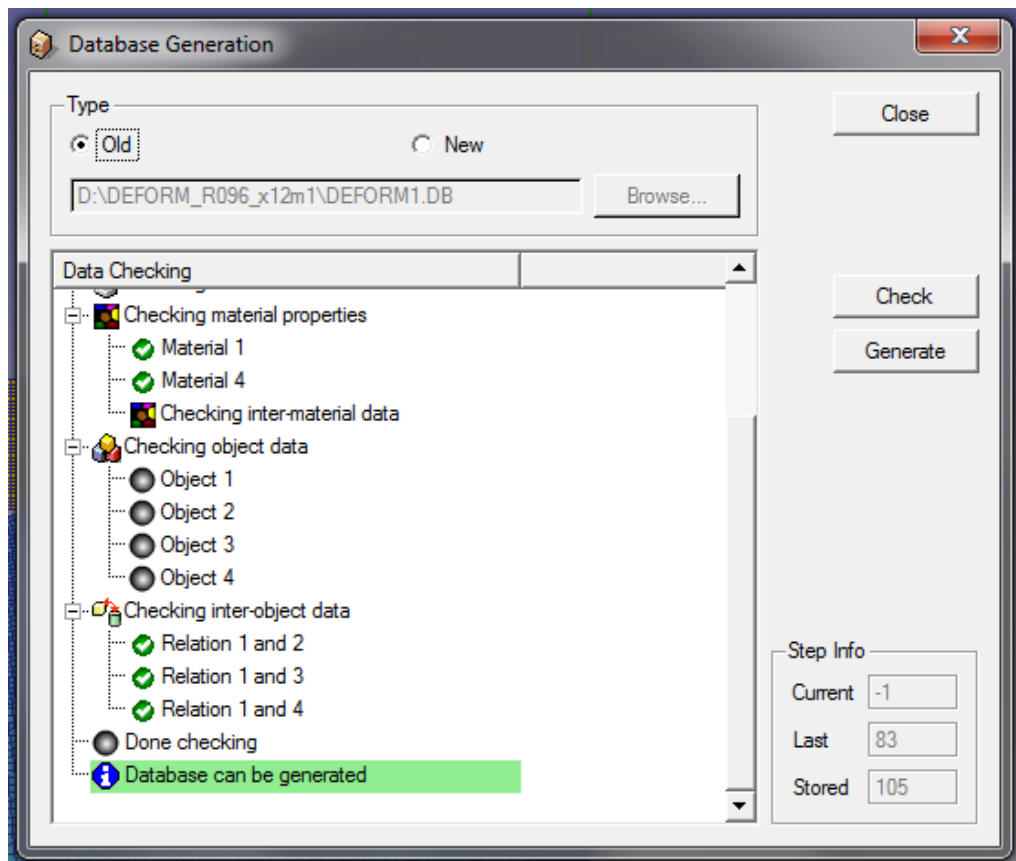


Рисунок 2.16 - Генерация базы данных

9. Для улучшения стойкости рабочих частей штампа, в качестве сравнения со сталью У10А был выбран материал Х12М, который является более твердым и износостойким материалом.
10. Выбор материала Х12М в дереве материалов для второго расчетного случая представлен на рисунке 2.17.

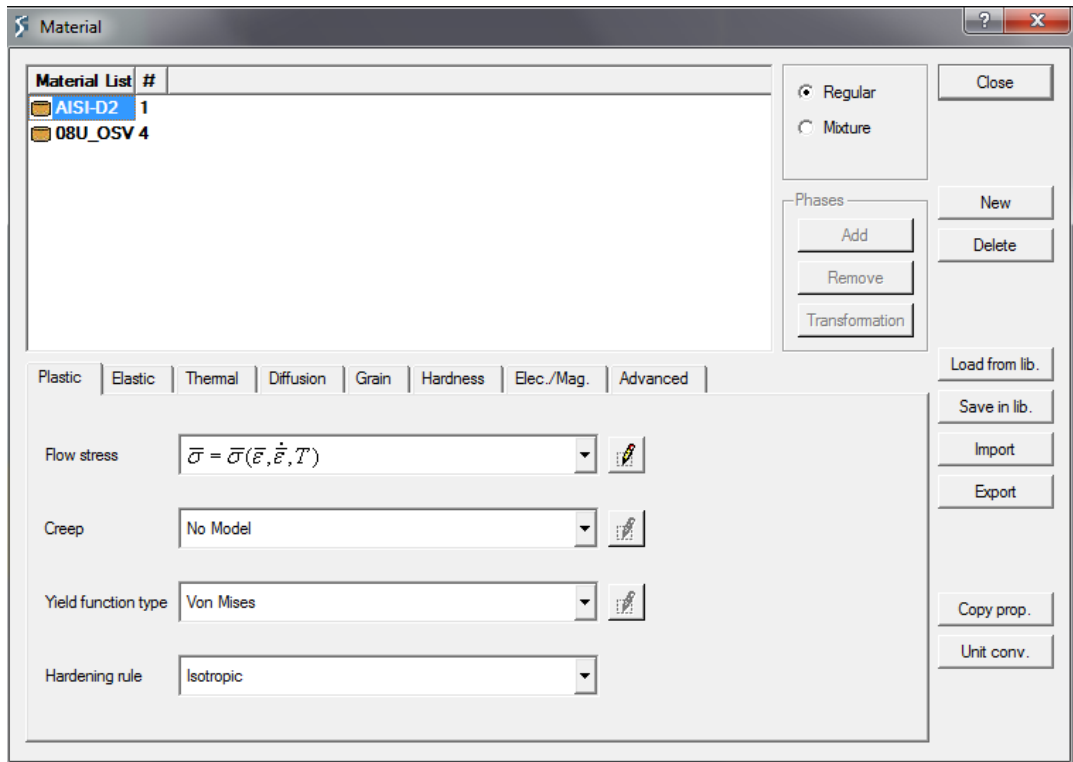


Рисунок 2.17 – Выбор материала для второго расчетного случая

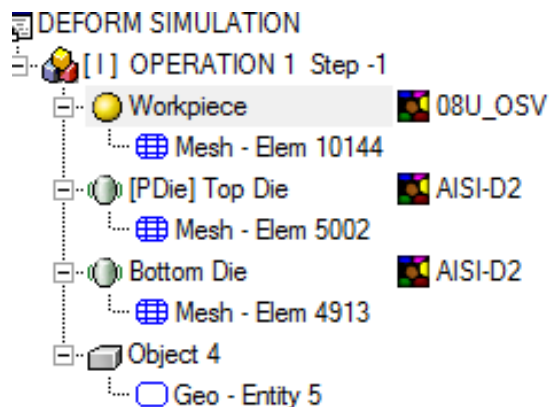


Рисунок 2.18 - Дерево проекта для второго расчетного случая  
(материал инструмента – X12M)

11. Выбор твердости материала для заготовки и рабочих частей штампа.  
 Для заготовки из стали 08пс задана твердость 25 HRC (рисунок 2.9).  
 Для инструмента – 65 HRC (рисунок 2.10).



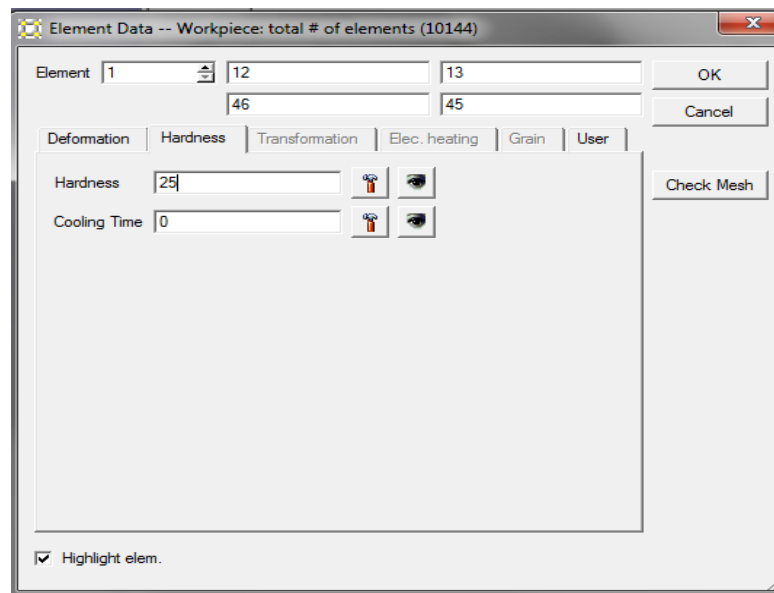


Рисунок 2.19 – Выбор твердости для стали 08 пс

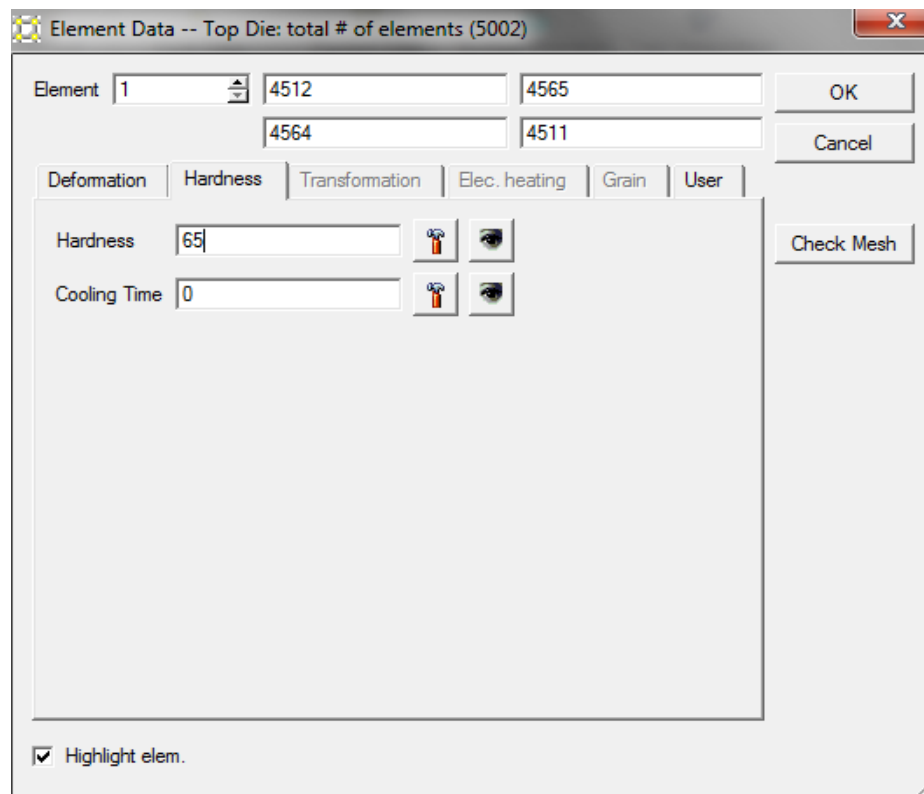


Рисунок 2.20 – Выбор величины твердости для стали X12M

12. Генерация базы данных, и проверка конечно-элементной модели для второго расчетного случая с материалом X12M (рисунок 2.21).

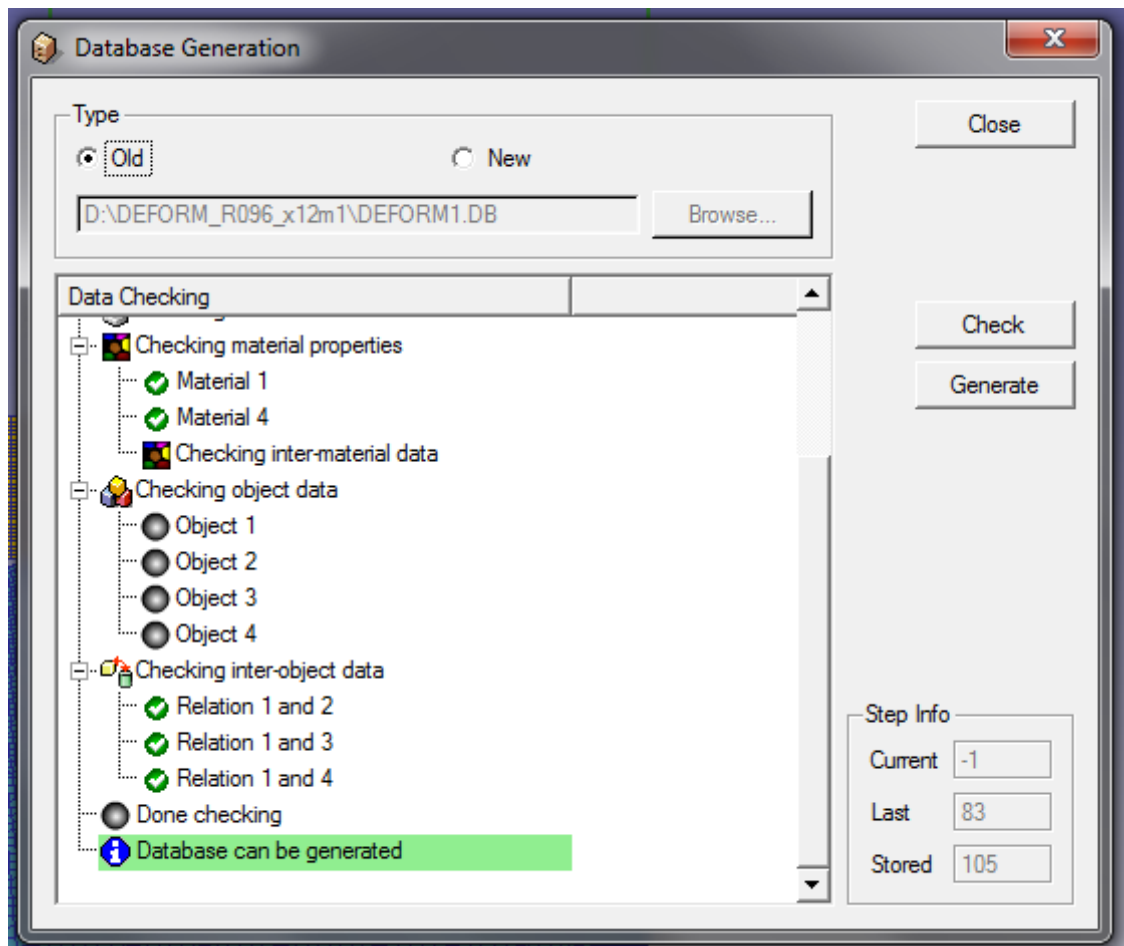


Рисунок 2.21 - Генерация базы данных для второго расчетного случая

На рисунке 2.22 показан алгоритм выполнения поставленной задачи при помощи численного моделирования в DEFORM 2D.

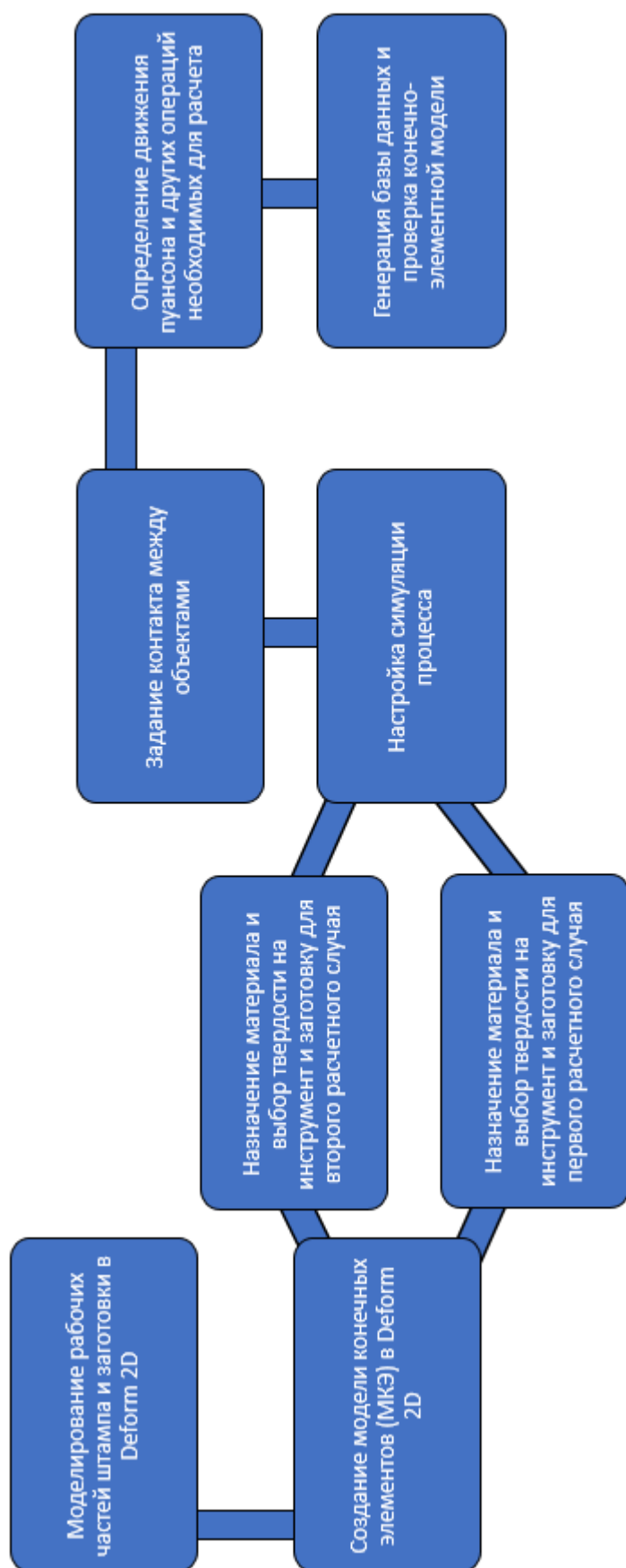


Рисунок 2.22 - Алгоритм выполнения работы в среде численного моделирования

### Глава 3 Оценка влияния параметров конструкции инструмента и технологического процесса на степень износа

#### 3.1 Анализ влияния притупления режущей кромки инструмента на интенсивность роста заусенца

Анализ величины заусенца при различном значении радиуса режущей кромки показал (рисунок 3.1), что величина образующегося заусенца увеличивается с нарастающей интенсивностью. Величина заусенца растет с увеличением притупления режущих кромок инструмента в ходе эксплуатации штампа.

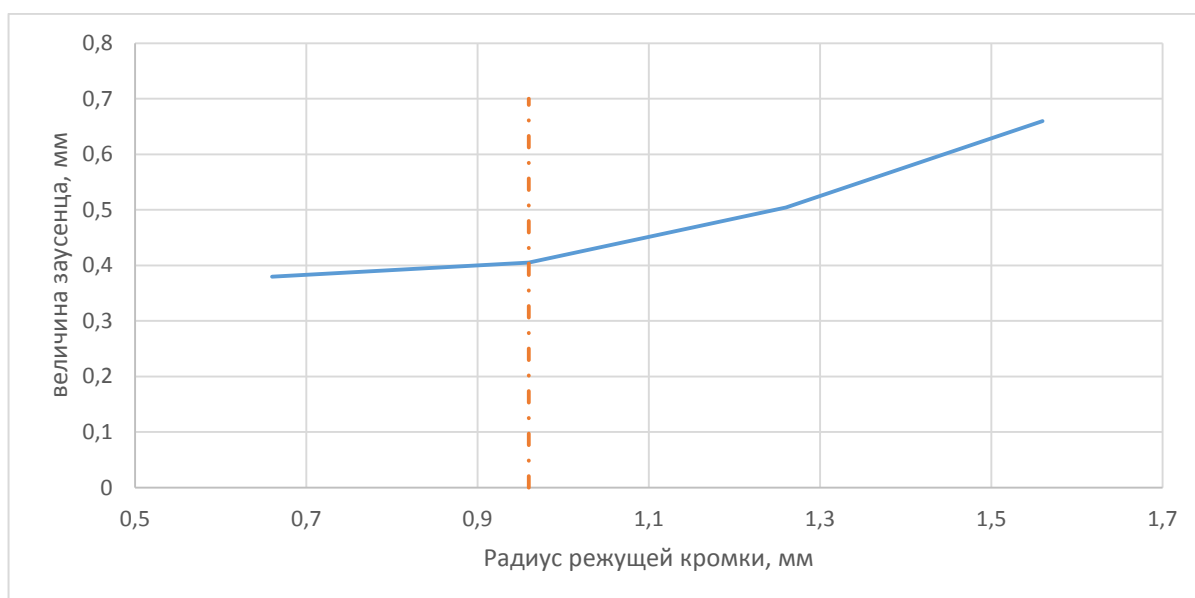


Рисунок 3.1 – Зависимость величины заусенца от радиуса режущей кромки

Зависимость, представленная на рисунке 3.1 показала, достоверность предлагаемого интервала критических значений притупления режущей кромки рабочего инструмента, при которых наблюдается интенсивный рост значений величины заусенца при не значительных увеличениях радиуса притупления режущей кромки более начального значения критического интервала.

Вертикальной красной линией на графике показано начало интервала критических значений притуплений режущих кромок. Граница определяет начало интенсивного снижения качества поверхности реза.

### 3.2 Анализ влияния притупления режущей кромки инструмента на степень износа инструмента

Установлены профили инструмента - пуансона с показанным на нем износом при различных величинах радиуса скругления для материала инструмента У10А (рисунки 3.2 – 3.4).

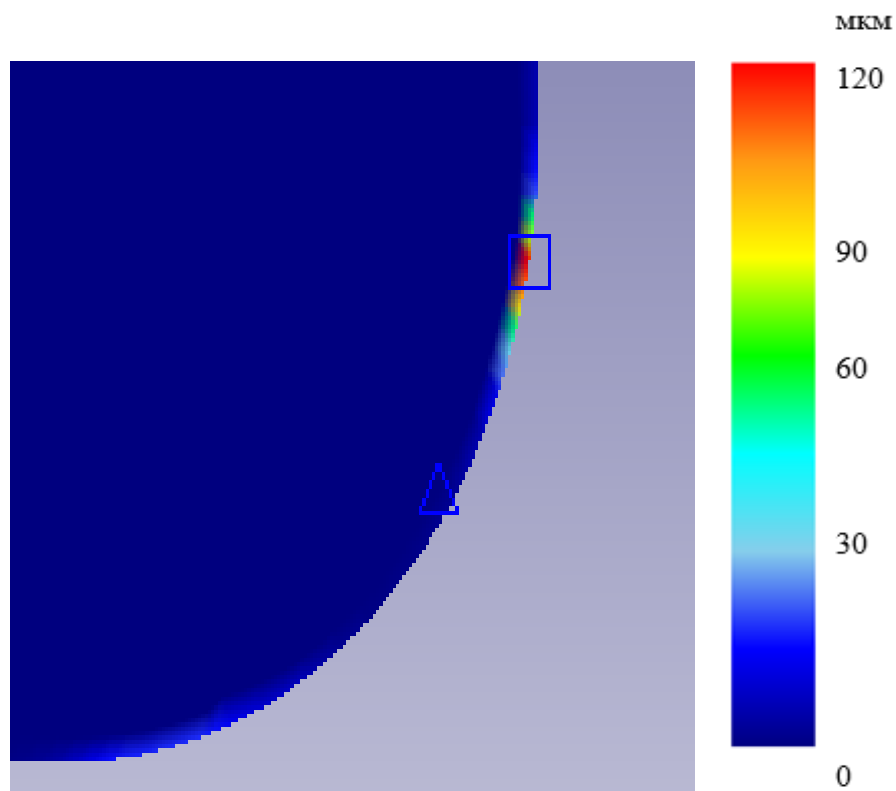


Рисунок 3.2 – Износ пуансона, изготовленного из стали У10А при радиусе скругления  $R=0.96$  мм

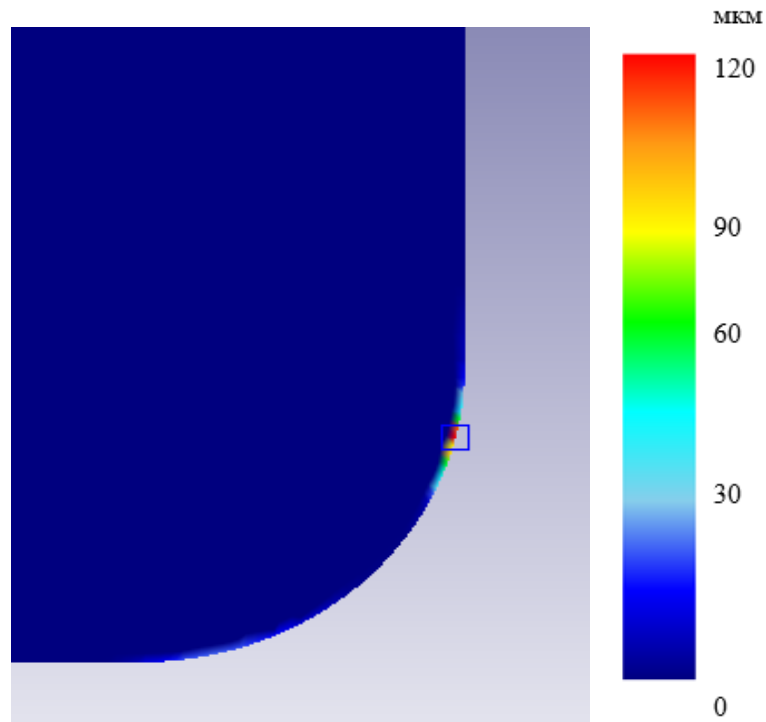


Рисунок 3.3 – Износ пуансона, изготовленного из стали У10А при радиусе скругления  $R=1.26$  мм

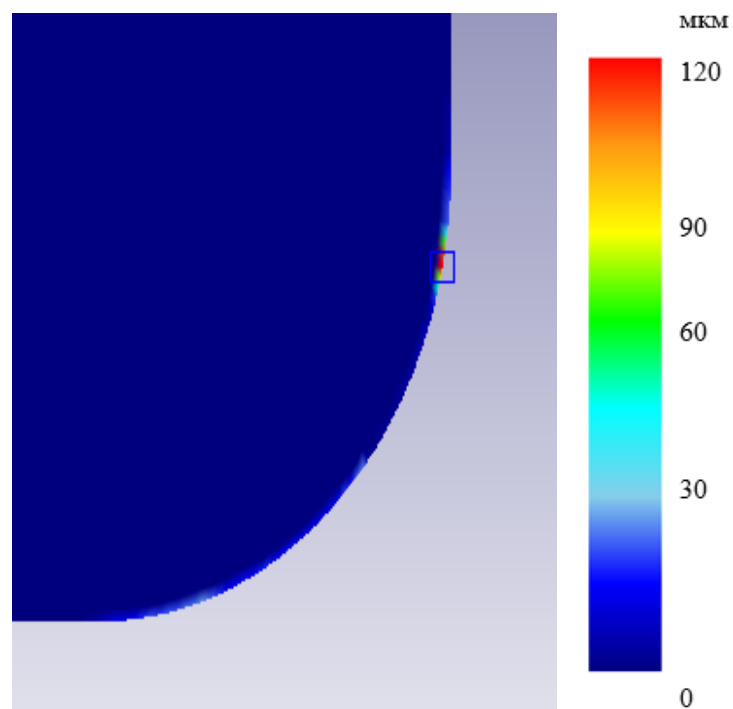


Рисунок 3.4 – Износ пуансона, изготовленного из стали У10А при радиусе скругления  $R=1.56$  мм

Профиль инструмента - пуансона с показанным на нем износом при различных величинах радиуса скругления для материала инструмента X12M (рисунки 3.2 – 3.13).

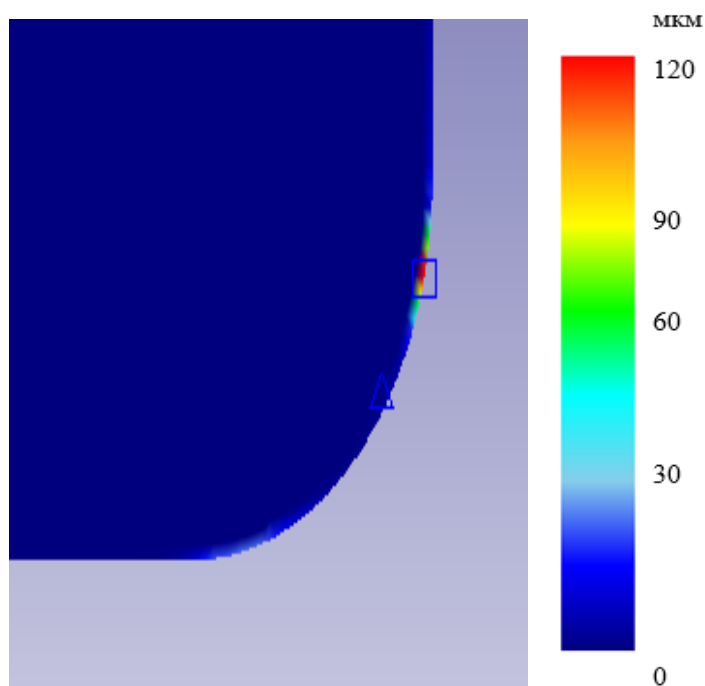


Рисунок 3.5 – Износ пуансона, изготовленного из стали X12M при радиусе скругления  $R=0.96$  мм

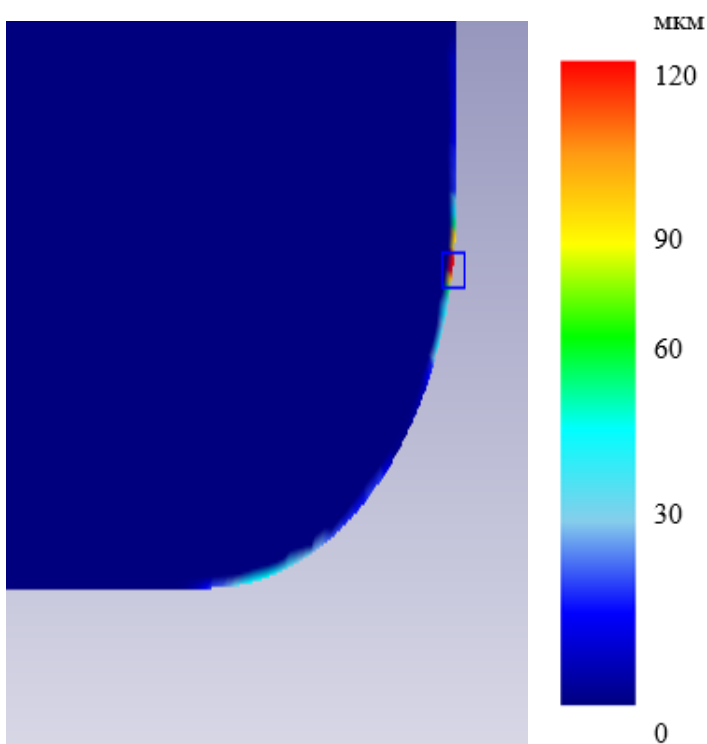


Рисунок 3.6 – Износ пуансона, изготовленного из стали X12M при радиусе скругления  $R=1.26$  мм

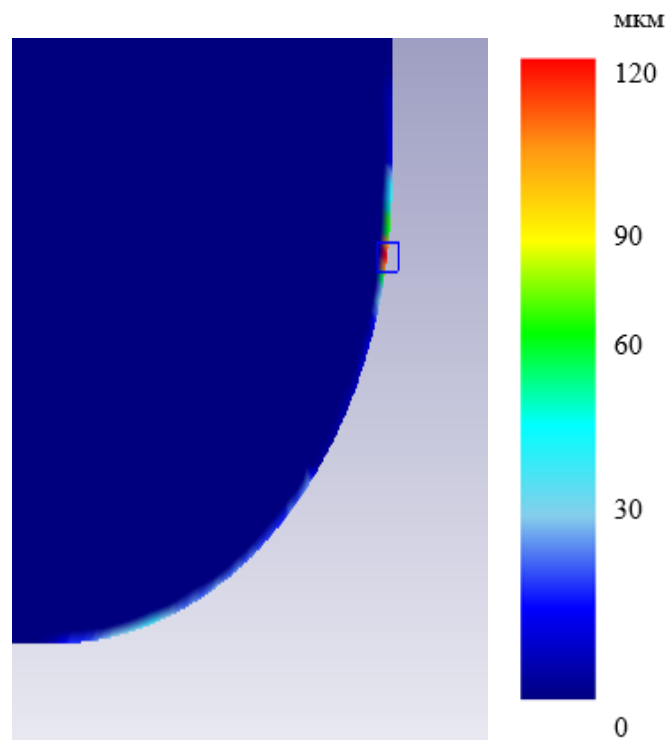


Рисунок 3.7 – Износ пуансона, изготовленного из стали X12M при радиусе скругления  $R=1.56$  мм

На рисунках 3.8 – 3.10 показан профиль матрицы при различных величинах радиуса скругления для материала У10А.



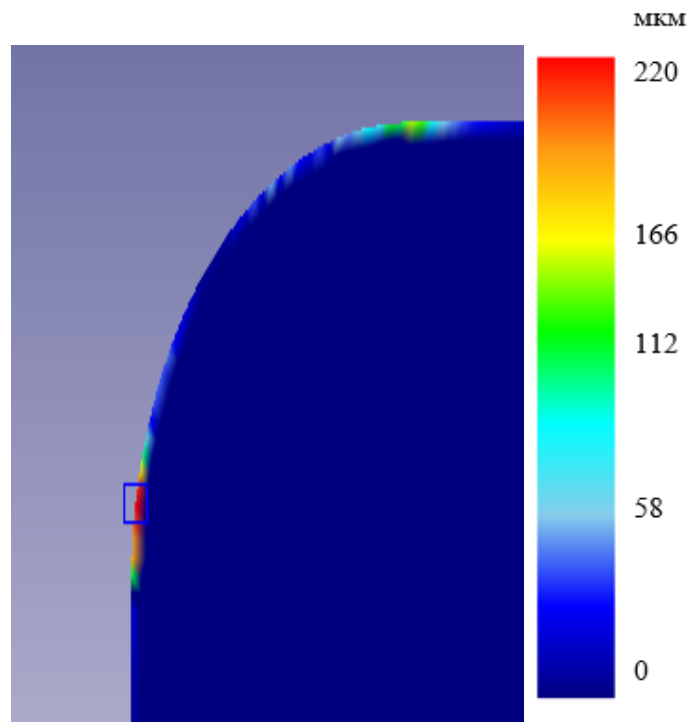


Рисунок 3.8 – Износ матрицы, изготовленной из стали У10А при радиусе скругления режущей кромки  $R=0.96\text{mm}$

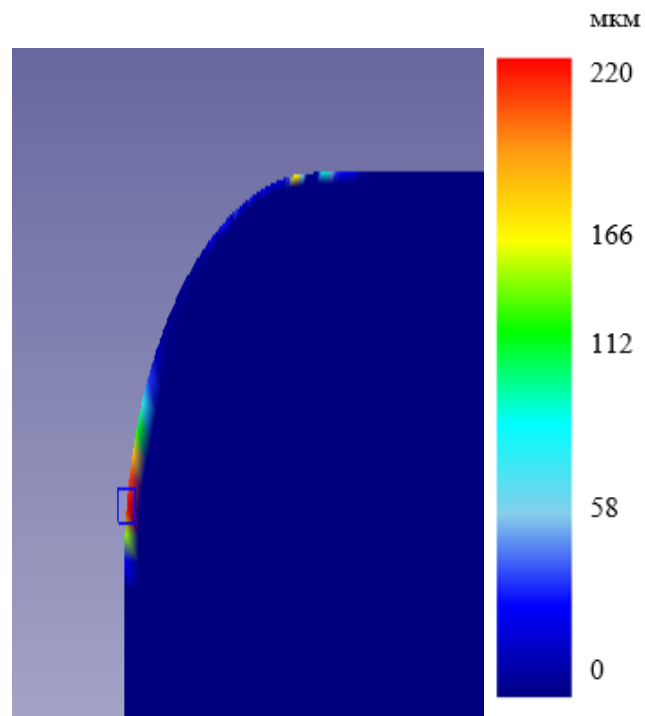


Рисунок 3.9 – Износ матрицы, изготовленной из стали У10А при радиусе скругления режущей кромки  $R=1.26\text{mm}$

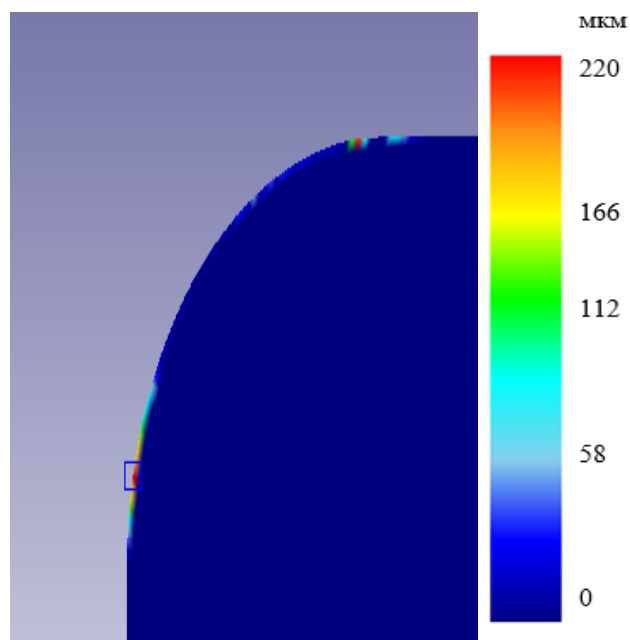


Рисунок 3.10 – Износ матрицы, изготовленной из стали У10А при радиусе скругления режущей кромки R=1.56мм

Установлены профили инструмента - матрицы с показанным на нем износом при различных величинах радиуса скругления для материала инструмента Х12М (рисунки 3.11 – 3.13).

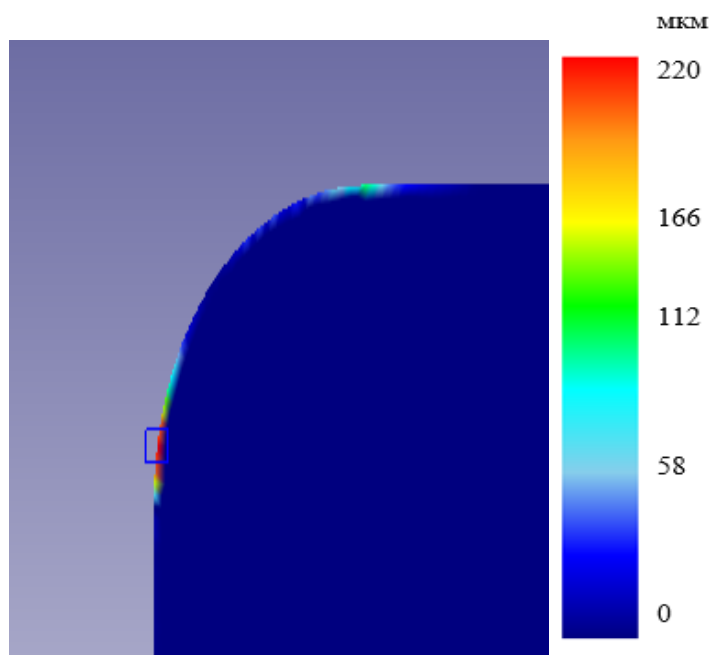


Рисунок 3.11 – Износ матрицы, изготовленной из стали Х12М при радиусе скругления режущей кромки R=0.96мм

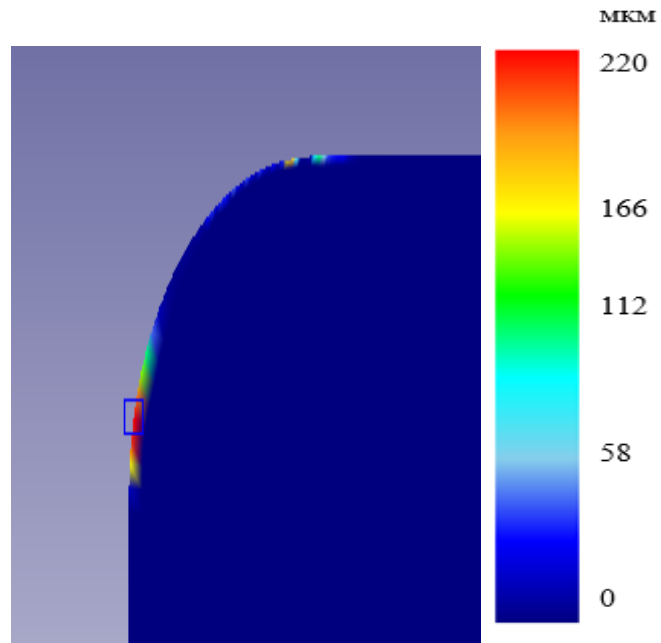


Рисунок 3.12 – Износ матрицы, изготовленной из стали X12M при радиусе скругления режущей кромки  $R=1.26\text{мм}$

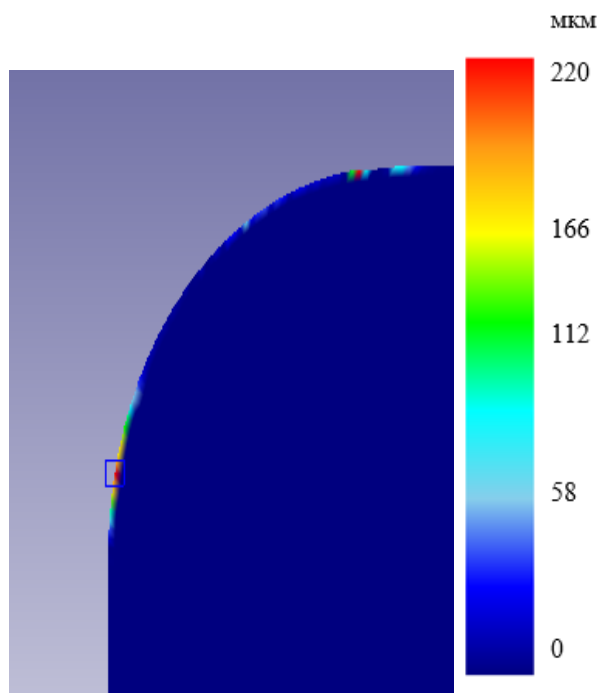


Рисунок 3.13 – Износ матрицы, изготовленной из стали X12M при радиусе скругления режущей кромки  $R=1.56\text{мм}$

### 3.3 Анализ сравнительной оценки износостойкости рабочих частей штампа из сталей У10А и Х12М

На основании расчетов были получены графики зависимости отношения глубины износа пуансона и матрицы от радиуса притупления режущей кромки инструментов (рисунки 3.15 и 3.16).

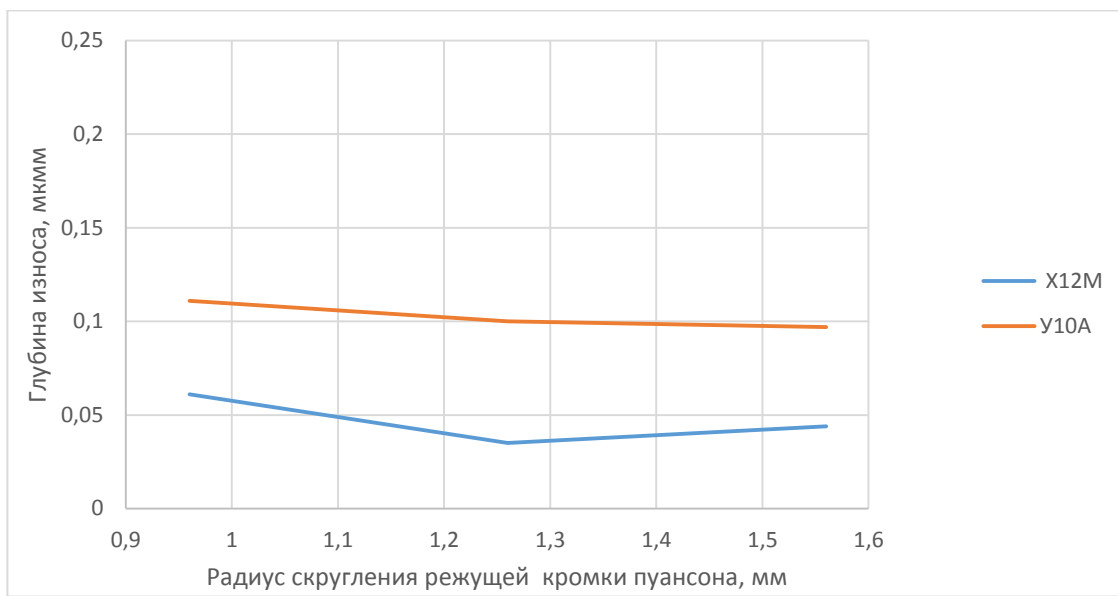


Рисунок 3.14 – График отношения глубины общего износа пуансона к радиусу притупления режущей кромки рабочего инструмента

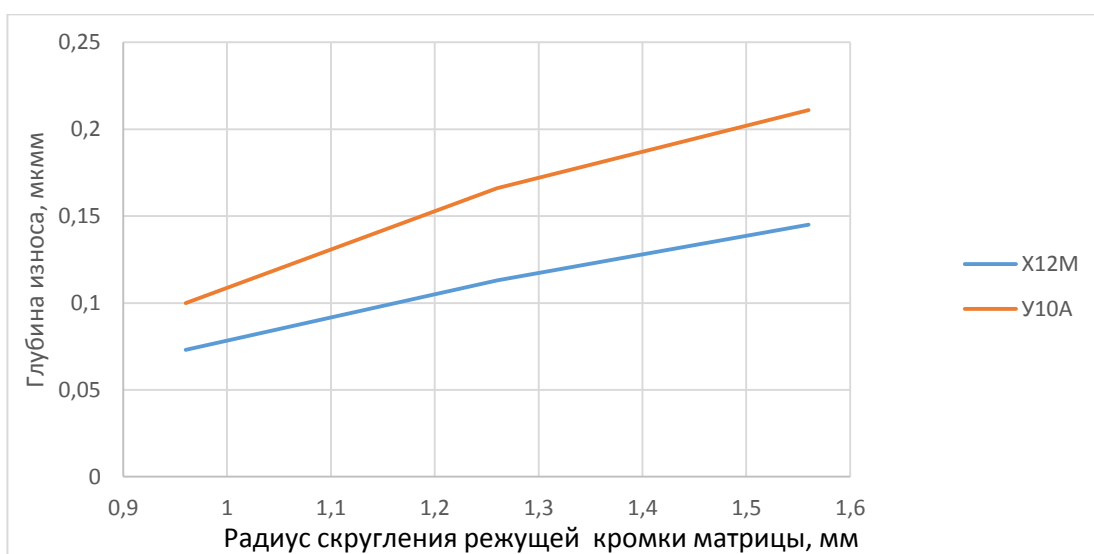


Рисунок 3.15 – График отношения глубины общего износа матрицы к радиусу притупления режущей кромки рабочего инструмента

Анализ построенных кривых, отражающих зависимость величины износа от величины скругления режущей кромки рабочего инструмента, показал, что кривые для пуансона и матрицы имеют схожий характер. При этом боковой и торцевой износы матрицы преобладают над соответствующими износами пуансона (рисунок 3.16).

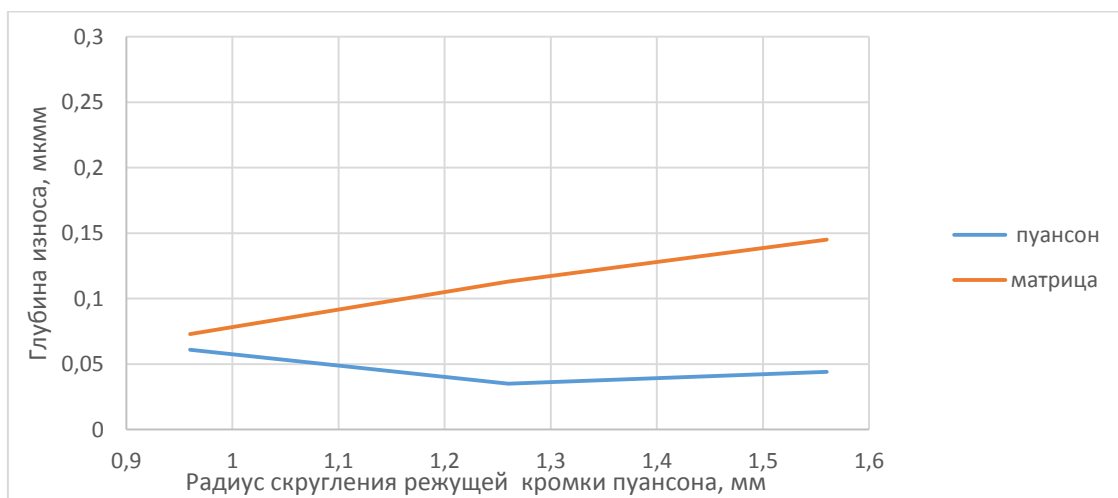


Рисунок 3.16 - Сравнительный анализ глубины износа пуансона и матрицы на примере стали X12M

Повышенный износ матрицы связан с трением заготовки о ее боковую поверхность в процессе перемещения материала в связи с изменением радиуса режущей кромки.

Анализ глубины износа пуансона и матрицы показал, что среднее значение износа матрицы режущей кромки инструмента больше, чем на пуансоне в 2,4 раза.

Согласно зависимости, представленной на рисунках 3.14 и 3.15 среднее значение износа инструмента при использовании стали X12M меньше в 0,45 раз для пуансона и в 0,69 раз для матрицы, чем инструмента, выполненного из стали У10А.

Разница величин износа для рассматривания сталей обеспечивается тем, что сталь X12M наиболее износостойкая по сравнению с инструментом из стали У10А.

На рисунке 3.17 показана зависимость суммарного износа по одному и тому же элементу режущего контура матрицы, изготовленной из стали X12M от числа деталей, отштампованных до переточки штампа. Аналогичные кривые были построены и для других элементов режущего контура различных марок.

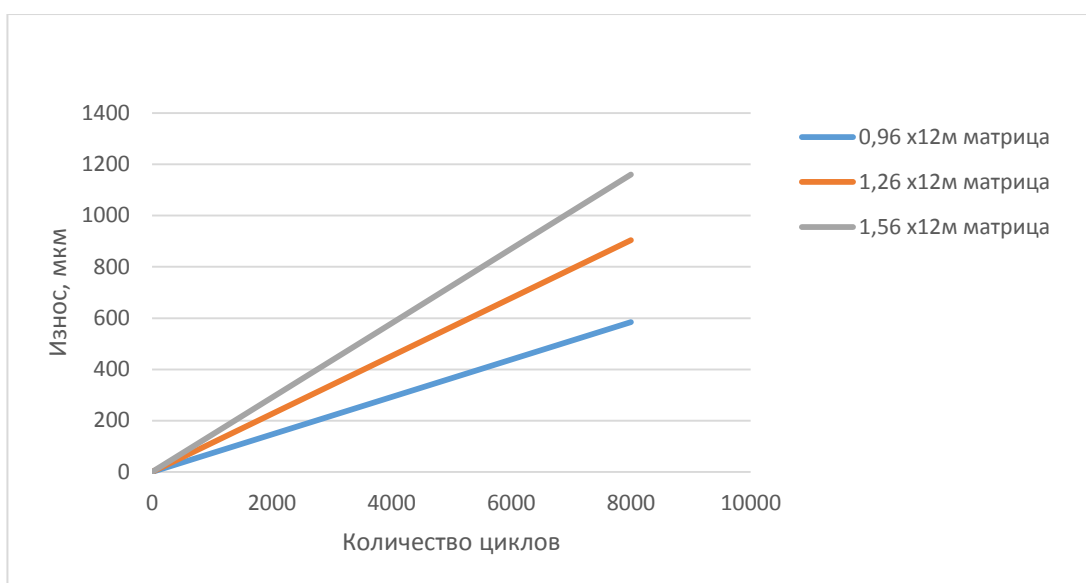


Рисунок 3.17 – Изменение суммарного износа инструмента, изготовленного из стали X12M, в зависимости от числа отштампованных деталей до переточки

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной магистерской диссертации рассмотрены причины появления деформации на рабочих частях штампа при выполнении разделительных операций холодной листовой штамповки. Был произведен анализ теоретических и практических методов изучения разделительных операций холодной листовой штамповки, которые были рассмотрены ранее в других работах.

Были рассмотрены две модели износа инструмента «Archard» и «Usui», которые применяются в программном продукте «DEFORM». Создана конечно-элементная модель разделительной операции. Проведены два сравнительных расчета процесса резки с материалами, отличающимися по твердости. На основании результатов расчетов были получены: графики отношения глубины общего износа пуансона и матрицы к радиусу притупления режущей кромки рабочего инструмента; изменение суммарного износа инструмента, изготовленного из стали X12M, в зависимости от числа отштампованных деталей до переточки; зависимость величины заусенца от радиуса режущей кромки, а также профили рабочего инструмента с показанным на нем износом при различных величинах радиуса притупления режущей кромки.

Анализ представленных результатов на полученных графиках показал, что среднее значение износа инструмента при использовании стали X12M меньше в 0,45 раз для пуансона и в 0,69 раз для матрицы, чем инструмента, выполненного из стали У10А.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вайнтрауб, Д.А. О влиянии зазора на стойкость разделительных штампов / Д.А. Вайнтрауб. М: Кузнечно-штамповочное производство. 1968. - с. 22-23.
2. Бобрынин, Б.Н. Технология штамповки неметаллических материалов. / Б.Н. Бобрынин. М., Машгиз, 1962. – с 46.
3. Галей, М.Т. Износостойкость инструмента и электрические явления в цепи станок – изделие – инструмент / М.Т. Галей. Приборостроение, 1965. – с. 200.
4. Гаркави, Я. Н. О распределении напряжений в материале при процессах вырезки, пробивки и резки на ножницах с параллельными ножами. / Я.Н. Гаркави// Инженерный сборник. Том 3. Выпуск 1. Издательство АН СССР, 1946. – с.31.
5. Головлев, В.Д. Исследование процесса вырубке-пробивки. /В.Д. Головлев. // – В сб. научно-исследовательских работ СТАНКИНа Новое в области штамповочной технологии. М., Машгиз, 1951. – с. 165.
6. Горячий, Д. В. Эксплуатация и ремонт штампов листовой штамповки. / Д.В. Горячий, С.И. Ефремов.М., Машиностроение, 1969. – с. 82-86.
7. Давыдов, Ю. П. Листовая штамповка легированных сталей и сплавов. / Ю.П. Давыдов, Г.В. Покровский. Оборонгиз, 1962. – с. 32.
8. Елистаров, В.И. Исследование нормальных напряжений по торцу твердосплавных пуансонов при вырубке-пробивке. / В.И. Елистаров. - Кузнечно-штамповочное производство, 1973. – с. 17.
9. Шеин, А. А. Технологическое обеспечение качества деталей в процессах разделительной штамповки путем нанесения на инструмент вакуумно-плазменных покрытий: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.02.08 / Шеин Александр Анатольевич. Моск. гос. технол. ун-т "Станкин". - Москва, 2005. - 20 с.



10. Залесский, В. И., Механизм деформации при резке металла в штампах. / В. И. Залесский, В.В. Губарев // – В сб. Технологические процессы обработки стали и сплавов. Труды Московского института стали (□□□□). Металлургиздат, 1998. – с. 63.
11. Михаленко, Ф.П. Стойкость разделительных штампов. / Ф.П. Михаленко. М. Машиностроение, 1976. – с. 207.
12. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. - С. 265
13. Лисин, А.Г. Напряжения и деформации по пояску смятия и влияние их на стойкость штампов разделительных операций. / А.Г. Лисин // – В кн.: Оборудование и технология штамповки. Научные труды Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола, № 51, Челябинск, 1969. – С. 9-13.
14. Михаленко, Ф.П. Износ штампового инструмента и качество деталей при вырубке-пробивке на быстроходном прессе-автомате. / Ф.П. Михаленко, М.М. Дурандин // – В сб.: Совершенствование кузнечно-прессовых машин и технологических процессовковки и штамповки. Труды Горьковского политехнического института им. А.А. Жданова. Том □□□□, вып. 13. Горький, 1970. – с. 211.
15. Лисин, А. Г. Зазоры и стойкость пуансонов при операциях пробивки. / А.Г. Лисин // – В кн.: Обработка металлов давлением. Исследование процессов производства труб и других изделий, вопросы расчета и конструирования оборудования. Всесоюзный заочный машиностроительный институт, 1971. – с. 63.
16. Пищулин, Н.И. Влияние условий прессования заготовок из стали Х12М на структуру и ударную вязкость режущих частей вырубных штампов. / Н.И. Пищулин, З.И. Минаева - Кузнечно-штамповочное производство, 1973. – с. 46.
17. Слободчикова, Р.И., Повышение эффективности метода случайного баланса путем применения ветвящейся стратегии и использования

- электронно-вычислительных машин. / Р.И. Слободчикова, В.Л. Фрейдлина, Э.С. Лапина. - Заводская лаборатория, 1966. – с.39-41.
18. Попов, В.С. Прибор для измерения величины износа и записи профиля изношенной поверхности. Машины, приборы для испытания материалов, / В.С. Попов, В.Н. Брыков // Сб. статей журнала Заводская лаборатория. Металлургия, 1968. – с. 98.
19. Тюрин, Н.И. Исследование процесса вырубki деталей малых толщин из никелевого сплава НП-2. / Н.И. Тюрин – В Сб.: Обработка металлов давлением. Исследование процессов производства труб и других изделий, вопросы расчета и конструирования оборудования. Всесоюзный заочный машиностроительный институт. М., Металлургия, 1991. – с. 406.
20. Якобсон, А.В. Определение качества штампуемой детали в зависимости от стойкости инструмента штампа. / А.В. Якобсон - Вопросы радиоэлектроники. Серия Технология производства и оборудование. Выпуск 1, 1971. – с. 15.
21. Шалфеев, С.Д. Закономерности износа и методы повышения стойкости вырубных штампов / С.Д. Шалфеев, К., Татарское книжное издательство, 1965. – с. 48.
22. Степанян, Р.Л. О износостойкости штамповых сталей X12M и У8А. / Р.Л. Степанян, Ф.Г. Бергесян, Ф.Г. Петросян, С. Б. Арутюнян // – Сб. научных трудов Ереванского политехнического института им. К. Маркса. Том 33, выпуск 5, серия Машиностроение. Е., 1971. – с.61-69.
23. Полетика, М.Ф. Прибор для исследования износа режущего инструмента. / М.Ф. Полетика, В.А. Наумов // – Известия Томского политехнического института, том 147, Механика и машиностроение, Т.,1997. – с. 112.
24. Денисов, В.Т. Резервы повышения эффективности холодноштамповочного производства. / В.Т. Денисов // Издательство Саратовского университета, 2003. – с. 56.

25. Опитц, Г. Об износе режущего инструмента. / Г. Опитц // Сборник докладов Лондонской конференции по трению и износу. Издательство иностранной литературы 1986. – с. 32-41.
26. Ali Hosseini. Cutting Tool Materials and Tool Wear. / Ali Hosseini Hossam, A. Kishawy. 2014. – с. 11
27. Michael, P. Pereira. Wear at the die radius in sheet metal stamping. / Michael P. Pereira, Wenyi Yan, Bernard F. Rolfe. 2011. – с. 29.
28. Gołombek, K. Hard and wear resistance coatings for cutting tools. / K. Gołombek, L.A. Dobrzański, 2007. – с. 14.
29. Fluhrer, J. Tool Wear and Surface Roughness in Turning AISI 8620 using Coated Ceramic Tool / Jeffrey Fluhrer, 2006. – с. 8.
30. Dadić, Z. Measures to reduce cutting tools wear. / Zvonimir Dadić, 2013. – с. 21.