

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГБОУ ВО «УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

МОРОЗОВ ОЛЕГ ИГОРЕВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ ШТАМПОВ НА ОПЕРАЦИЯХ ЛИСТОВОЙ
ШТАМПОВКИ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор Табаков В.П.

Ульяновск — 2022

Оглавление

Введение	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ И РАБОТОСПОСОБНОСТИ РАБОЧИХ ДЕТАЛЕЙ ШТАМПОВ И КАЧЕСТВА ПОЛУЧАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ	11
1.1. Характеристика схем напряженно-деформированного состояния и механических схем нагружения инструмента листовой штамповки при реализации сдвига и среза	11
1.2. Эксплуатационная стойкость штампов листовой штамповки	14
1.3. Методы повышения стойкости штампового инструмента	21
1.4. Цель и задачи исследования	31
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА	35
2.1. Методология исследования	35
2.2. Моделирование процесса разрушения износостойких покрытий	39
2.3. Разработка математической модели процесса изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента на операции «вытяжка с принудительным утонением»	53
2.4. Разработка математической модели процесса изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента на операции «вырубка»	56
2.5. Выводы по главе	59
ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА	60
3.1. Численное моделирование процесса изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента на операции «вытяжка с принудительным утонением»	60
3.2. Численное моделирование процесса изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента на операции «вырубка»	65

3.3. Исследование влияния межинструментального зазора на напряженно-деформированное состояние в очаге деформации	74
3.4. Выводы по главе	93
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА С ИЗНОСОСТОЙКИМИ ПОКРЫТИЯМИ	94
4.1. Экспериментальные исследования эффективности штампового инструмента с износостойкими покрытиями на формоизменяющих операциях листовой штамповки	94
4.2. Экспериментальные исследования эффективности штампового инструмента с износостойкими покрытиями на разделительных операциях листовой штамповки	100
4.3. Сравнительный анализ результатов математического моделирования и экспериментальных исследований	105
4.4. Выводы по главе	108
ГЛАВА 5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ С ИЗНОСОСТОЙКИМ ПОКРЫТИЕМ	109
5.1. Анализ экономической эффективности использования рабочего инструмента с износостойким покрытием на операции «вытяжка с принудительным утонением»	110
5.2. Анализ экономической эффективности использования рабочего инструмента с износостойким покрытием на операции «вырубка»	112
5.3. Технологические рекомендации применения ИП на ШИ на операциях «вытяжка с принудительным утонением» и «вырубка»	114
5.4. Выводы по главе	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	116
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	120
ПРИЛОЖЕНИЯ	130

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных характеристик, определяющих эффективность процессов обработки металлов давлением (ОМД), является стойкость инструментальной оснастки, определяющая эксплуатационный ресурс ее рабочей поверхности и, как следствие, качество готовой продукции. Процессы обработки металлов давлением характеризуются реализацией «жестких» схем напряженно-деформированного состояния (НДС), наличием ударного воздействия на инструмент и знакопеременных нагрузок, высоким уровнем изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента, что обуславливает необходимость увеличения эксплуатационного ресурса рабочих деталей штампового инструмента, работающего на сдвиг и удар.

Степень разработанности темы исследования. Проблемам повышения стойкости штампового инструмента посвящены работы/труды таких авторов, как Моисеев В.Ф., Фукс-Рабинович Г.С., Досбаева Г.К., Я.Д. Коган, Степанкин И.Н., Поздняков Е.П., Жостик Ю.В., Левашов Е.А., Штанский Д.В., Корнеев Ф.В., Петржик М.И., Черкасова Н.И., Шеин А.А., Антоненкова Г.В., Сотова Е.С., Тарасов С.Ю., А. Хасуи, О. Моригаки, Хмара С.М., Марков А.Г., Герасименко К.С., Кисурина Н.А., Кравцова Е.А., Карачун А., Бартенев Д.В., Павлов И.В., Горячева И.Г., Торская Е.В. Солдатенков И.А., Чой К.Й.

Разработанные в представленных выше работах способы повышения стойкости инструмента за счет поверхностного легирования, термического и пластического упрочнения рабочей поверхности, применения износостойких материалов, сложны и не всегда обеспечивают заданный уровень свойств, зачастую требуют использования дорогостоящих материалов и специализированного оборудования.

Эффективным способом повышения стойкости инструментальной оснастки является применение износостойких покрытий (Табаков В.П., Григорьев С.Н., Верещака А.А., Г.Н. Дубинин), полученных физическим методом ионно-плазменного напыления. Однако в настоящее время данная технология нашла широкое приложение лишь в процессах обработки резанием и недостаточно

используется при обработке металлов давлением, что существенно ограничивает технологические характеристики процессов обработки металлов давлением, в частности, листовой штамповки.

В представленных выше работах отсутствуют полноценные результаты изучения и комплексного анализа механизмов изнашивания и разрушения износостойких покрытий штампового инструмента, не представлены методики и результаты математического моделирования образования дефектных зон поверхностного слоя инструмента листовой штамповки с износостойким покрытием, а также системные данные о деформационных характеристиках поверхностного слоя инструмента с покрытиями. Несмотря на многочисленное количество работ, в том числе и зарубежных авторов (К.-D. Bouzakis, N.Michailidis, N. Lontos, A. Siganos, S.Hadjiyiannis, G. Giannopoulos, G. Maliaris, T. Leyendecker, G. Erkens, B.D. Beake, S.C. Veldhuis, S.R. Goodes), посвященных изучению оценки факторов износа рабочей поверхности инструмента с использованием математического моделирования, данные вопросы еще недостаточно изучены и не имеют достаточного прикладного уровня применительно к инструменту листовой штамповки, работающему на сдвиг и удар. Однако в трудах этих ученых отсутствуют результаты комплексного анализа и изучения механизма изнашивания и разрушения покрытий штампового инструмента, способы оценки факторов, влияющих на износ рабочей поверхности штампового инструмента с использованием математического моделирования, не представлены методики и результаты математического моделирования образования дефектных зон поверхностного слоя штампового инструмента с износостойким покрытием, отсутствуют системные данные о деформационных характеристиках поверхностного слоя инструмента с покрытиями.

Таким образом, **актуальность** темы исследования в рамках заявленной проблемы определена необходимостью повышения эксплуатационной стойкости штампового инструмента листовой штамповки на основе разработки корректных моделей изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента с применением износостойких покрытий.

Цель работы: повышение стойкости рабочих поверхностей штампов на операциях листовой штамповки на основе применения износостойких покрытий.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи:**

1. Проведен анализ причин изнашивания и разрушения штампового инструмента в условиях ударных и сдвиговых нагрузок.

2. Разработаны математические модели разрушения износостойких покрытий и изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента с износостойкими покрытиями при реализации сдвиговых и ударных деформационных нагрузок.

3. Проведено численное моделирование процессов изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента с износостойкими покрытиями на операциях «вырубка» и «вытяжка с принудительным утонением» с использованием программной среды LS-Dyna.

4. В программной среде LS-Dyna проведен анализ влияния межинструментального зазора (на операции «вырубка») на НДС, износ и разрушение в рабочей зоне деформации в зависимости от механических свойств обрабатываемого материала.

5. Экспериментально исследовано влияние состава износостойких покрытий и технологических режимов процесса деформирования на износ штампового инструмента.

6. Разработаны технологические рекомендации по применению и эксплуатации штампового инструмента с износостойкими покрытиями, нанесенным методом ионно-плазменного напыления.

7. Экспериментально показана высокая эффективность штампового инструмента с износостойкими покрытиями в условиях действующего производства.

Объектом исследования является технологические процессы листовой штамповки, при которых инструмент работает на удар и сдвиг.

Предметом исследования являются процессы изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента и разрушения износостойких покрытий,

закономерности связи влияния состава износостойких покрытий и технологических режимов процесса деформирования с НДС штампового инструмента и характером изнашивания его рабочих поверхностей на операциях «вытяжка с принудительным утонением» и «вырубка».

Методы исследования. Исследования процессов изнашивания рабочей поверхности штампового инструмента с износостойкими покрытиями производились на основе положений теории пластичности и теории хрупкого разрушения с использованием 3D-моделирования в системах автоматизированного проектирования КОМПАС и LS-Dyna. Обработку данных, полученных в ходе численного моделирования и эксперимента, производили с использованием метода планирования эксперимента. Статистическая обработка полученных результатов выполнялась с использованием математического аппарата программных комплексов Excel и Statgraphics. Экспериментальные исследования производили в производственных условиях АО «Ульяновский патронный завод» и АО «Ульяновский НИАТ» с использованием специализированного технологического оборудования и стандартных и специализированных измерительных приборов: роторная линия модели ЛГ-207, кривошипный пресс КД2128, микротвердомер MicroWizhard HM-200 Series, микрометры МК-50 и МК-25, растровый оптический микроскоп Olympus GX-41, универсальная испытательная машина УМ-50 и др.

Достоверность полученных результатов подтверждена корректным совпадением теоретических зависимостей с результатами экспериментов, проведенных соискателем, а также с опубликованными результатами экспериментов других авторов. Методики построения математических моделей базируются на положениях математической теории пластичности.

При выполнении работ использовали ресурсы и оборудование ФГБОУ ВО Ульяновский государственный технический университет, АО «Ульяновский патронный завод», АО «Ульяновский НИАТ».

Основные положения, выносимые на защиту:

- математические модели образования трещин в износостойких покрытиях и изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента, работающего на

удар и сдвиг, учитывающие особенности разрушения хрупкого материала износостойких покрытий и формирования зон разрушения;

- результаты численного моделирования процессов изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента с износостойкими покрытиями на операциях «вырубка» и «вытяжка с принудительным утонением»;

- результаты исследования закономерностей связи процессов изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента и разрушения износостойких покрытий с их составом, схемой НДС и технологическими режимами листовой штамповки;

- регрессионные зависимости оценки влияния технологических режимов листовой штамповки на НДС, износ и разрушение в рабочей зоне инструмента, работающего на срез и удар;

- результаты экспериментальных испытаний, свидетельствующие об эффективности использования износостойких покрытий на основе нитрида титана с целью повышения работоспособности и стойкости рабочих деталей штампового инструмента листовой штамповки;

- технологические рекомендации по применению штампового инструмента с износостойкими покрытиями на формоизменяющих и разделительных операциях листовой штамповки.

Научную новизну имеют следующие разработки:

- математические модели образования трещин в износостойких покрытиях и изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента, учитывающие особенности разрушения хрупкого материала износостойких покрытий и формирования зон разрушения в условиях ударных и сдвиговых нагрузок;

- результаты численного моделирования процессов изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента с износостойкими покрытиями на операциях «вырубка» и «вытяжка с принудительным утонением»;

- закономерности связи процессов изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента и разрушения износостойких покрытий с их составом, схемой НДС и технологическими режимами листовой штамповки;

- регрессионные зависимости оценки влияния технологических режимов листовой штамповки на НДС, износ и разрушение рабочих кромок в зоне деформации при вырубке.

Практическую ценность имеют следующие разработки:

- технологические рекомендации по составу износостойких покрытий штампового инструмента операций «вырубка» и «вытяжка с принудительным утонением»;

- технологические режимы нанесения износостойких покрытий на рабочий инструмент операций «вырубка» и «вытяжка с принудительным утонением».

Опытно-промышленные испытания, выполненные в производственных условиях АО «Ульяновский патронный завод», а также АО «Ульяновский НИАТ» подтвердили высокую эффективность штампового инструмента с износостойким покрытием.

Технологические рекомендации по нанесению износостойких покрытий и применению штампового инструмента с износостойким покрытием переданы для использования на АО «Ульяновский НИАТ» (г. Ульяновск) и АО «Ульяновский патронный завод» (г. Ульяновск). Результаты исследований использованы в учебном процессе подготовки бакалавров по направлению 15.03.01 Машиностроение (профили «Машины и технология обработки металлов давлением» и «Системы пластического формоизменения в цифровом производстве»).

Соответствие диссертации научной специальности. Работа соответствует п.6 направлений исследований «Методы оценки напряженного и деформированного состояния и способы увеличения жесткости, прочности и стойкости деформирующего инструмента» паспорта научной специальности 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением.

Личный вклад автора. Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой обобщены результаты исследований, полученных лично автором и в соавторстве. Автору принадлежит основная роль в разработке математических моделей, проведении численного моделирования и

экспериментальных исследований, в анализе результатов исследований и формулировании выводов.

Апробация работы. Основные положения и материалы работы были доложены и обсуждены на 6 международных научно-технических и научно-практических конференциях, а также на научных семинарах кафедр «Инновационные технологии в машиностроении», «Материаловедение и обработка металлов давлением» ФГБОУ ВО Ульяновский государственный технический университет.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 23 статьи, в том числе 8 статей в изданиях из перечня ВАК, 1 статья в издании из базы цитирования Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (100 наименований) и четырех приложений (5 страниц), включает 137 страниц машинописного текста, 71 рисунок и 15 таблиц.

Автор выражает благодарность доктору технических наук, профессору Кокорину Валерию Николаевичу, заведующему кафедрой «Материаловедение и обработка металлов давлением» ФГБОУ ВО УлГТУ, за значимые замечания и советы при проведении исследований.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ И РАБОТОСПОСОБНОСТИ РАБОЧИХ ДЕТАЛЕЙ ШТАМПОВ И КАЧЕСТВА ПОЛУЧАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ

1.1. Характеристика схем напряженно-деформированного состояния и механических схем нагружения инструмента листовой штамповки при реализации сдвига и среза

Холодная листовая штамповка представляет собой сложный процесс, заключающийся в разделении и/или формообразовании листового материала в условиях ударных и сдвиговых деформационных нагрузок.

Одними из факторов, влияющих на износ рабочей поверхности штамповой оснастки, являются вид НДС инструмента в зоне деформации, схема механического нагружения и знак напряжений в очаге силового воздействия. Рабочие поверхности штампового инструмента (пуансоны и матрицы) эксплуатируются в тяжелых условиях: ударные и знакопеременные нагрузки, высокие значения коэффициентов трения при формоизменяющих и разделительных операциях обработки металлов давлением, реализация «жестких» схем НДС, характеризующихся высоким значением контактных и нормальных напряжений. Это в совокупности обуславливает существенное снижение эксплуатационного ресурса рабочих деталей инструмента за счет образования трещин и повышенного износа рабочих поверхностей инструментальной оснастки, работающих на сдвиг и удар.

Особенностью процессов обработки металлов давлением является различие схем НДС в материале деформируемой заготовки. Непосредственно под режущей кромкой пуансона создается напряженное состояние объемного сжатия, а над режущей кромкой матрицы - напряженное состояние радиального растяжения. Первое более благоприятно для пластического течения металла, а второе - менее благоприятно и способствует возникновению микротрещин на поверхности инструмента в зоне деформирования, что приводит к его разрушению и износу. В

центральной части заготовки при этом схема напряженного состояния плоская и отсутствуют осевые сжимающие напряжения.

На рисунке 1.1 представлена схема процесса вырубki, на рисунке 1.2 – схема НДС в процессе вырубki.

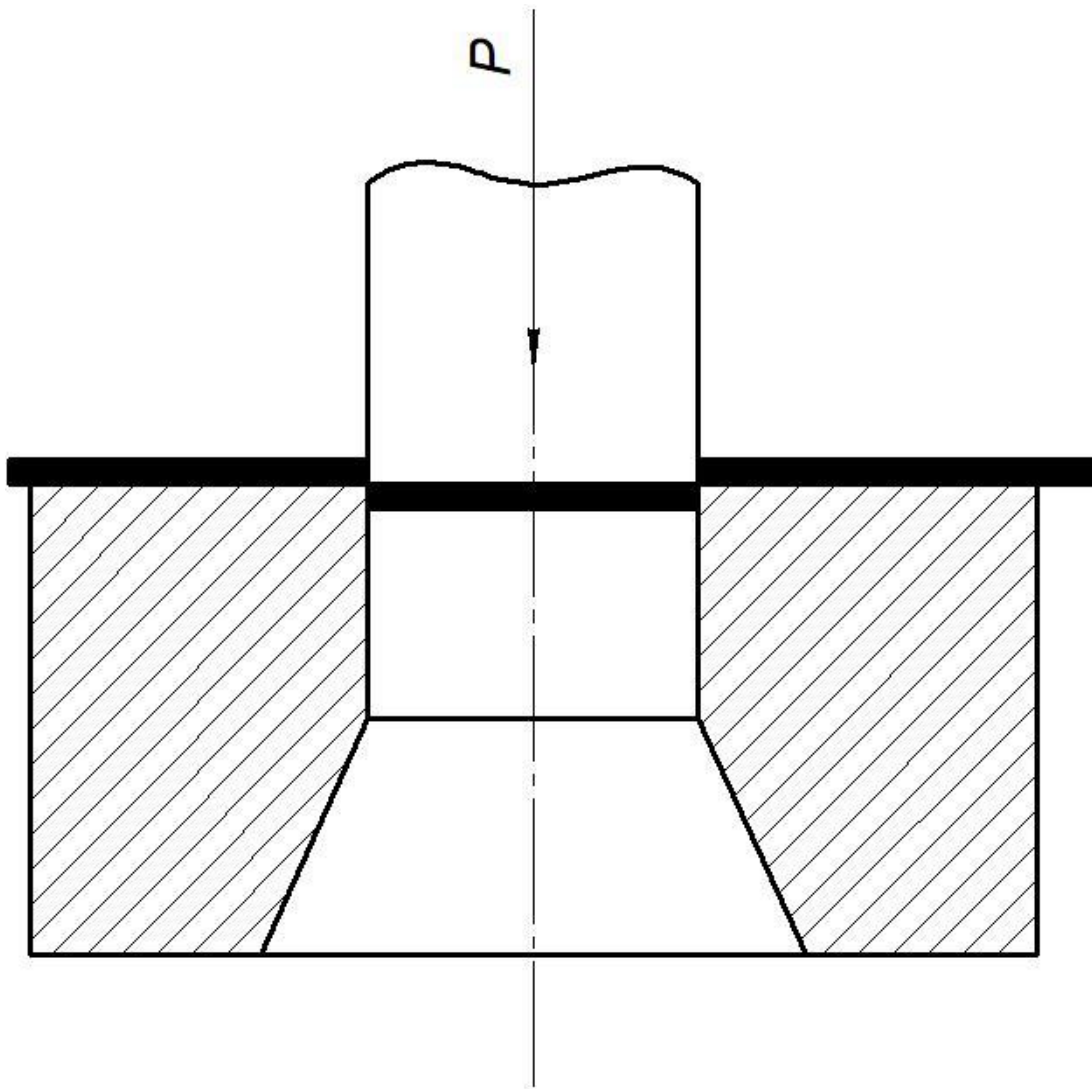


Рисунок 1.1 - Схема процесса вырубki

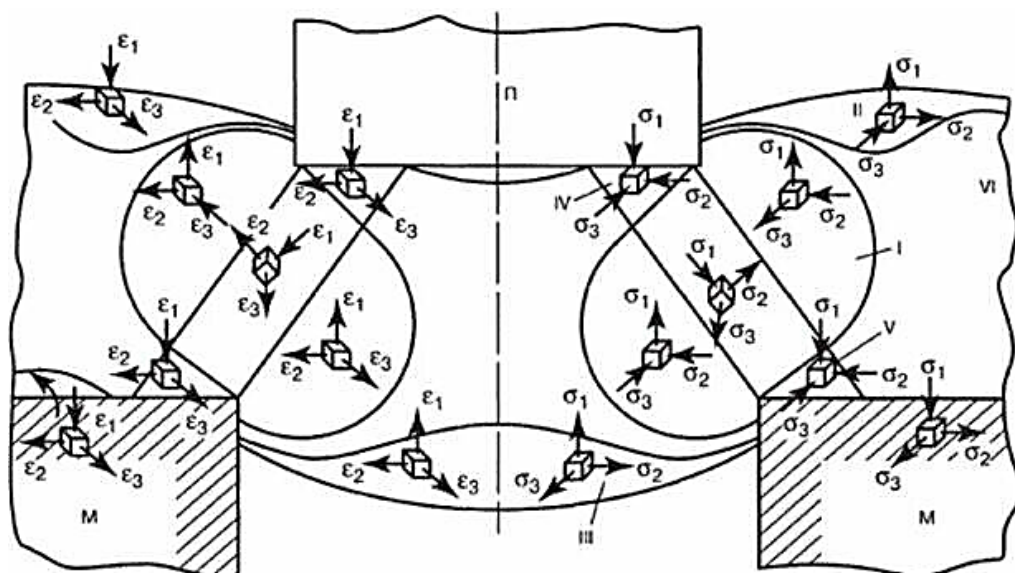


Рисунок 1.2 - Схема НДС в рабочей зоне деформации [1] в процессе вырубki

На рисунке 1.2 представлена схема НДС в рабочей зоне деформации в процессе вырубki, определяющая качество поверхности среза и величину контактных напряжений на поверхности инструмента, характеризующаяся значительным уровнем растягивающих напряжений в зоне I (*участок разделения*).

При разделительных операциях листовой штамповки образуется поверхность среза, которая по качеству в большинстве случаев имеет удовлетворительную точность (отсутствие заусенцев и сколов). Определяющую роль при обеспечении высокого качества поверхности детали играет стойкость рабочих поверхностей штампового инструмента, обеспечивающая целостность режущей кромки рабочего инструмента.

Использование технологических схем (см. рисунок 1.3), деформационным механизмом которых является сдвиг (вытяжка с принудительным утонением), реализующих высокие значения контактных напряжений и сил трения, накладывает особые требования к обеспечению износостойкости и ресурсоемкости рабочих поверхностей деталей штампов, работающих в условиях удара и сдвига.

На рисунке 1.4. представлена схема НДС в рабочей зоне деформации в процессе вытяжки с принудительным утонением, характеризующаяся

интенсивными сдвиговыми деформациями (утонение металла в зонах III и IV), при наличии которых наблюдается значительный рост контактных напряжений, обуславливающий повышенный износ рабочей поверхности штампового инструмента.

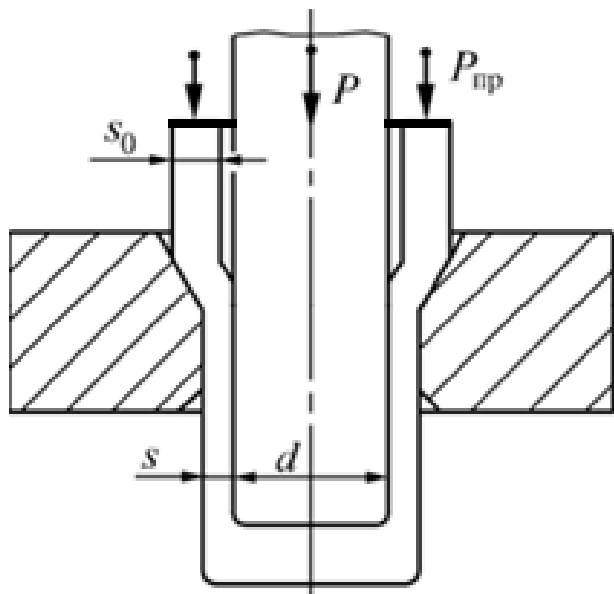


Рисунок 1.3 - Схема процесса вытяжки с утонением

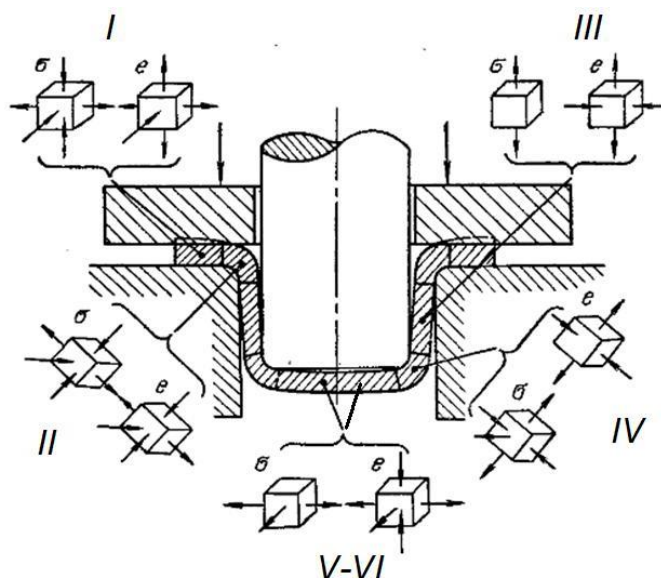


Рисунок 1.4 - Схема НДС в процессе вытяжки с утонением [2]

1.2. Эксплуатационная стойкость штампов листовой штамповки

В процессах деформирования при получении плоских или пространственно ориентированных деталей одним из параметров эффективности процессов формоизменения является стойкость инструментальной оснастки, определяющая ее износостойкость и ресурс рабочей поверхности.

Качество получаемой продукции в листовой штамповке прежде всего зависит от состояния рабочей поверхности штамповой оснастки. Дефекты изготовления штампов, погрешности установки и наладки их на прессе, изношенность или неисправность штамповой оснастки являются одними из основных причин появления брака при листовой штамповке. Однако значительная

часть брака в листовой штамповке образуется именно по причине повышенного износа инструмента.

Большое влияние на деформацию металла и энергосиловые параметры оказывает выбор межинструментального зазора Z_{opt} . При оптимальном зазоре поверхности сдвига и трещины со стороны пуансона совпадают с соответствующими трещинами со стороны матрицы [1,2]. При малом зазоре и большой толщине металла от несовпадения трещин образуется кольцевая перемычка, которая перерезается с возникновением новых скалывающих трещин, и на детали образуется надрыв и двойной срез с протянутым заусенцем. В случае очень большого зазора на поверхности образуются рваные заусенцы от затягивания и обрыва металла в зазоре. При этом повышается интенсивность износа рабочей поверхности пуансонов и матриц.

Неточность изготовления рабочих деталей штампа обычно сказывается на неравномерности зазора между пуансоном и матрицей или в отклонении этого зазора от нормальной величины. Неравномерность зазора между пуансоном и матрицей при разделительных операциях весьма вредно влияет не только на точность и качество штампуемых деталей, но и на стойкость штампов.

При неравномерном зазоре давление распределяется различно по периметру отделяемого контура, что вызывает перекося верхней половины штампа относительно нижней. Неравномерность деформации, а также неверно назначенный межинструментальный зазор приводят к изменению схемы напряжений и к концентрации растягивающих напряжений в характерных зонах деформирующего инструмента и, как следствие, неравномерности износа его рабочей поверхности. В результате возможно «зарубание» и выкрашивание режущих кромок штампа.

При операции «вырубка» в штампах с неравномерным зазором между пуансоном и матрицей наблюдается интенсивное образование заусенцев. При этом, неравномерность зазора между пуансоном и матрицей ведет к разрушению, утонению в углах, морщинам и «ушам» на изделиях при вытяжке.

Некачественная сборка штампов зачастую заключается в плохой центровке пуансона относительно матрицы, недостаточной доводке инструмента. Неправильно установленные направляющие, фиксаторы, прижимы и съёмники также могут вызывать появление повышенного износа либо поломки рабочего инструмента.

Рабочие поверхности штампов листовой штамповки подвергаются термической обработке – закалке и последующему отпуску – с целью повышения твердости. При этом может быть получена неоднородность структуры поверхностного слоя, неоднородность остаточных напряжений в случае неправильно выполненного отпуска, что является причиной поломки пуансонов, выкрашивания рабочих кромок штампов вследствие повышения хрупкости материала.

При разделительных операциях листовой штамповки вследствие износа затупляются рабочие кромки инструмента и увеличивается зазор между пуансонами и матрицами.

В случае сложной вытяжки с принудительным утонением или вытяжки деталей коробчатой формы повышенный износ наблюдается в местах затрудненной деформации, например, в углах. По мере износа вытяжных матриц, а особенно при вытяжке с принудительным утонением, увеличивается шероховатость их поверхности со следами налипания частиц деформируемого металла. Это приводит к ухудшению качества поверхности штампуемых изделий, а также снижению эксплуатационной стойкости штампов [1].

При износе рабочие поверхности штампового инструмента выходят из строя в результате ряда разнородных процессов, из которых основными являются следующие: мелкое трещинообразование, связанное с микро- и макроскопическими разрывами металла, т.н. разгар; истирание, за счет отрыва частичек металла рабочего инструмента штампа; смятие, вызванное местной пластической деформацией штампа; разрушение (макротрещины).

Различные процессы износа штампов взаимно дополняют и ускоряют друг друга, из-за чего износ штампов происходит весьма неравномерно. Потеря ресурса

рабочих поверхностей инструмента, эксплуатирующегося в условиях повышенных значений деформаций, определяется дефектами на поверхности рабочего инструмента (рисунок 1.5). Основными видами дефектов, определяющих эксплуатационную работоспособность рабочего инструмента листовой штамповки, являются износ, разрушение и смятие.

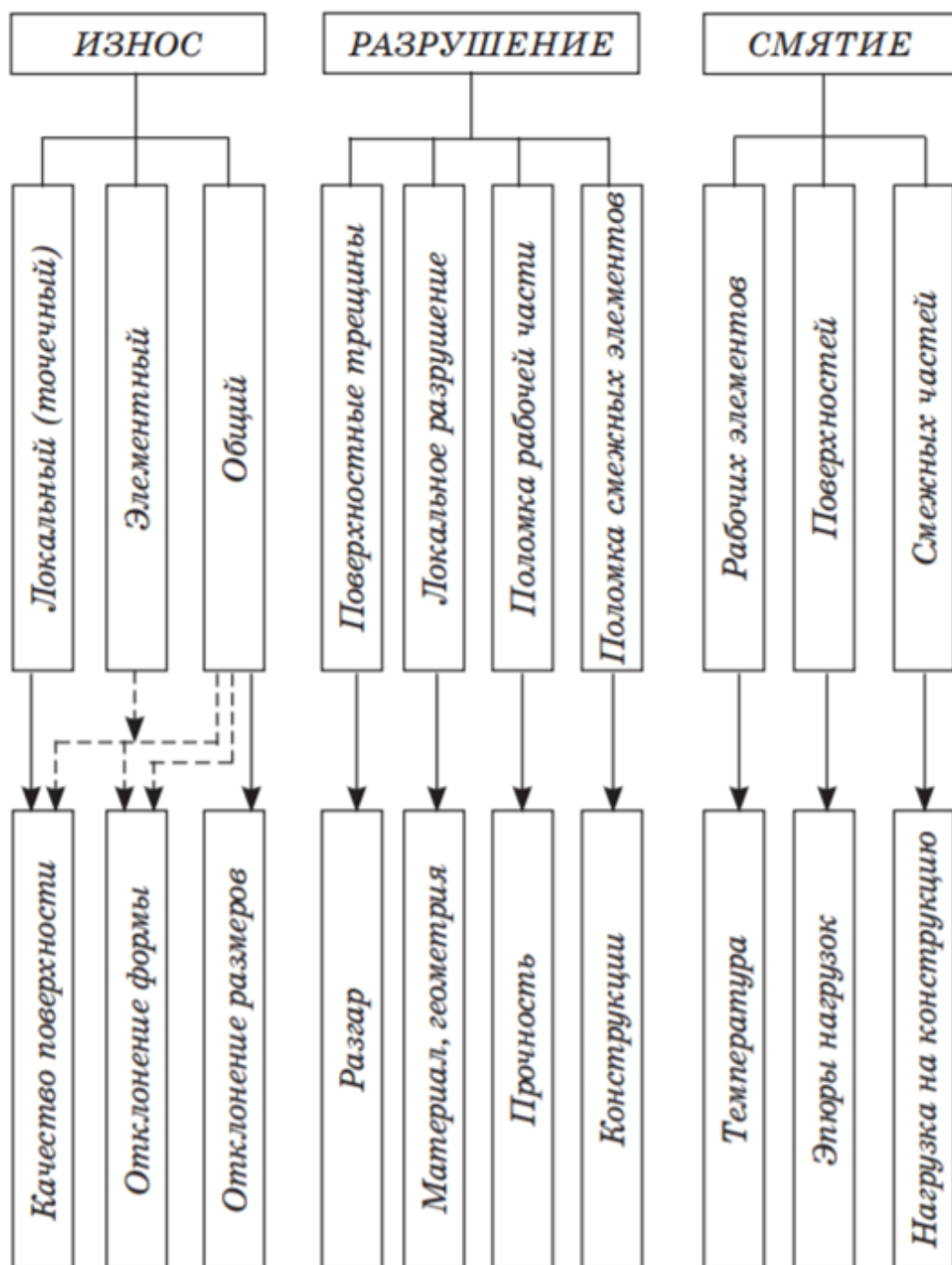


Рисунок 1.5 - Причины выхода из строя рабочей поверхности штамповой оснастки

Долговечность штампов измеряется количеством деталей, отштампованных до полного износа рабочих частей, определяемого невозможностью их восстановления и получением размерного брака штампованных деталей.

Однако значительно раньше размерного брака возникают дефекты, снижающие качество штампуемых деталей, в частности заусенцы при вырубке и пробивке, задиры, риски и царапины при вытяжке с принудительным утонением. Эти виды брака устраняются путём перешлифовки вырубных и пробивных штампов или зачистки образовавшихся наростов металла на поверхности вытяжных и гибочных штампов.

Стойкость штампов зависит от следующих факторов: химического состава и механических свойств штампуемого материала, конфигурации и геометрии детали, относительной толщины материала, конструкции штампа и типа производимой операции, величины зазора, термообработки рабочих деталей штампа, эксплуатационного состояния прессы, способа и вида смазки, схемы напряженного и деформированного состояния.

В последнее время выполнен ряд исследований по стойкости рабочих частей штампов, которыми установлена зависимость стойкости пробивных универсально-сборных штампов от основных факторов износа. Математическая обработка результатов исследования позволила получить расчетную формулу [2] для определения стойкости пробивных штампов до перешлифовки:

$$N_c = \frac{16000}{\sqrt[3]{S^2 \sigma_B \sqrt{\sigma_B}}} \text{ тыс. шт.}, \quad (1.1)$$

где S – толщина материала, мм, σ_B - предел прочности, кгс/мм².

Ориентировочная плановая стойкость рабочих частей штампов до полного износа представлена в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Ориентировочная плановая стойкость рабочих частей штампов [2]

Тип штампа	Толщина материала, мм	Стойкость (в тыс. ударов) в зависимости от материала рабочих частей	
		Углеродистая сталь	Легированная сталь
Вырубной	До 0,5	800-1000	1100-1400
	1,0	600-800	800-1100
	2,0	450-600	600-850
	3,0	350-500	500-700
	5,0	300-400	400-600
Пробивной	$S/d=0,3\div 0,5$	120-200	300-400
	$S/d=0,5\div 0,7$	70-120	200-300
	$S/d=0,8\div 1,0$	40-80	150-200
Гибочный простой	До 3	1000-1200	1400-1700
Сложный	≥ 3	600-700	800-1000
Вытяжной простой	≥ 3	1200-1600	1800-2400
Формовочный	≥ 3	400-500	600-800

На стойкость штамповой оснастки влияют:

- конструкция штампа (конструкция узлов, геометрия рабочей поверхности, центрирование поверхностей, материалы деталей штампа);
- технология изготовления (вид, схема и оборудование механической обработки);
- технологический процесс штамповки (энергосиловые параметры и деформационные режимы);
- эксплуатационные режимы штампа (жесткость системы, тепловые режимы, качество наладки, диаграмма нагружения и разгрузки).

На рисунке 1.6 представлен граф целей и задач системы обеспечения стойкости оснастки.

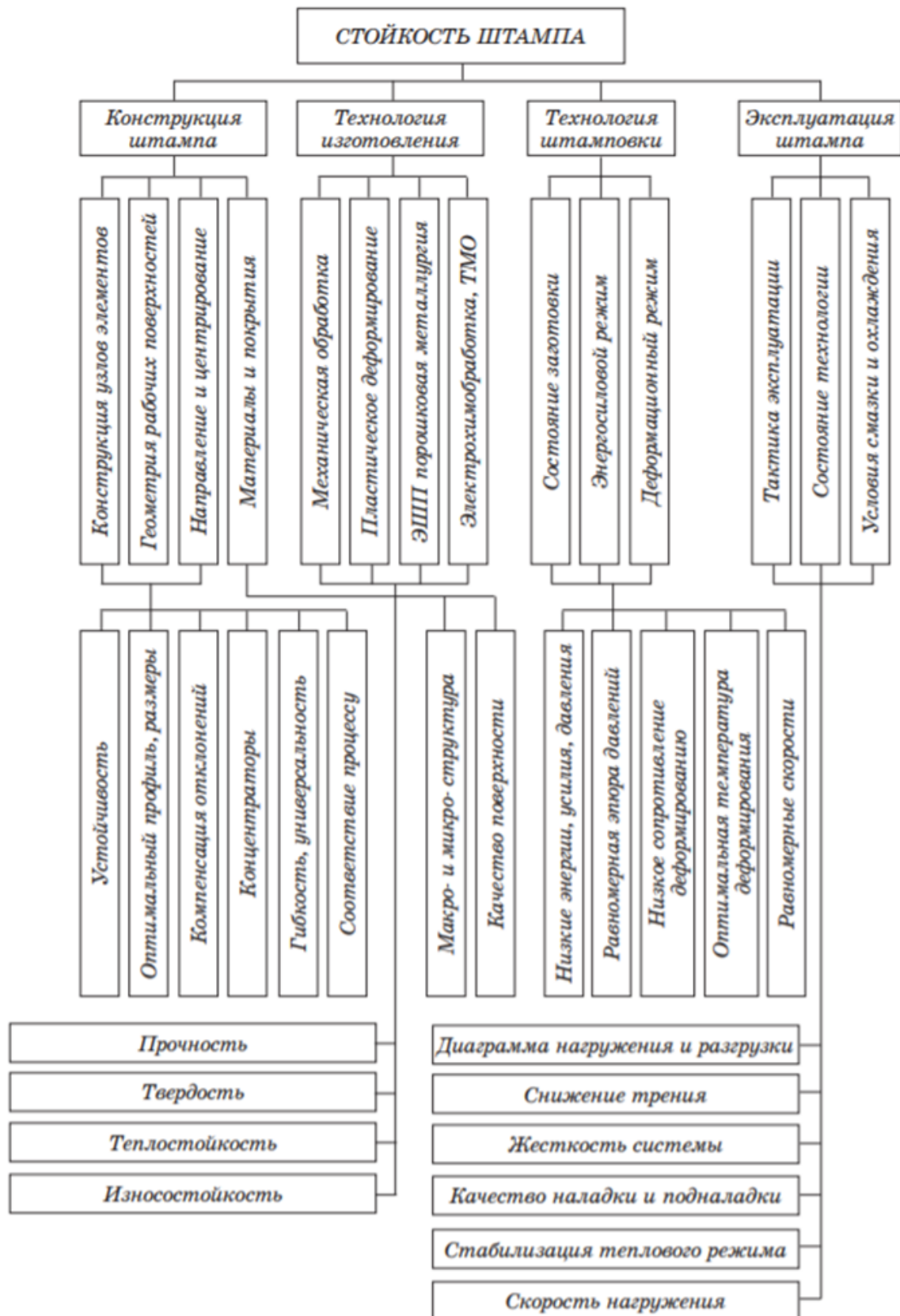


Рисунок 1.6 - Граф целей и задач системы обеспечения стойкости оснастки

1.3. Методы повышения стойкости штампового инструмента

В настоящее время существует значительное количество технологических приемов, конструктивных решений и профилактических мероприятий по повышению стойкости штамповой оснастки обработки давлением. При этом, согласно данным научно-технической литературы, наиболее перспективным по повышению эксплуатационного ресурса являются методы, направленные на упрочнение рабочих поверхностей инструмента [2,3].

Рассмотрим основные методы повышения стойкости штамповой оснастки за счет изменения физико-механических свойств поверхностного слоя рабочих деталей инструментальной оснастки листовой штамповки.

Основные методы повышения износостойкости рабочих деталей штампов можно разделить на шесть основных классов упрочнения [3]: с образованием защитной пленки на поверхности инструмента; с изменением химического состава поверхностного слоя инструмента; с изменением структуры поверхностного слоя инструмента; с изменением энергетического запаса поверхностного слоя инструмента; с изменением шероховатости поверхностного слоя инструмента; с изменением структур по всему объему инструментального материала.

Первый класс – методы с образованием пленки на поверхности (химические методы) нашел достаточно широкое применение в практике [4,5]. К недостаткам данных методов можно отнести достаточно длительное воздействие высокой температуры на обрабатываемый материал инструмента, контакт с кислородом (окислительные реакции), которые вызывают возникновение большой зоны термического влияния и провоцируют возможные процессы обезуглероживания. Так же в процессе эксплуатации возможно отслоение защитного покрытия или выкрашивание рабочих кромок инструмента из-за высокой поверхностной твердости. Кроме этого, как правило, для осуществления этих методов требуется сложная дорогостоящая аппаратура и высокая станкостоемость процесса, что часто ограничивает процесс упрочнения металла этими методами и увеличивает стоимость технологического процесса.

Ко второму классу – методы с изменением химического состава поверхностного слоя – относят методы диффузионного насыщения. Как правило, такое насыщение проводят методами химико-термической обработки, которые не требуют сложного дорогостоящего оборудования и достаточно просты в применении. Кроме этого, химико-термическая обработка позволяет в ряде случаев получить комплекс свойств, необходимых для повышения срока службы инструмента в конкретных условиях эксплуатации. К методу диффузионного насыщения относят процессы химико-термической обработки: нитроокисление, азотирование, хромирование, цементация, цианирование, борирование [6] и т.д. Но, недостатком способов прежде всего является разрушение поверхностного слоя в местах резкого изменения контура рабочих кромок инструмента и низкое сопротивление ударным нагрузкам, в связи с чем целесообразность применения данного способа для изготовления штампов повышенной стойкости требует оценки в каждом конкретном случае.

Третий класс упрочнения (с изменением структуры поверхностного слоя), к которому относится газопламенная наплавка, позволяет создавать на поверхности металла тонкие слои повышенной прочности. После этих процессов не нужно применять окончательную механическую обработку, что даёт возможность довольствоваться слоями небольшой толщины. Недостатком такого способа также является использование дорогостоящей аппаратуры и высокая станко- и материалоемкость.

К четвертому классу (с изменением энергетического запаса поверхностного слоя) относятся методы обработки в магнитном поле – электроферромагнитная обработка, обработка в импульсном магнитном поле [7] и т.д. Данные методы можно применять как для повышения стойкости режущего инструмента – резцов, сверл, плашек, так и для матриц и пуансонов штампов холодной листовой штамповки. Данный метод характеризуется высокой станко- и материалоемкостью и требует наличия высококвалифицированного персонала. Погрешности же при расчетах режимов обработки приводят к нестабильности свойств упрочненного поверхностного слоя рабочего инструмента.

Пятый класс (с изменением шероховатости поверхностного слоя) применяется в основном для режущего инструмента [8]: резцы, сверла, метчики, плашки и т.д. Остаточные напряжения сжатия, сформированные в режущем инструменте, способствуют снижению износа инструмента. Однако при этом имеется вероятность образования шлифовочных трещин на поверхности инструмента, что также является серьезным недостатком.

К шестому классу (с изменением структур по всему объему металла) относится термическая обработка. Термообработка при $T > T_{\text{рекр}}$ изменяет физико-механические характеристики по всему сечению рабочего инструмента, что не всегда приемлемо, особенно при сложных схемах нагружения.

Из выше представленной классификации можно выделить четыре приоритетных группы способов повышения стойкости инструмента, нашедших наибольшее применение в современной промышленности: поверхностное легирование; термическое упрочнение; применение износостойких материалов; применение износостойких покрытий.

Азотирование, хромирование, нитроцементация и др. способы поверхностного легирования [9,10] имеют следующие преимущества: предохраняют от налипания частиц штампуемого материала на поверхности матриц и пуансонов; повышают стойкость штампового инструмента на 25-40 %.

Недостатками этих способов являются: невозможность повторного упрочнения обработанной поверхности (переточки); низкая экологичность и безопасность производства.

Газоплазменное напыление или плазменно-дуговая наплавка [11-26], в свою очередь повышают стойкость штампового инструмента на 20-50 %;

Недостатками данного способа являются: низкая производительность изготовления инструмента; низкая экологичность и безопасность производства; высокие экономические затраты и ресурсоемкость.

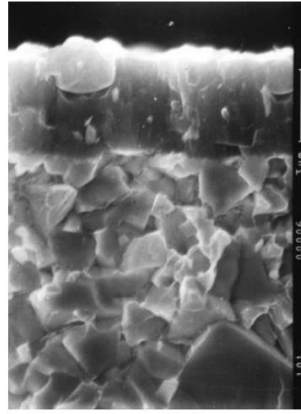
Изготовление рабочих деталей штампов и вставок из износостойких материалов – металлокерамических твердых сплавов [27-29] – позволяет повысить стойкость штампового инструмента в 10-15 раз до перешлифовки.

Недостатками этого способа являются высокая стоимость инструментальных материалов из металлокерамических твердых сплавов и сложность изготовления инструментальной оснастки.

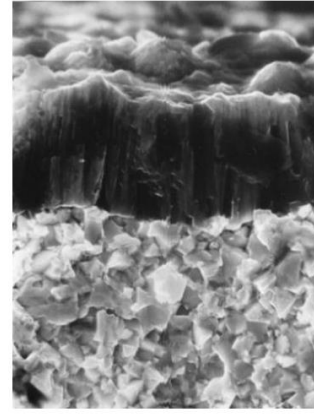
Были рассмотрены методы повышения стойкости инструмента за счет нанесения защитных покрытий [30-40]. Среди различных методов наибольшее применение получили методы физического осаждения покрытий и в частности метод КИБ (метод конденсации покрытий с ионной бомбардировкой) [30-32].

Разработанные в 70-80 годы XX века методология, оборудование, процессы и технологии формирования покрытий различного состава и функционального назначения позволило освоить производство различных режущих инструментов с износостойкими покрытиями. Данные инструменты нашли самое широкое применение в металлообрабатывающих производствах и позволили решить широкую гамму технологических задач по повышению производительности обработки, износостойкости и надежности инструмента, получению высоких точностных характеристик обработанных деталей [31-36]. Дальнейшее повышение эффективности за счет использования инструментов с покрытиями требует непрерывного улучшения эксплуатационных свойств покрытий за счет поиска новых составов и архитектуры покрытий и методик их разработки. Больше предпочтение в последние годы отдается использованию многослойных покрытий, каждый из слоев которых имеет свое функциональное назначение [37-41].

Метод ионно-плазменного осаждения позволяет получать различные одно- и многослойные покрытия (см. рисунок 1.7), обладающие повышенными физико-механическими характеристиками. Технология осаждения покрытий позволяет добиваться формирования сжимающих остаточных напряжений в материале покрытия, что приводит к повышению прочности и твердости, улучшению адгезии системы «подложка-покрытие».



а)



б)

Рисунок 1.7 - Структура покрытия, полученного методом КИБ:
а - капельная фаза в покрытии, б - капельная фаза на поверхности
покрытия

Технология КИБ позволяет формировать износостойкие покрытия толщиной от 1-2 до 30-50 мкм, позволяющие повысить механические характеристики рабочей поверхности инструмента и при этом не приводит к изменению геометрии поверхностного слоя и не накладывает требования к ужесточению допусков. При этом стоит отметить, что для технологий обработки резанием получено значительное количество экспериментальных данных, показывающих, что наибольшие значения предела прочности (1500-1600 МПа) и наилучшая адгезия соответствуют покрытиям с толщиной в диапазонах от 3 до 15 мкм.

Технология КИБ в настоящий момент получила наиболее распространение в области механической обработки материалов резанием и применяется в основном для повышения стойкости режущего инструмента. Сведения о широком применении износостойких покрытий инструменте операций обработки металлов давлением практически отсутствуют. Их использование с целью упрочнения штампового инструмента в основном ограничено узким ассортиментом материалов и архитектуры покрытий [37].

На основе проведенного анализа была произведена оценка эффективности способов повышения стойкости инструментальной оснастки (см. рисунок 1.8) по основным критериям, характеризующим износ штамповой оснастки – стойкость штампового инструмента, стоимость его изготовления, твердость и шероховатость поверхностного слоя.

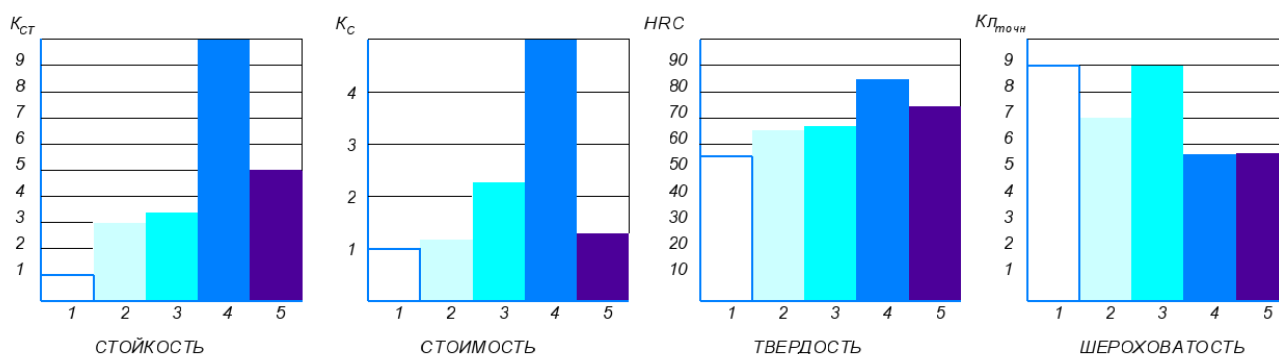


Рисунок 1.8 - Сравнительный анализ эффективности способов повышения стойкости инструментальной оснастки:

1 – без упрочнения; 2 – поверхностное легирование; 3 – термическое упрочнение; 4 – износостойкие материалы; 5 – износостойкие покрытия

Установлено, что наибольшую величину стойкость (до 10-15 раз до переточки по сравнению с неупрочнённым инструментом) и твердость обеспечивает использование износостойких материалов (керамические твердые сплавы), однако их применение сопряжено с высокой стоимостью, энерго- и станкоемкостью процессов изготовления инструмента.

Использование износостойких покрытий, нанесенных методом ионно-плазменного напыления, позволяет получить инструментальную оснастку с минимальной шероховатостью. Твердость и стойкость инструмента, упрочненного данным методом, существенно превышает твердость и стойкость инструментальной оснастки, упрочненной другими методами при минимальном увеличении стоимости изготовления. Этот способ упрочнения позволяет получить твердые, износостойкие поверхностные слои на рабочих деталях штампа, тем

самым обеспечивая высокую износостойкость и твердость поверхности инструмента, высокую производительность, уменьшение станкоемкости и применим для рабочего инструмента различной конфигурации.

Представленный анализ способов упрочнения поверхностного слоя инструмента позволяет сделать вывод о целесообразности использования для повышения износостойкости и упрочнения пуансонов листовой штамповки в современных условиях способов нанесения различных типов износостойких покрытий. Как было сказано выше, в современной технике и технологии эти методы повышения стойкости инструмента в основном реализованы в технологии повышения стойкости режущего инструмента (резцы, фрезы, сверла и др.) и практически не используются на операциях обработки металлов давлением. По этой причине отсутствует общий методический подход к разработке технологических процессов упрочнения путем нанесения износостойких покрытий поверхностного слоя штампового инструмента, рабочие поверхности которого эксплуатируются в тяжелых условиях при реализации ударных и знакопеременных нагрузок, высоких значений коэффициентов трения при сдвиге и ударе. Данные процессы характеризуются реализацией «жестких» схем НДС, что в совокупности обуславливает существенное снижение эксплуатационного ресурса рабочих деталей инструмента за счет образования трещин и повышенного износа рабочих поверхностей инструментальной оснастки, работающих на сдвиг и удар.

Принимая во внимание некоторое подобие отдельных операций лезвийной обработки и процессов листовой штамповки, реализующих деформацию сдвига и среза, а также высокую эффективность покрытий при обработке резанием, можно прогнозировать их высокую эффективность при реализации сдвиговых и ударных деформаций в процессах листовой штамповки. Это позволяет сделать вывод о необходимости и целесообразности исследований повышения стойкости штампового инструмента, в первую очередь, за счет изучения механизмов износа и разрушения штампового инструмента с покрытием, и разработки методик его рационального проектирования.

Создание высокоэффективного штампового инструмента с износостойкими покрытиями требует анализа процессов, возникающих в покрытиях под воздействием нагрузок в процессах обработки металлов давлением и вызывающих появление дефектов рабочего поверхностного слоя. В работах ученых Çalışkan H., Kurbanoglu S., Panjan P., Ćekada M., Kramar D., Г.С. Фокс-Рабиновича, А.И. Ковалева, М.Н. Агирре, Faga M.G., Gautiel G., Calzavarini R., Vaimpas N., Bourhis E.L., Eve S., Thiaudière D., Hardie C., А.М. Корсинского [42-45] представлена систематизация механизмов изнашивания рабочих элементов разделительных штампов при обработке различных материалов, характерных для листоштамповочного производства. Предложены четыре типовых варианта износостойких покрытий, которые обеспечивают повышение работоспособности рабочих элементов разделительных штампов при различном характере действующих нагрузок и механизмов изнашивания. Приведены экспериментальные данные [44,45] исследований процессов ударного изнашивания разделительных штампов и повышение их стойкости лазерным легированием. Однако, в представленных работах отсутствуют данные о процессах разрушения систем «подложка-покрытие», работающих в условиях ударных и сдвиговых деформаций. В этих работах рассмотрены только методы оценки механических и трибологических свойств функциональных поверхностей перспективных материалов и покрытий в условиях механического контакта при вдавливании, царапании и скольжении индентора, что существенно ограничивает применение результатов данных исследований.

Показано [44,45], что современные методы изучения поверхности позволяют получить ранее недоступные сведения о структурных свойствах, модуле Юнга и твердости, используя чрезвычайно малые (наноразмерные) объемы материала для исследования. Отмечено, что важным является использование сертифицированного оборудования, стандартизация измерений, создания стандартных образцов и метрологического комплекса. Следует заметить, что в данных работах представлены результаты лишь экспериментальных исследований, сопряженных с высокими затратами на их проведение и требующих специального

оборудования, что ограничивает универсальность представленных методик проектирования покрытий, а также отсутствуют методики по определению механизмов изнашивания методами математического моделирования.

Анализ результатов исследований отечественных и зарубежных авторов показывает [41,45,46], что износостойкие ионно-плазменные покрытия рабочей поверхности тяжело нагруженного штампового инструмента существенно повышают работоспособность рабочих поверхностей оснастки на операциях обработки металлов давлением. В тоже время, в представленных работах даны лишь общие рекомендации по усовершенствованию технологий нанесения износостойких покрытий. Предложенные режимы упрочняющей обработки рабочих поверхностей штамповой оснастки не могут в полной мере обеспечить существенного повышения работоспособности, поскольку не дают корректного представления о механизмах разрушения и изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента с покрытием, а также учитывают лишь узкую номенклатуру инструментальных материалов. Кроме того, в ряде случаев на операциях обработки металлов давлением (чистовая вырубка, вытяжка с принудительным утонением стенок) реализуются сдвиговые, ударные, в том числе знакопеременные нагрузки, «тяжелые» схемы напряженного и деформированного состояния рабочей зоны, оценка и анализ которых отсутствует в представленных работах. Рекомендации в основном посвящены архитектуре и влиянию материалов покрытий на напряженно-деформационное состояние оснастки и не учитывают механизмы изменения и разрушения структуры поверхностного слоя инструмента под воздействием ударных и сдвиговых нагрузок.

В этой связи возникает задача изучения механизма разрушения покрытий под воздействием ударных и сдвиговых нагрузок при исследовании напряженного и деформированного состояния и разработки методик анализа и расчета процессов изнашивания в рабочей зоне, характеризующейся малыми величинами межинструментальных зазоров, высокими значениями растягивающих напряжений, характерными при сдвиговых и ударных деформационных нагрузках.

В настоящее время одним из основных инструментов для изучения и прогнозирования процессов изнашивания и разрушения покрытий является разработка конечно-элементных математических моделей, позволяющих осуществлять анализ, оценку и выявление механизмов развития напряженного и деформированного состояния в зоне контакта рабочих поверхностей инструмента и материала заготовки. В работах [46-50] рассмотрены вопросы моделирования процесса вдавливания индентора в покрытие, разработана методика расчета кинетики усталостного разрушения двухслойного материала, произведено численное моделирование фрикционного взаимодействия упругих тел с покрытиями. Рассмотрено построение моделей разрушения на основе деформационной модели Винклера [49,50] и заданного элементарного закона изнашивания, а также проведено моделирование фреттинг-коррозионного изнашивания. Однако рекомендации, представленные на основе данных моделей и методик разрушения, не являются универсальными и не могут быть использованы для моделирования процессов изнашивания и разрушения ионно-плазменных покрытий, так как в них используются упрощенные или упругие модели системы «покрытие-подложка», не учитывающие влияния процессов пластического формоизменения.

В работах К.-D. Vouzakis и В.D. Beake [51-60] рассмотрены процессы разрушения образцов различных материалов с покрытием из PVA-покрытия TiAlN. Проведены испытания на удар наноинденторами, представлены теоретически достигнутые результаты испытаний при различных значениях нагрузки, касающиеся зарождения и эволюции процесса разрушения покрытия. Однако в исследованиях использовались лишь ограниченное число схем испытаний материала на твердость с приложением только статической нагрузки. Отсутствуют методики и результаты исследований процессов разрушения и износа покрытия под воздействием деформационных нагрузок, в том числе в условиях удара и сдвига.

Существенным недостатком данных работ является их ограниченность, представленная лишь вопросами прогнозирования потребных технологических

усилий и характера пластического формоизменения. При этом, в перечисленных работах не изучен в полной мере механизм износа и разрушения штампового инструмента с покрытиями, не представлены методики расчета и прогнозирования процессов трещинообразования в износостойких покрытиях в условиях интенсивного деформирования (инструмент работает на сдвиг и удар), отсутствуют математические модели процессов разрушения и износа покрытий тяжело нагруженного штампового инструмента, работающего в условиях ударных и сдвиговых деформационных нагрузок. Отсутствуют результаты исследований выявления рациональных параметров износостойких покрытий на основе моделирования процессов трещинообразования и изнашивания поверхностного слоя штамповой оснастки.

Общим недостатком рассмотренных работ является недостаточное использование методик математического моделирования для оценки процессов изнашивания и разрушения сложных систем в условиях ударных и сдвиговых нагрузок, что существенно сдерживает разработку расчетных моделей, необходимых для эффективного прогнозирования разрушения и износа рабочих поверхностей штампового инструмента при проектировании оснастки листовой штамповки в процессах, реализующих ударные и сдвиговые нагрузки.

1.4. Цель и задачи исследования

По результатам научно-технического анализа сделаны следующие выводы:

1. Большинство методов повышения стойкости штамповой оснастки листовой штамповки сопряжены с высокими экономическими затратами, низкой производительностью, требованиями к наличию специализированного оборудования и инструмента.

2. Эффективным способом повышения стойкости инструментальной оснастки является применение износостойких покрытий методом ионно-плазменного напыления (вакуумно-дугового осаждения), однако данная

технология нашла широкое применение лишь в области обработки резанием и недостаточно используется в процессах обработки металлов давлением.

3. В существующих методиках отсутствуют данные о механизмах разрушения структуры поверхностного слоя инструмента при воздействии ударных и сдвиговых нагрузок; влиянии схем и полей напряженно-деформированного состояния в рабочей зоне при определении параметров износа рабочих поверхностей штамповой оснастки.

4. Существующие исследования износа и разрушения рабочих поверхностей штампового инструмента носят преимущественно экспериментальный характер, что не позволяет корректно прогнозировать характер разрушения и износа рабочей поверхности инструмента.

5. Имеющиеся математические модели износа и разрушения используют лишь упрощенные схемы испытаний материала на твердость с приложением статической нагрузки (воздействие ударных и сдвиговых деформационных нагрузок не учитывается).

6. В существующих методиках моделирования разрушения и износа штампового инструмента не учитываются особенности разрушения, отсутствуют методы оценки параметров разрушения хрупких материалов износостойких покрытий, безразмерные коэффициенты износа износостойких покрытий, отсутствие которых не позволяет точно прогнозировать износ поверхностного слоя инструментального материала с учетом использования износостойких покрытий. Кроме того, отсутствуют модели разрушения самих хрупких материалов износостойких покрытий в условиях ударных и сдвиговых нагрузок.

Разработка новых методик и подходов к моделированию процессов изнашивания и разрушения рабочих поверхностей штампового инструмента является на сегодняшний день важным и перспективным направлением в области изучения проблемы повышения работоспособности и ресурсоемкости поверхностных слоев тяжело нагруженных рабочих деталей инструмента обработки металлов давлением. Создание методик по оценке и анализу процессов износа и разрушения на основе математического моделирования позволит

разрабатывать рациональную архитектуру многокомпонентных износостойких покрытий, работающих в процессах разделительных и формоизменяющих операций обработки металлов давлением, что обуславливает **актуальность исследования**.

Основной задачей при разработке математических моделей, учитывающих закономерности изнашивания и механизмы разрушения многокомпонентных ионно-плазменных износостойких покрытий в условиях ударных и сдвиговых деформационных нагрузок при реализации схем интенсивного деформирования, является получение новых знаний по механизму образования трещин в покрытиях, работающих на сдвиг и удар, закономерностей связей параметров структуры покрытий с интенсивностью износа.

На основании вышесказанного, **целью** настоящего исследования является повышение стойкости рабочей поверхности инструмента операций листовой штамповки на основе применения износостойких покрытий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ причин изнашивания и разрушения штампового инструмента в условиях ударных и сдвиговых нагрузок;
2. Разработать математические модели разрушения и износа инструмента с износостойкими покрытиями при реализации сдвиговых и ударных деформационных нагрузок;
3. Провести численное моделирование процессов изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента с износостойким покрытием на операциях «вырубка» и «вытяжка с принудительным утонением» с использованием программного продукта LS-Dyna;
4. Провести экспериментальные исследования по изучению влияния состава износостойких покрытий и технологических режимов процесса деформирования на износ штампового инструмента;
5. Разработать технологические рекомендации по применению штампового инструмента с износостойким покрытием;

6. Оценить эффективность штампового инструмента с износостойкими покрытиями в условиях реального производства.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА

2.1. Методология исследования

Согласно поставленным задачам исследования была сформулирована методология исследования, представленная на рисунке 2.1.

Для изучения работоспособности штампового инструмента было использовано численное моделирование процессов разрушения и износа рабочей поверхности штампового инструмента с износостойкими ионно-плазменными покрытиями, процесса разрушения самих покрытий при реализации схем интенсивного деформирования в условиях удара и сдвига.

Выбор математического моделирования в качестве метода исследования процессов прогнозирования работоспособности износостойких ионно-плазменных покрытий и штампового инструмента с данными покрытиями обусловлен его эффективностью и универсальностью, позволяющей разрабатывать и оптимизировать методики расчета и прогнозирования процессов трещинообразования в покрытиях в условиях интенсивного деформирования (инструмент работает на сдвиг и удар), проводить анализ работоспособности наноструктурных ионно-плазменных износостойких покрытий инструмента, работающих в условиях разделительных и формоизменяющих операций листовой штамповки (удар и сдвиг).

При решении данной задачи предпочтение было отдано концепции конечно-элементного моделирования (КЭМ), предназначенной для математического анализа нелинейного отклика трехмерных неупругих структур (динамические процессы).

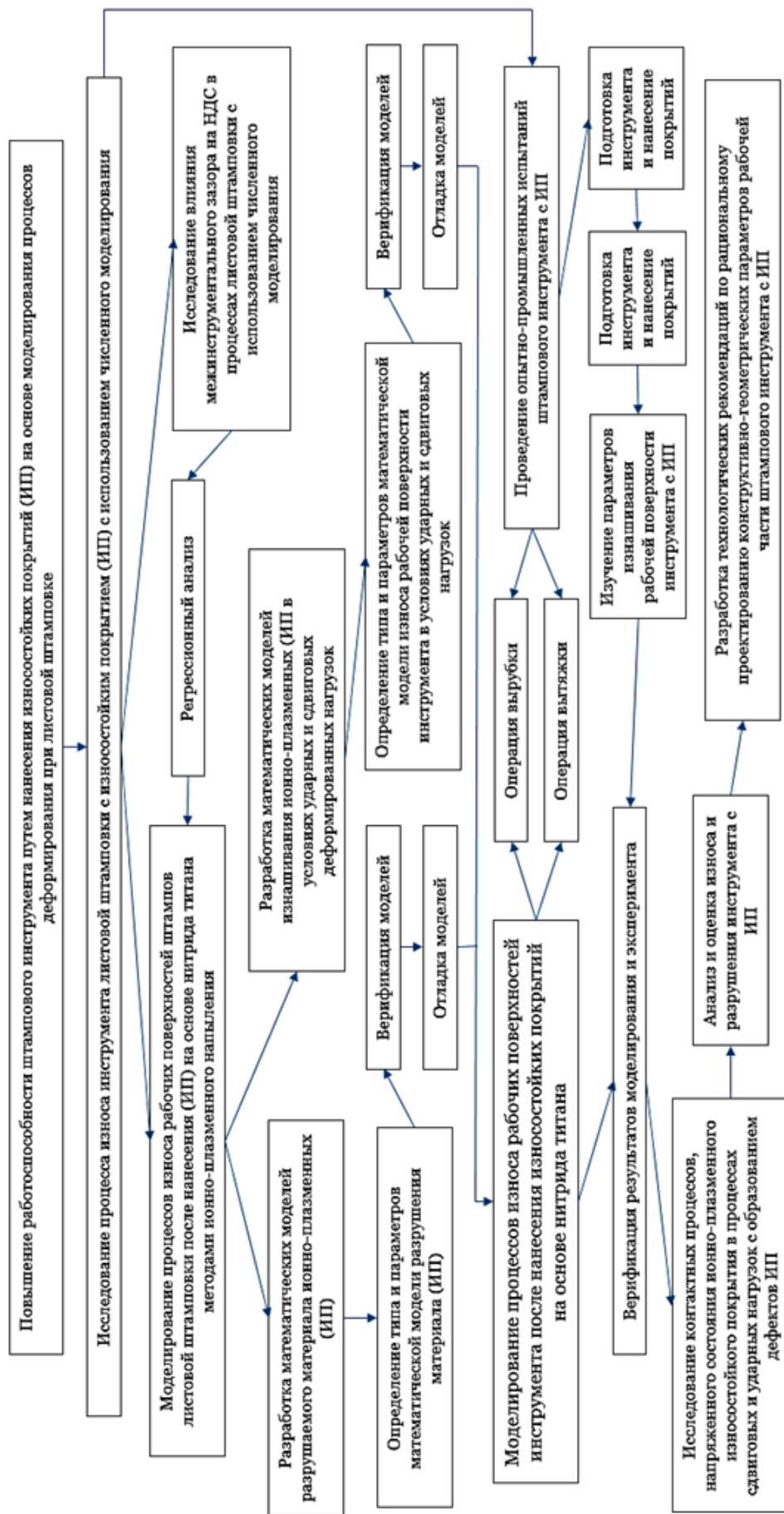


Рисунок 2.1 - Методология исследования

Полностью автоматизированный процесс решения контактных задач, а также множество встроенных функций по проверке получаемого решения позволяют решать сложнейшие задачи динамических процессов – удара, разрушения, формообразования, в том числе, предоставляет возможность эффективного численного моделирования высоконелинейных термомеханических процессов, таких как процессы обработки металлов давлением (прокат, экструзия, штамповка, резка, сверхпластическое формование и т.п.), ударно-контактные взаимодействия с разрушением, моделирование развития трещин [61] и др.

При разработке математических моделей было принято решение использовать программные продукты КОМПАС-3D и LS-Dyna. LS-Dyna - многоцелевая программа, предназначенная для математического анализа нелинейного отклика трехмерных неупругих структур (динамические процессы). Полностью автоматизированный процесс решения контактных задач, возможность решения обратной задачи, а также множество функций по проверке получаемого решения и корреляции параметров позволяют успешно решать сложнейшие задачи и моделировать динамические процессы в сложных системах.

В качестве основных процессов, подлежащих моделированию в рамках данного исследования, были определены два наиболее представительных процесса листовой штамповки, в которых реализуются «жесткие» схемы НДС (интенсивность деформации, высокие значения контактных и нормальных напряжений и сил трения):

- для формоизменяющих операций листовой штамповки – операция «вытяжка с принудительным утонением» (рисунок 2.2а);
- для разделительных операций листовой штамповки – операция «вырубка» (рисунок 2.2б).

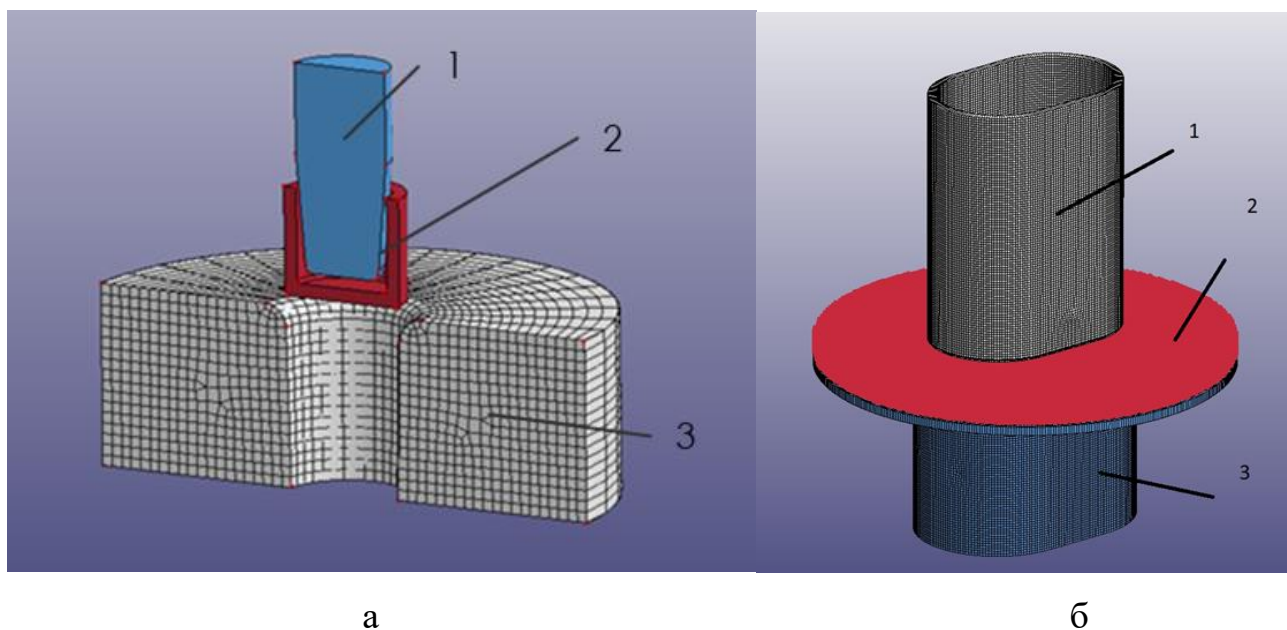


Рисунок 2.2 - 3D-модели процессов «вытяжка с принудительным утонением» (а) и «вырубка» (б):

1 – пуансон, 2 – заготовка, 3 – матрица

Для повышения стойкости штампового инструмента в работе предложено использовать износостойкие покрытия на основе нитрида титана, нанесенные методом ионно-плазменного напыления.

Предпочтение отдано покрытиям TiN, TiZrN, как наиболее часто используемым на операциях механической обработки. Данные покрытия демонстрируют высокие значения физико-механических свойств, в научной технической литературе представлено достаточное количество результатов экспериментальных испытаний.

Однако, поскольку материалы представленных покрытий относятся к категории хрупких материалов, отличающихся по своим физико-механическим характеристикам от металлических инструментальных материалов – их моделирование требует отдельных подходов. В настоящий момент в научной технической литературе для них отсутствуют корректные значения параметров разрушения и коэффициенты износа, что требует отдельного подхода при построении математических моделей.

Поэтому, чтобы перейти к непосредственному моделированию процессов листовой штамповки, предварительно необходимо определению необходимых параметров и решить задачу по моделированию процесса разрушения хрупкого материала покрытия.

2.2. Моделирование процесса разрушения износостойких покрытий

В теории математического моделирования существует два основных подхода, позволяющих прогнозировать механизмы абразивного изнашивания твердых поверхностей, — методика И.В. Крагельского [62] и закон Д. Ф. Арчарда [63].

Методика Крагельского [62] предлагает огромный набор частного математико-физического инструментария для решения определенных задач при упругом и пластическом контакте. Однако, данная методика не является вполне корректной для решения аналитических задачи и не позволяет в полной мере учесть фактор ударного воздействия на хрупкие материалы износостойких покрытий [61].

Закон Д. Ф. Арчарда, реализованный в ПО LS-Dyna в модуле «Wear Process», в свою очередь, позволяет оценить степень изнашивания твердых поверхностей оборудования за счет ударного воздействия частиц [61]. Этот закон связывает потерю объема материала твердой поверхности с работой сил трения, возникающих между частицами и поверхностью и физико-механическими свойствами контактирующих объектов.

Таким образом, в качестве основного подхода при моделировании процесса износа хрупкого материала износостойких покрытий предпочтение было отдано методике Д. Ф. Арчарда.

2.2.1. Определение параметров модели износа Д.Ф. Арчарда

Как было представлено ранее, работоспособность и стойкость рабочего инструмента листовой штамповки можно представить, как функцию износа. Величину износа, в этом случае, можно рассчитать, как [63,64]:

$$Q = K * \frac{F_t * L}{H}, \quad (2.1)$$

где Q - объем частиц износа (мм^3), K - *безразмерный масштабный коэффициент (безразмерная эмпирическая постоянная)*, F_t – тангенциальная сила, действующая на поверхности контакта, H – твердость поверхности инструментального материала (ГПа), L – длина контакта (мм).

Величина безразмерного масштабного коэффициента K известна только для материалов большинства инструментальных сталей и некоторых керамических материалов (оксид кремния, оксид алюминия и т.д.). Для корректного моделирования износа штампового инструмента с износостойкими покрытиями необходимо было определить значения параметра K для каждого из исследуемых покрытий (TiN и TiZrN).

Неизвестную величину коэффициента K для материалов износостойких покрытий определяли путем моделирования процесса механической обработки заготовок режущим инструментом (РИ) с износостойким покрытием, поскольку в настоящий момент в научно-технической литературе имеется достаточное количество данных о характере и интенсивности износа рабочей поверхности РИ с покрытием.

Алгоритм определения коэффициента K представлен на рисунке 2.3.

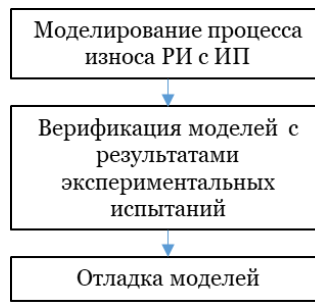


Рисунок 2.3 - Алгоритм определения коэффициента износа материалов износостойких покрытий TiN и TiZrN

Расчетная модель для определения коэффициента износа K материалов износостойких покрытий TiN и TiZrN представлена на рисунке 2.4.

Параметры модели при моделировании процесса резания с использованием инструмента с износостойким покрытием TiN и TiZrN были следующими:

- материал подложки РИ – инструментальная быстрорежущая сталь Р6М5;
- материал износостойкого покрытия РИ (TiN, TiZrN);
- материал заготовки - сталь 12Х18Н10Т (выбор материала определялся имеющейся гаммой результатов экспериментальных испытаний);
- скорость резания - $V=100\text{м/мин}$ (согласно режимам экспериментальных испытаний);
- подача - $S=0,3\text{мм/об}$;
- длина обрабатываемой поверхности - $t=0,75\text{мм}$.

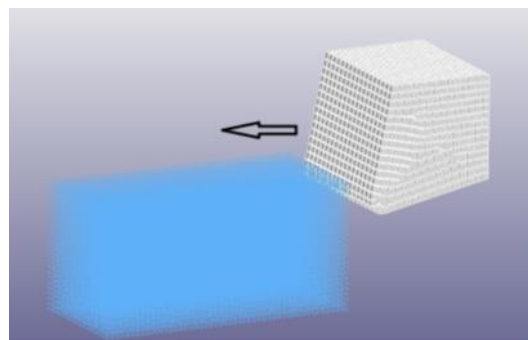


Рисунок 2.4 - Расчетная модель определения коэффициента износа материалов износостойких покрытий TiN и TiZrN

В ходе моделирования фиксировалась профилограмма изменения контактных площадок по передней поверхности инструмента (рисунок 2.5).

Далее проводили верификацию полученных результатов с экспериментальными данными [65] износа контактных площадок инструмента с износостойким покрытием (рисунок 2.5), представленными в работе Табакова В.П. [66]. Отклонения результатов моделирования от экспериментальных значений не превысили 5%.

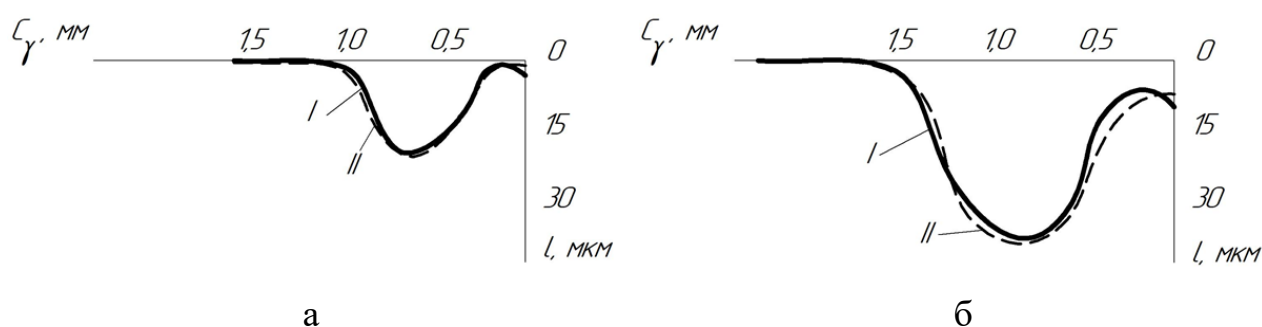


Рисунок 2.5 - Профилограммы контактных площадок по передней поверхности инструмента с износостойким покрытием TiN (а) и TiZrN (б) при точении стали 12Х18Н10Т ($V=100$ м/мин; $S=0,3$ мм/об; $t=0,75$ мм):

I – экспериментальные значения; II – значения, полученные в результате моделирования

По результатам моделирования были получены значения коэффициента K – $1,7 \cdot 10^{-6}$ и $0,8 \cdot 10^{-7}$, соответственно, для покрытий TiN и TiZrN.

2.2.2. Определение параметров модели материала износостойкого покрытия

Учитывая, что материал износостойких покрытий отличается от материала штампового инструмента по своим механическим свойствам и механизму изнашивания, поскольку является хрупким материалом в отличие от пластичных

материалов инструментальной подложки, его моделирование выполняли по отдельному алгоритму:

- выбор модели материала;
- определение параметров разрушения модели;
- отладка и верификация модели.

В LS-Dyna реализовано большинство известных моделей материалов, среди которых можно выделить три основные группы [67,68]:

- модели упругих и упругопластических материалов;
- модель Джонсона-Кука;
- модели малопластичных и хрупких материалов.

Так как материал износостойкого покрытия является хрупким [66], выбор модели производился среди моделей малопластичных и хрупких материалов, работающих при динамическом нагружении [67,68]:

- модель Дешпанда-Эванса;
- модель Денуола-Форкуина-Хилда;
- модель Джонсона-Холмквиста.

Модель Дешпанда-Эванса [69-71] нашла широкое применение для моделирования пористых материалов и для керамики. Она учитывает такие параметры, как упругость, пластичность и повреждение хрупких материалов, однако не дает точного представления о структуре и характере образования трещин в хрупких материалах.

Модель Денуола-Форкуина-Хилда [72-74] также используется для описания поведения керамики при динамическом нагружении. Данная модель используется значительно реже и не входит в стандартные библиотеки моделей материалов коммерческих пакетов программ, что значительно затрудняет его применение.

Одним из недостатков использования первых двух моделей является несоответствие расчетной и экспериментальной картин разрушения [75-77]. При выполнении в процессе расчета в одном конечном элементе критерия разрушения, этот элемент удаляется из расчета, что приводит к перестроению сетки и снижению

точности расчета, затрудняя таким образом учет взаимодействия разрушенного материала, ударного инструмента и подложки.

Исходя из вышеизложенного, в качестве модели хрупкого материала износостойких покрытий была выбрана модель Джонсона-Холмквиста [66,67], учитывающая образование трещин в хрупком материале.

Для начала расчета необходимы следующие входные данные, задаваемые пользователем: плотность – ρ (кг/м³), модуль сдвига – G (Па), нормализованная когезионная прочность – A , нормализованное упрочнение под действием давления – B , коэффициент скорости деформации – C , показатель степени упрочнения под действием давления – N , квазистатическая прочность при одноосном сжатии – FC (Па), максимальное гидростатическое давление при растяжении – T (Па), исходная скорость деформации – ε_0 (1/с), пластическая деформация перед образованием трещины – $EFMIN$, нормализованная максимальная прочность – $SFMAX$, давление раздавливания – PC (Па), объемная деформация раздавливания – UC , предельное давление – PL (Па), предельная объемная деформация – UL , постоянные разрушения – $D1, D2$, постоянные давления – $K1, K2, K3$ (Па), тип разрушения – FS : $FS = 0$ – нет разрушения; $FS < 0$ – разрушение при пределе текучести меньше нуля; $FS > 0$ – разрушение при достижении пластической деформацией величины FS .

Согласно данной модели, предел прочности хрупкого материала изменяется по закону:

$$\sigma = \sigma_0 - D(\sigma_0 - \sigma_f), \quad (2.2)$$

где $0 \leq D \leq 1$ – поврежденность материала (%), скалярная величина, указывающая на накопление разрушения, σ_0 – предел прочности исходного неповрежденного материала (МПа), σ_f – предел прочности полностью разрушенного материала (МПа).

Поврежденность хрупкого материала определяется выражением:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_p^f}, \quad (2.3)$$

где $\Delta\varepsilon_p$ - накопленная условная пластическая деформация за один шаг интегрирования (%), ε_p^f - предельная условная пластическая деформация (%) при определенном гидростатическом давлении p , которая вызывает разрушение материала, и определяется как:

$$\varepsilon_p^f = D_1 \left(\frac{p}{\text{HEL}} + \frac{T^f}{\text{HEL}} \right)^{D_2}, \quad (2.4)$$

где HEL – предел упругости Гюгонио (ГПа), T^f – напряжение всестороннего растяжения, при котором материал разрушается (ГПа), D_1 и D_2 – константы материала.

Предел прочности поврежденного и не подвергшегося разрушению материала определяется выражениями:

$$\sigma_0 = A \left(\frac{p}{\text{HEL}} + \frac{T^f}{\text{HEL}} \right)^n \left(1 + C \ln \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right), \quad (2.5)$$

$$\sigma_f = B \left(\frac{p}{\text{HEL}} \right)^m \left(1 + C \ln \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right), \quad (2.6)$$

где ε - текущая скорость деформирования, ε_0 - базовая скорость деформирования, параметры A , B , C , m , n – константы материала.

Гидростатическое давление определяется уравнением состояния:

$$p = K_1 \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) + K_2 \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right)^2 + K_3 \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right)^3, \quad (2.7)$$

где ρ_0 - начальная плотность материала, кг/мм³, ρ - текущая плотность материала, кг/мм³, (с учетом пористости хрупких порошковых материалов, рассчитывается автоматически с целью снижения погрешностей расчета), K_1 , K_2 , K_3 – безразмерные материальные константы.

В научно-технической литературе присутствуют значения материальных констант давления и разрушения для ряда хрупких материалов (карбид бора, карбид кремния, нитрид алюминия, стекло). Однако для материалов износостойких покрытий на основе нитрида титана эти параметры неизвестны.

Соответственно, для проведения корректного моделирования процессов листовой штамповки с использованием штампового инструмента с износостойким покрытием требуется предварительное определение коэффициентов A , B , C , m , n ,

K1, K2, K3 для каждого из выбранных материалов износостойких покрытий (TiN, TiZrN).

Методика определения коэффициентов A, B, C, m, n, определяющих характеристики материала, была предложена в работах Джонсона-Холмквиста [66,67]. Для ряда относительно-хрупких материалов значения коэффициентов были ранее определены в работах [79-83] на основе численного моделирования высокоскоростного удара снаряда об мишень и ударно-волнового нагружения хрупких материалов.

Верификация определяющих соотношений в указанных работах проводилась для проверки корректности разработанной модели и заключалась в сравнительном анализе результатов натуральных и численных экспериментов в условиях статического и динамического нагружения указанных сред с целью определения соответствия и/или расхождения результатов моделирования и эксперимента. Так, для верификации предложенной модели Холмквиста-Джонсона-Кука в [78] и ее модификации [79] использовали сравнение остаточных скоростей ударников при внедрении в мишени, полученных в результате расчета и эксперимента. В работах российских и зарубежных авторов [78-81] отмечается, что результаты анализа НДС с использованием модели Холмквиста-Джонсона-Кука корректно соответствуют значениям, полученным в результате экспериментальных испытаний исследуемых материалов.

В работе [80] для верификации модели накопления повреждений было проведено сравнение амплитуды и формы волны ударного воздействия, зарегистрированной в эксперименте на ударное разрушение хрупкого образца в модели, построенной в ПО ANSYS/LS-Dyna. После был произведен натуральный эксперимент и сравнительный анализ результатов, показавший, что отклонения при моделировании не превышают 10%.

В работах Садырина А.И., Крылова С.В., Батарина А.Б., Пирогова С.А., Цветковой Е.В. [81-84] верификация представленной выше модели динамического деформирования и ударного разрушения хрупких сред также осуществлялась путем сравнения с экспериментальными данными полученных в процессе расчета

параметров отпечатков и предельных глубин проникновения инденторов в образцы из хрупких керамических материалов. Отмечается, что погрешность полученных данных не превышает 5-10 %.

Таким образом, можно сделать вывод, что верификация параметров модели материала посредством сравнения параметров отпечатков ударного воздействия на материал как в математической модели, так и в результате натуральных экспериментов является адекватной и позволяет корректно описать механизм разрушения относительно-хрупких материалов под воздействием ударных деформационных нагрузок [85], а также позволяет производить отладку и верификацию на высоком уровне (отклонение не более 10-15%). При этом наиболее корректные результаты были получены при использовании моделей ударного динамического воздействия (индентирования) хрупких образцов.

Исходя из этого был разработан алгоритм математического моделирования ударных испытаний хрупких материалов с целью определения коэффициентов A , B , C_1 , C_2 , m , n , K_1 , K_2 , K_3 для каждого из материалов износостойких покрытий (рисунок 2.6).

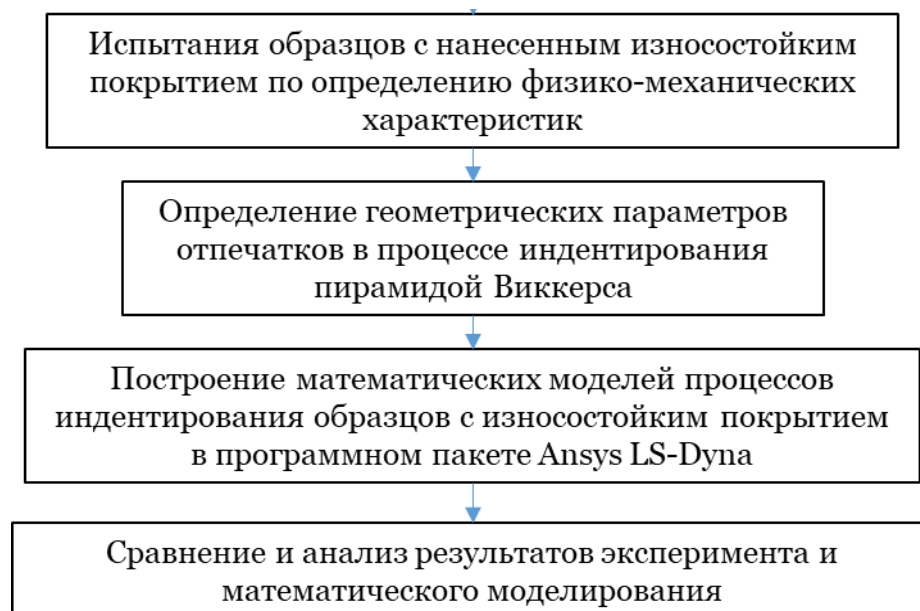


Рисунок 2.6 - Алгоритм определения параметров математической модели разрушения материала износостойкого покрытия

В рамках исследования были построены две конечно-элементные модели: модель образования трещин Палмквиста в износостойких покрытиях, основанная на определении микротвердости материала методом индентирования пирамидой Виккерса, и модель индентирования образца пирамидой Кнуппа [86].

При разрушении покрытий, трещины, возникающие в них, распространяются в направлении, перпендикулярном границе раздела «покрытие – инструментальная основа». Для таких трещин (трещины Палмквиста – см. рисунок 2.7) величину вязкости разрушения K_{1c} можно определить по формулам [86]:

$$K_{1c} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{1-\nu^2}}, \quad (2.8)$$

$$K_{1cп} = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{1-\nu^2}}, \quad (2.9)$$

$$K_{1cп} = 0,035\sigma\sqrt{c} \left(\frac{E}{\sigma}\right)^{0,4} \left(\frac{c}{c} - 1\right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (2.10)$$

где γ – поверхностная энергия твердого тела, Дж/м², ν – коэффициент Пуассона, E – модуль упругости материала, МПа, σ – предел прочности, МПа, c – размер отпечатка, м, C – длина трещины Палмквиста, м.

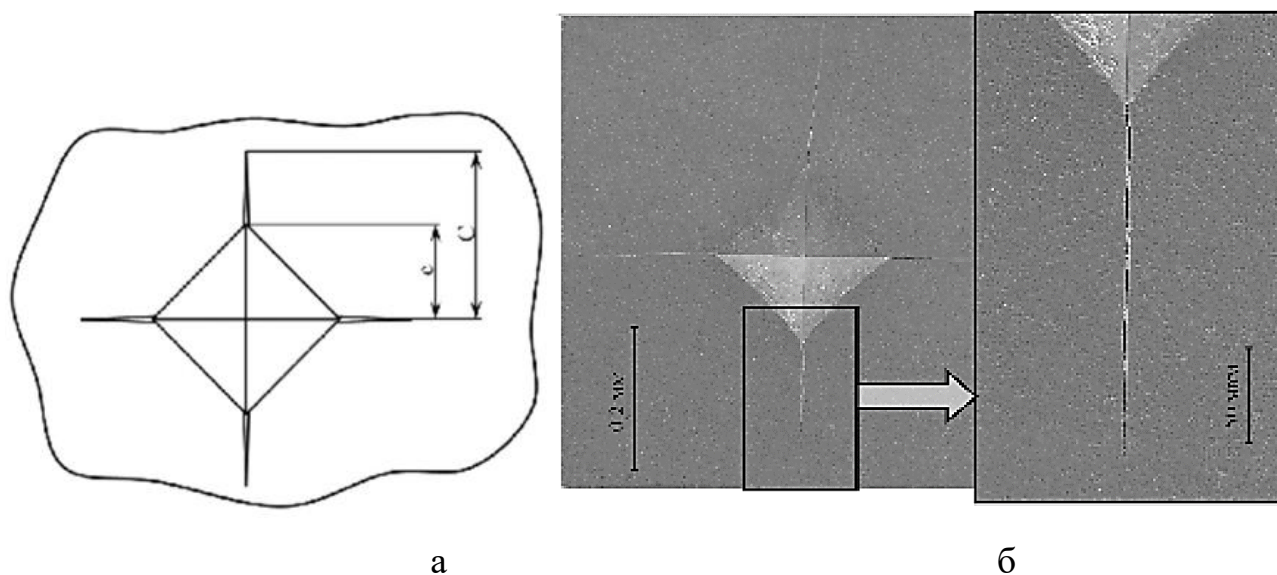


Рисунок 2.7 - Схема образования трещин Палмквиста при индентировании пирамидой Виккерса:

а – схема; б – фото отпечатка, полученного на покрытии TiZrN при индентировании пирамидой Виккерса при нагрузке 600Н

Была построена конечно-элементная модель образования трещин в износостойких покрытиях, основанная на определении микротвердости материала методом индентирования пирамидой Виккерса, параметры которой представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Параметры модели индентирования образца пирамидой Виккерса

Параметр	Значение
Модель	Полная
Размер КЭ сетки	0,001x0,001 мм
Тип КЭ	Параллелепипед
Модель материала индентора	Абсолютно упругое тело (алмаз)
Модель материала подложки	Хрупкий материал (ВК-8)
Модель материала покрытия	Хрупкий материал (TiN, TiZrN, TiAlN)
Толщина покрытия	5 мкм
Закон трения	Амонтона-Кулона
Усилие индентирования	600 Н

Результаты моделирования (этапы образования трещин в процессе индентирования) представлены на рисунке 2.8.

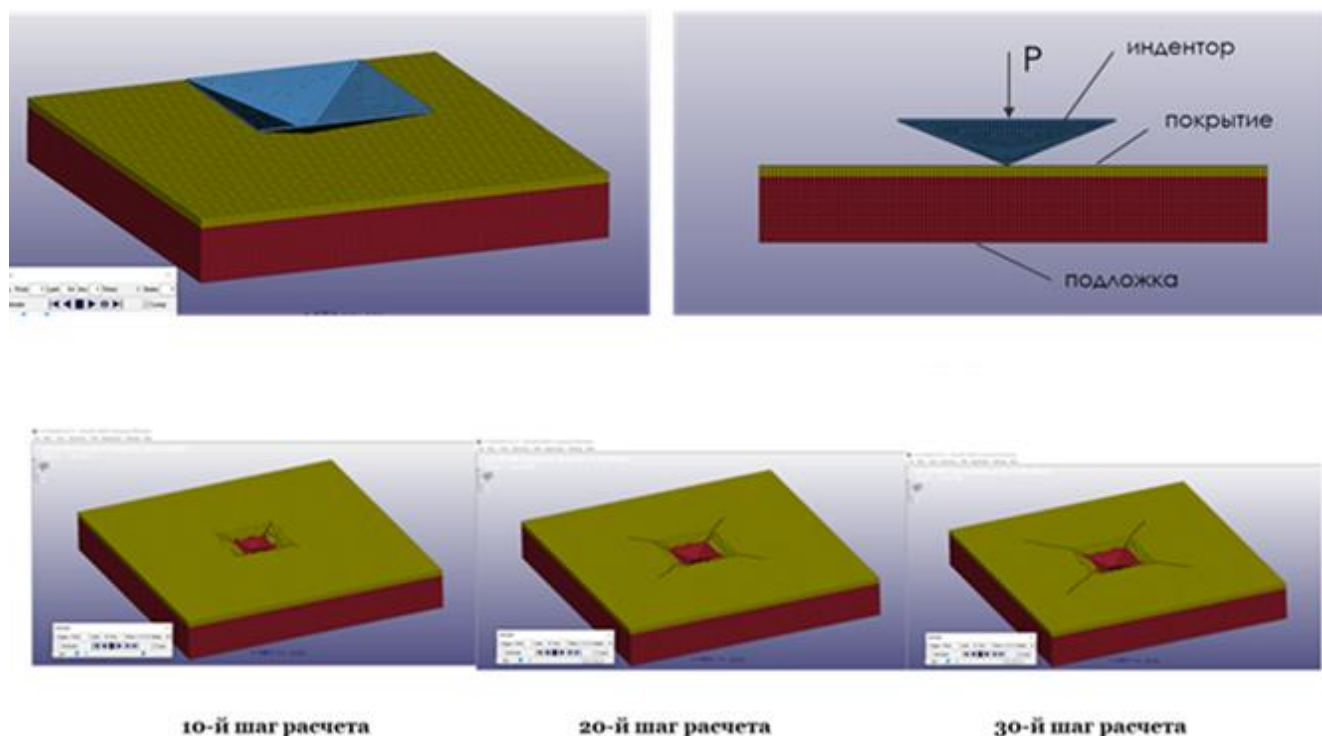


Рисунок 2.8 - Этапы образования трещин Палмквиста в процессе индентирования

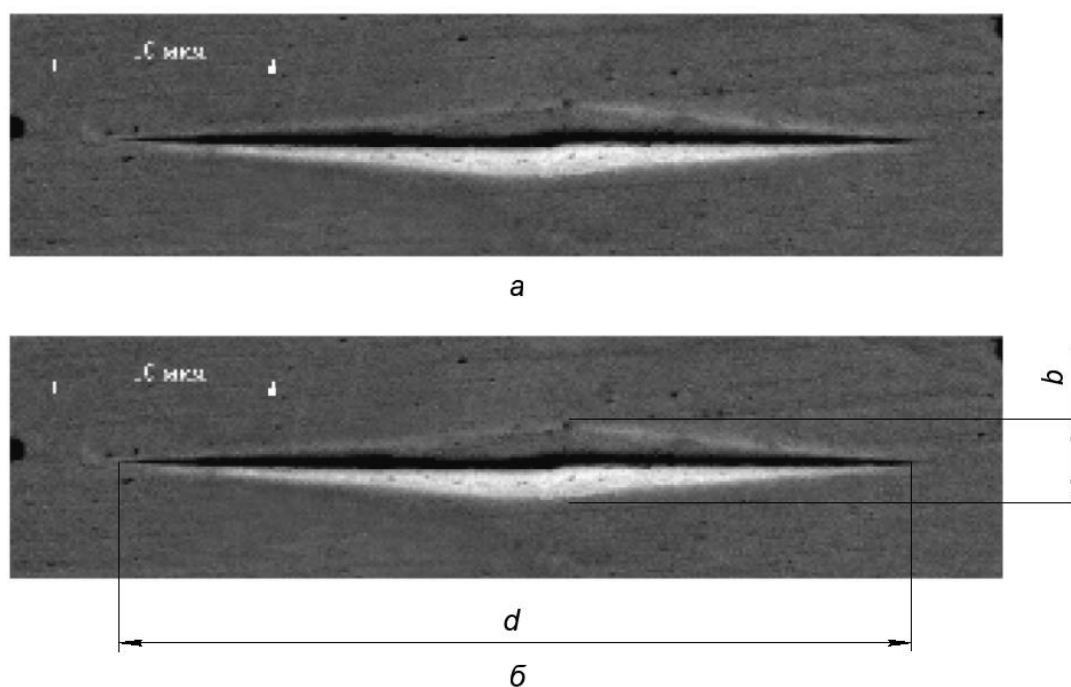
Важной механической характеристикой материала является модуль упругости первого рода E (модуль Юнга). Традиционные методики определения его величины (испытания на растяжение – сжатие, изгиб, кручение) в случае изучения тонких покрытий применить невозможно. В работе [86] для определения модуля упругости первого рода предложена методика, основанная на индентировании поверхности испытуемого материала пирамидой Кнуппа.

Зависимость между модулем упругости первого рода и размерами пирамиды Кнуппа и отпечатка микротвердости имеет вид:

$$\frac{b'}{d'} = \frac{b}{d} - \alpha \frac{H_k}{E}, \quad (2.11)$$

где b и d – длины меньшей и большей диагоналей пирамиды Кнуппа, b' и d' – длины меньшей и большей диагоналей отпечатка; α – коэффициент ($\alpha = 0,45$); H_k – микротвердость по Кнуппу.

На рисунке 2.9 показан отпечаток пирамиды Кнуппа на поверхности покрытия TiN.



Рисунке 2.9 - Фотография отпечатка (а), полученного на покрытии TiN при индентировании пирамидой Кнуппа при нагрузке 2,55 Н, и расчетная схема для определения величины модуля упругости первого рода E (б)

С целью получения более точных значений искомым параметров коэффициентов разрушения была построена конечно-элементная модель образования трещин в износостойких покрытиях, основанная на определении модуля упругости материала методом индентирования пирамидой Кнуппа. Параметры модели представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Параметры модели индентирования образца пирамидой Кнуппа

Параметр	Значение
Модель	Полная
Размер КЭ сетки	0,001x0,001 мм
Тип КЭ	Параллелепипед
Модель материала индентора	Абсолютно упругое тело (алмаз)
Модель материала подложки	Хрупкий материал (BK-8)
Модель материала покрытия	Хрупкий материал (TiN, TiZrN, TiAlN)
Толщина покрытия	5 мкм
Закон трения	Амонтона-Кулона
Усилие индентирования	0,1 Н

На рисунке 2.10 представлены результаты моделирования процесса индентирования износостойкого покрытия пирамидой Кнуппа.

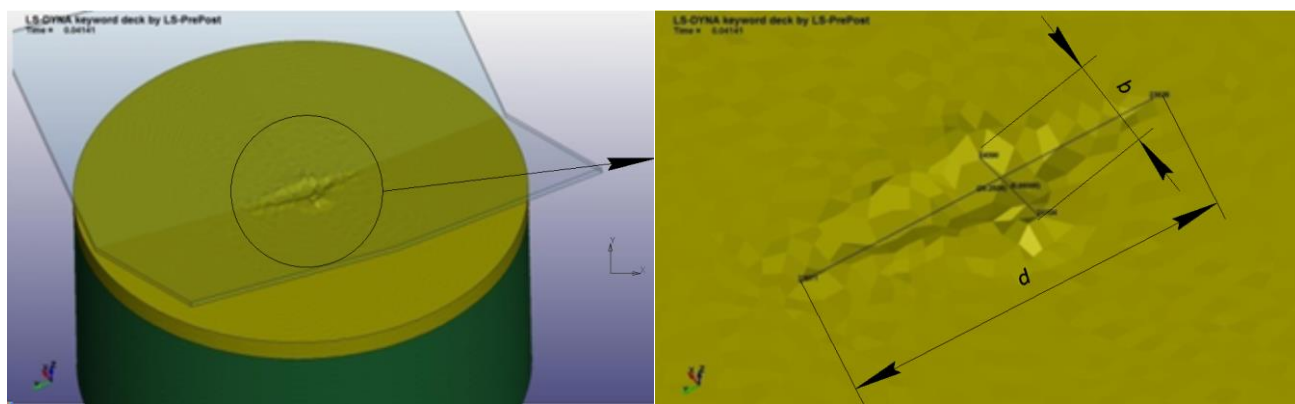


Рисунок 2.10 - Результаты моделирования процесса индентирования (отпечаток) образца с износостойким покрытием TiN пирамидой Кнуппа.

Было произведено сравнение результатов численного моделирования индентирования образцов с износостойкими покрытиями с экспериментальными данными.

Экспериментальные исследования проводили на твердосплавных пластинах из сплава BK8, на которые наносили износостойкие покрытия TiN, TiZrN и TiAlN.

Измерения геометрических параметров трещин Палмквиста (индентирование пирамидой Виккерса) и параметров отпечатка b и d (индентирование пирамидой Кнуппа) проводили на микротвердомере MicroWizard. Сравнение результатов эксперимента и моделирования представлено в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Сравнение размеров трещин Палмквиста при индентировании пирамидой Виккерса при реальных испытаниях и в процессе математического моделирования

Тип покрытия	Размеры b и d отпечатка пирамиды Кнуппа, мкм		Длина трещин Палмквиста C , мкм	
	эксперимент	моделирование	эксперимент	моделирование
TiN	4/24,7	4/25,3	253,75	246,5
TiZrN	3,8/22,51	3,9/24,6	244,25	240,1
TiAlN	3,5/21,20	3,4/23,7	240,46	235,9

Результаты моделирования процесса индентирования пирамидой Виккерса показали, что длины трещин Палмквиста уменьшаются соответственно, при переходе от покрытий TiN к покрытиям TiAlN, TiZrN. При этом отклонение параметров трещин c и C , полученных в результате моделирования, по сравнению с натурными экспериментами не превысило 5%.

При моделировании процесса индентирования пирамидой Кнуппа установлено аналогичное снижение геометрических параметров отпечатков b и d при переходе от покрытий TiN к покрытиям TiAlN, TiZrN. Различие данных моделирования и эксперимента не превышает 8-10% в зависимости от состава износостойкого покрытия.

Величины рассчитанных и уточненных параметров разрушения и констант для хрупких материалов износостойких покрытий TiN и TiZrN представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 - Значения параметров разрушения материалов ИП

Параметры модели	Покрытие TiN	Покрытие TiZrN	Параметры модели	Покрытие TiN	Покрытие TiZrN
ρ , кг*м ³	5,44	6,83	HEL, ГПа	9	12,38
G, ГПа	127	145	RHEL, ГПа	0	0
Константы прочности			Константы разрушения		
A	0,85	0,85	D1	0,021	0,023
B	0,3	0,4	D2	1,86	1,8
C	0,02	0,013	Константы уравнения состояния		
M	0,35	0,24	K1, ГПа	205	201
N	0,29	0,35	K2, ГПа	0	0
EPSI	1	1	K3, ГПа	0	0
T, ГПа	0,32	0,32	BETA	0	0
SFMAX, ГПа	0,8	0,8			

Таким образом, проведенное моделирование и калибровка параметров материалов хрупких покрытий позволили получить уточненные значения параметров и констант разрушения хрупких материалов износостойких покрытий (коэффициентов K, A, B, C₁, C₂, m, n, K1, K2, K3) для материалов TiN, TiZrN, которые необходимы для моделирования непосредственно процессов износа штампового инструмента с износостойким покрытием с учетом отличия процессов изнашивания и разрушения хрупкого и пластичного материалов покрытия и подложки.

2.3. Разработка математической модели процесса изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента на операции «вытяжка с принудительным утонением»

С учетом определенных ранее параметров разрушения и безразмерных коэффициентов (см. п. 2.1) износа в ПО LS-Dyna была построена математическая модель процесса изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента на формоизменяющей операции листовой штамповки «вытяжка с принудительным утонением» (инструмент работает на сдвиг).

Алгоритм построения математической модели представлен на рисунке 2.11.

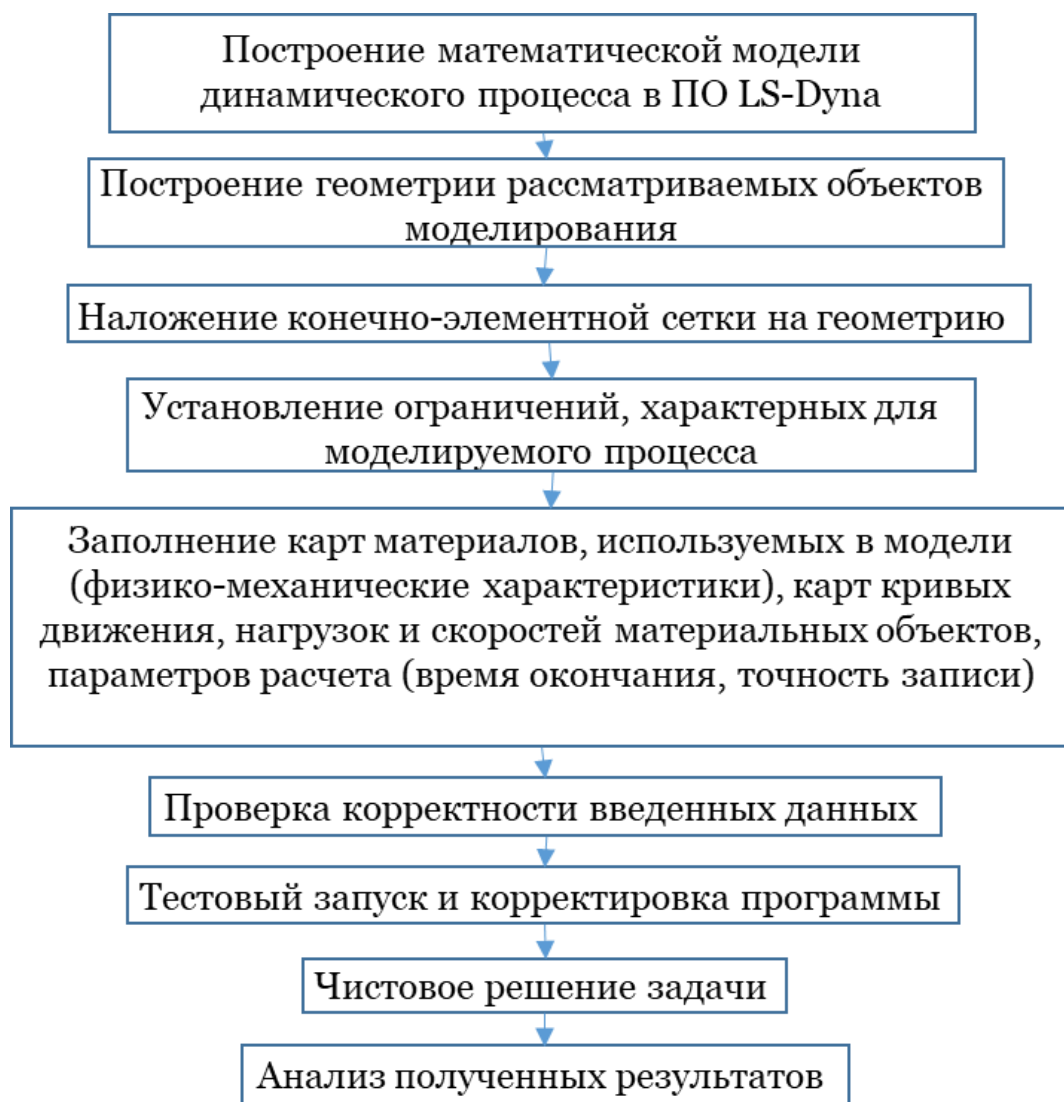


Рисунок 2.11 - Алгоритм математического моделирования динамических процессов в по LS-DYNA

Модель процесса «вытяжка с принудительным утонением» представлена на рисунке 2.12.

Геометрия модели инструмента и заготовки определялась номенклатурой действующей инструментальной оснастки номенклатуры АО «Ульяновский патронный завод» - операция «вытяжка с принудительным утонением», 2-й переход, изготовление детали типа «Гильза».

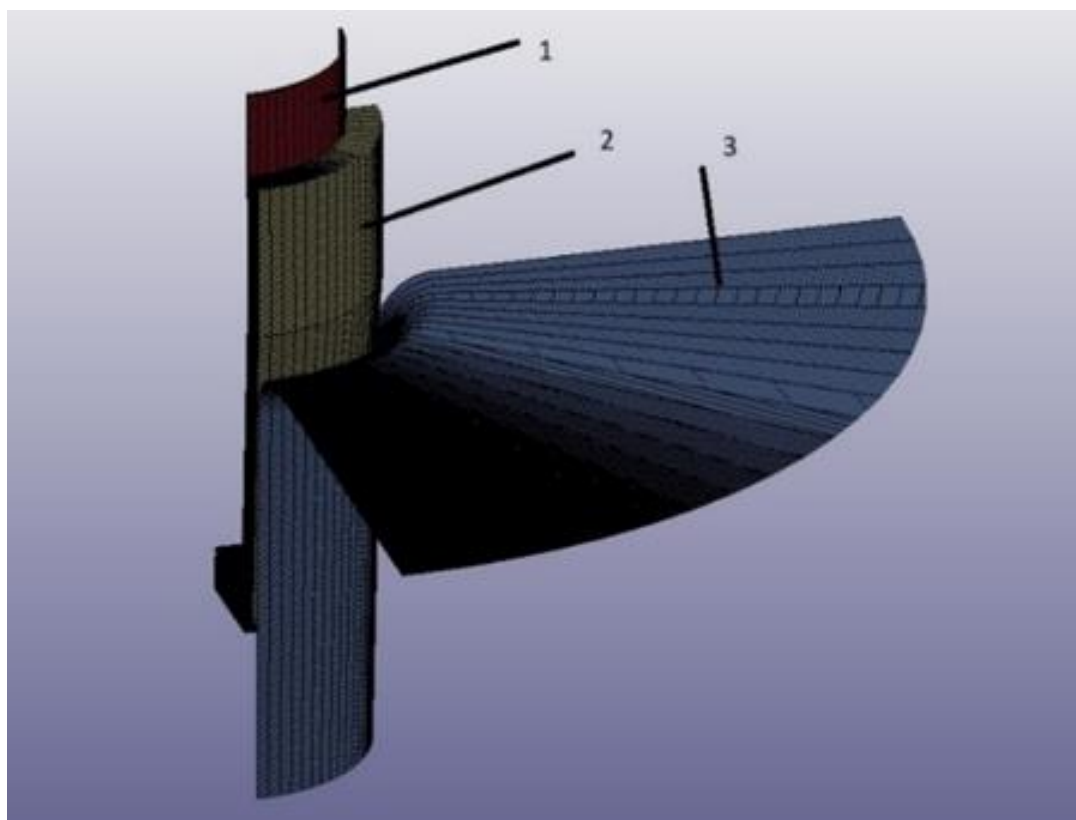


Рисунок 2.12 - Модель процесса «вытяжка с принудительным утонением»
(сегментная модель):

1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – матрица

Поскольку полная модель с мелкогабаритной (<10 мкм) сеткой требует длительных периодов времени для расчета, с целью уменьшения времени расчета и повышения точности конечно-элементной сетки реализована сегментная модель (90 градусов). На боковых границах сегментированной модели наложены ограничения, позволяющие экстраполировать результаты моделирования на полную модель процесса.

Конечно-элементная сетка выполнена с учетом адаптивного подстроения (уменьшения размеров сетки – *remashing* [66-68]) – для обеспечения повышения точности расчета и учета течения материала заготовки в зоне деформирования.

Параметры материалов подложки и заготовки заданы в соответствии со справочными данными [66-68].

Скорость деформирования в диапазонах 2-2,5 м/с была выбрана, исходя из технических характеристик основного листоштамповочного оборудования и

задана в соответствии со справочными рекомендациями по моделированию процессов листовой штамповки в ПО LS-Dyna [2,66,68].

При задании параметров модели хрупкого материала износостойкого покрытия использовались значения коэффициентов K , A , B , C_1 , C_2 , m , n , $K1$, $K2$, $K3$ для материалов TiN, TiZrN, определённые в п. 2.1.

Толщина износостойкого покрытия – 5 мкм.

Параметры разработанной модели представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 - Параметры модели процесса «вытяжка с принудительным утонением»

Параметр	Значение
Модель	Сегментная (90 градусов)
Размер КЭ сетки	0,005x0,005 мм
Тип КЭ	Параллелепипед
Модель материала заготовки	Пластическая (сталь)
Модель материала подложки	Упруго-пластическая (сталь)
Модель материала покрытия	Хрупкий материал (TiN, TiZrN)
Толщина покрытия	5 мкм
Закон трения	Амонтона-Кулона
Скорость деформирования	2-2,5 м/с

2.4. Разработка математической модели процесса изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента на операции «вырубка»

С учетом определенных параметров разрушения и безразмерных коэффициентов (см. п. 2.1.) износа в ПО LS-Dyna была построена математическая модель износа рабочей поверхности штампового инструмента на разделительной операции листовой штамповки «вырубка» (инструмент работает на удар и срез).

Модель процесса «вырубка» представлена на рисунке 2.13.

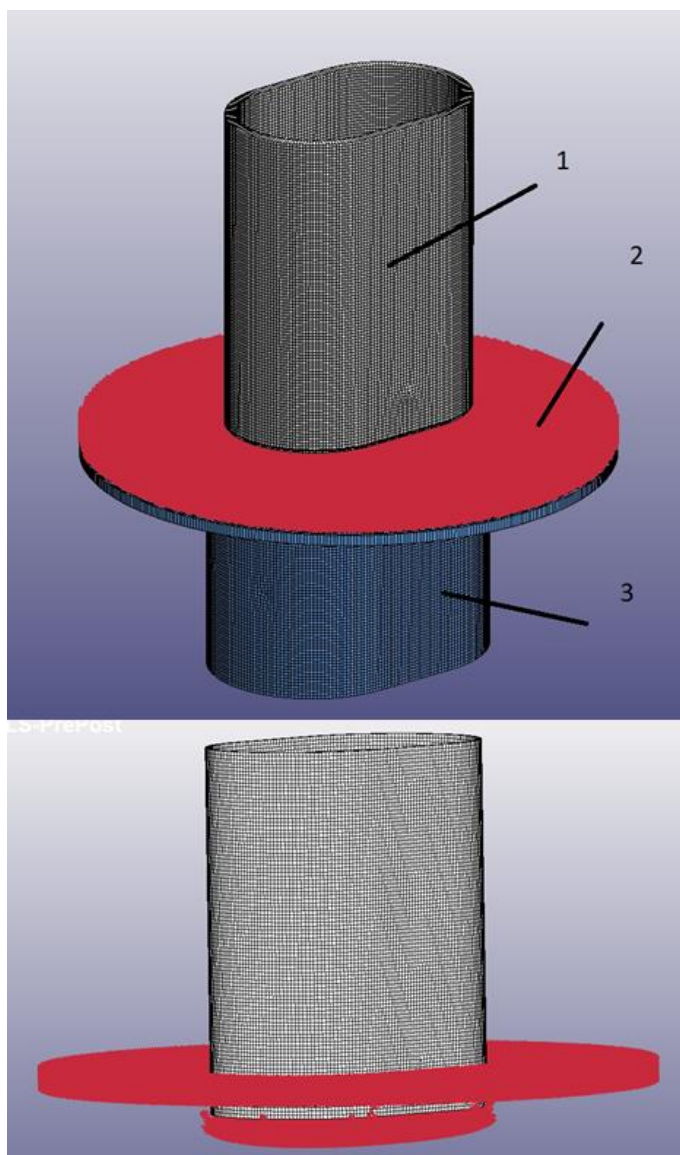


Рисунок 2.13 - Модель процесса вырубki:
(1 – пуансон, 2 – заготовка, 3 – матрица)

Геометрия модели инструмента и заготовки определялась номенклатурой действующей инструментальной оснастки номенклатуры АО «Ульяновский НИИТ» - операция вырубка, изготовление детали типа «Профиль».

Аналогично процессу «вытяжка с принудительным утонением» для уменьшения времени расчета и повышения точности конечно-элементной сетки применены соответствующие ограничения и реализована полая модель – из расчета удалены элементы внутренней части инструмента. На внутренних границах модели

наложены ограничения, позволяющие экстраполировать результаты моделирования на полную модель процесса.

При построении модели плоской заготовки с целью повышения точности расчета выбрана модель SPH – узловая модель материала, позволяющая более корректно реализовать моделирование разделения отдельных элементов материала вследствие преодоления предела на разрушение.

Параметры материалов подложки и заготовки заданы в соответствии со справочными данными и номенклатурой действующего производства [66-68].

Скорость деформирования в диапазонах 2-2,5 м/с была выбрана, исходя их технических характеристик основного листоштамповочного оборудования и задана в соответствии со справочными рекомендациями по моделированию процессов листовой штамповки в ПО LS-Dyna [2,66,68].

При задании параметров модели хрупкого материала износостойкого покрытия использовались значения коэффициентов K , A , B , C_1 , C_2 , m , n , K_1 , K_2 , K_3 для материалов износостойких покрытий TiN, TiZrN, определённые в п. 2.1.

Толщина износостойкого покрытия – аналогично процессу «вытяжка с принудительным утонением» - 5 мкм.

Параметры разработанной модели представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 - Параметры модели процесса «вырубка»

Параметр	Значение
Модель	Полая
Размер КЭ сетки	0,0025x0,0025 мм
Тип КЭ	Параллелепипед
Модель материала заготовки	Пластическая (сталь) Узловая (SPH)
Модель материала подложки	Упруго-пластическая (сталь)
Модель материала покрытия	Хрупкий материал (TiN, TiZrN)
Толщина покрытия	5 мкм
Закон трения	Амонтона-Кулона
Скорость деформирования	2 м/с

2.5. Выводы по главе

1. На основании анализа механики разрушения и износа хрупких материалов износостойких покрытий на основе нитрида титана определена методология решения поставленных в исследовании задач.

2. Выполнен подбор математических моделей, позволяющих провести численное моделирование износа штампового инструмента с износостойкими покрытиями на операциях листовой штамповки с учетом хрупкого разрушения.

3. Определены параметры моделей износа Джона Ф. Арчарда для полученных ионно-плазменным методом износостойких покрытий на основе нитрида титана – TiN, TiZrN.

4. Определены параметры и константы разрушения хрупких материалов износостойких покрытий на основе нитрида титана (TiN, TiZrN), реализуемые в модели Джонсона-Холмквиста. Отклонения геометрических параметров трещин Палмквиста «с» и «С» после индентирования алмазной пирамидой Виккерса и «b» и «d» после индентирования алмазной пирамидой Кнуппа, полученных в результате моделирования, по сравнению с натурными экспериментами не превышают (5-10) %. Установлено, что использование модели Джонсона-Холмквиста для моделирования материала износостойких покрытий на основе нитрида титана позволяет прогнозировать характер и интенсивность разрушения с достаточной точностью.

5. На основании рассчитанных параметров материалов построены математические модели износа рабочей поверхности штампового инструмента в процессах «вырубка» и «вытяжка с принудительным утонением» с учетом нанесения на инструмент износостойких покрытий на основе нитрида титана.

ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА

3.1. Численное моделирование процесса изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента на операции «вытяжка с принудительным утонением»

На основании разработанных в предыдущем разделе математических моделей выполнено численное моделирование процесса листовой штамповки при реализации процесса «вытяжка с принудительным утонением» (характерным механизмом деформации является сдвиг).

При численном моделировании процесса изнашивания штампового инструмента при вытяжке с утонением исследовали влияние износостойких покрытий на износ рабочей поверхности. Определяли значения контактных касательных (τ) и нормальных (σ) напряжений и стойкость (N) штампового инструмента. Схема износа рабочей поверхности штампового инструмента представлена на рисунке 3.1, на рисунке 3.2 – представлена схема образования «пояска износа» на рабочей поверхности инструмента (пуансона).

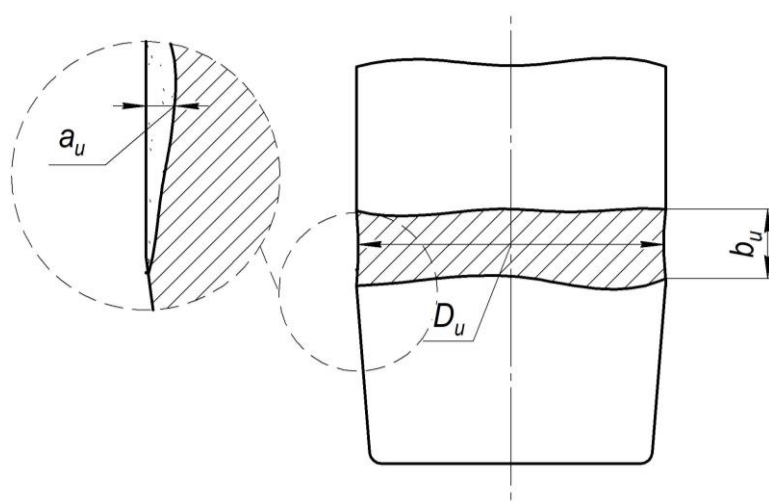


Рисунок 3.1 - Схема износа рабочей поверхности вытяжного пуансона:

D_u – диаметр изношенной зоны, b_u – длина изношенной зоны,

a_u – максимальная глубина износа

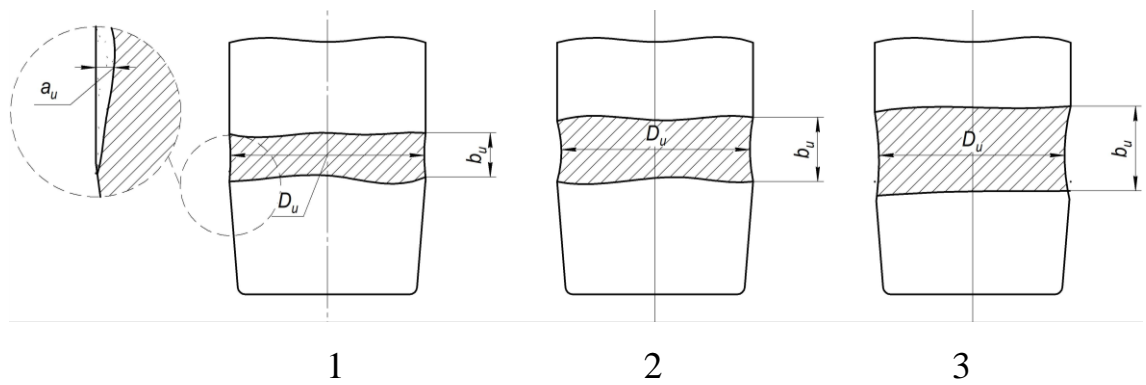


Рисунок 3.2 - Схема этапов образования пояска износа:

1, 2 и 3 – количество циклов, соответственно, 200000, 400000 и 600000,

$D_{и}$ – диаметр изношенной зоны, $b_{и}$ – длина изношенной зоны,

$a_{и}$ – максимальная глубина износа

На рисунке 3.3 представлены результаты численного моделирования процесса изнашивания рабочей поверхности штампового инструмента (пуансона) на операции «вытяжка с принудительным утонением».

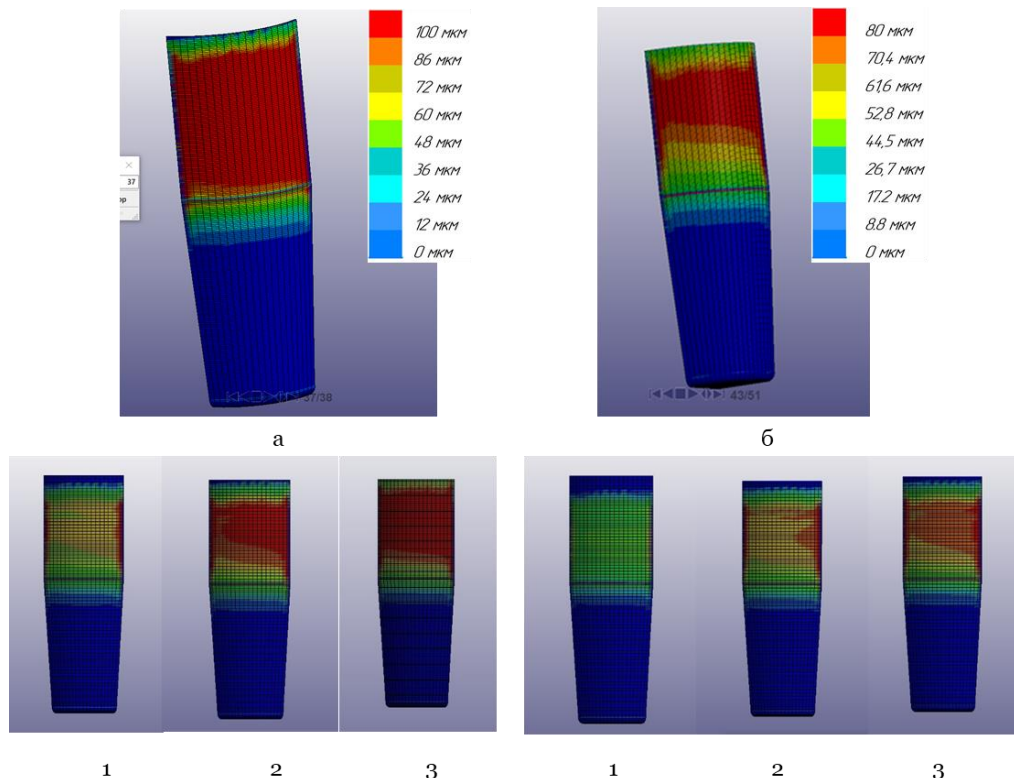


Рисунок 3.3 - Износ рабочей поверхности пуансонов:

а - без ИП, б – с ИП TiN, 1, 2 и 3 – количество циклов, соответственно, 200000,

400000 и 600000

По результатам численного моделирования построены соответствующие аппроксимированные графические зависимости и номограммы, представленные на рисунках 3.4-3.6.

Установлено, что нанесение износостойких покрытий на основе нитрида титана уменьшает величину контактных напряжений в (1,4-2) раза, в зависимости от состава покрытий (рисунок 3.4). При этом в большей степени уменьшаются контактные касательные напряжения, а большее снижение имеет место при нанесении покрытия TiZrN. По сравнению с покрытием TiN снижение значений контактных напряжений составило 5 % и 16 % (соответственно, для нормальных и касательных напряжений).

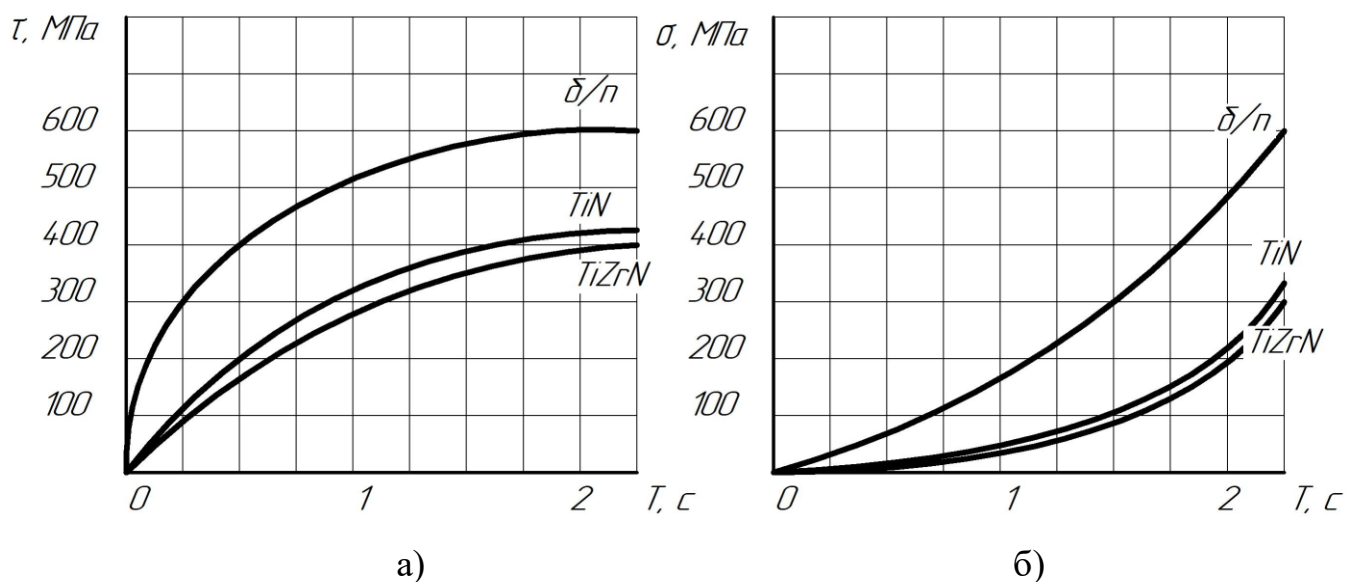


Рисунок 3.4 - Аппроксимированные зависимости касательных τ (а) и нормальных σ (б) напряжений на поверхности рабочего инструмента от времени рабочего хода T

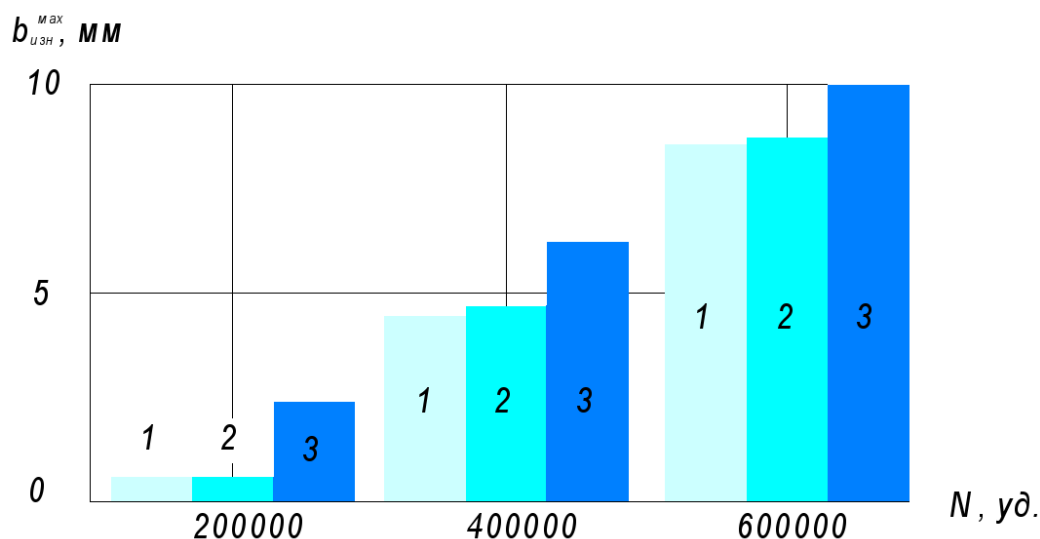


Рисунок 3.5 - Длина «пояска износа» рабочей поверхности штампового инструмента $b_{\text{и}}$: 1 – TiN, 2 – TiZrN, 3 – б/п

Нанесение износостойких покрытий TiN и TiZrN приводит к снижению длины «пояска износа», при этом наибольшее отклонение фиксируется после 200000 рабочих циклов, т. е. снижается интенсивный износ рабочей поверхности инструмента в начале эксплуатации. Это объясняется созданием «мягких» условий деформирования в рабочей зоне – снижением значений контактных напряжений (см. рисунок 3.4) и уменьшением коэффициента трения вследствие использования износостойких покрытий.

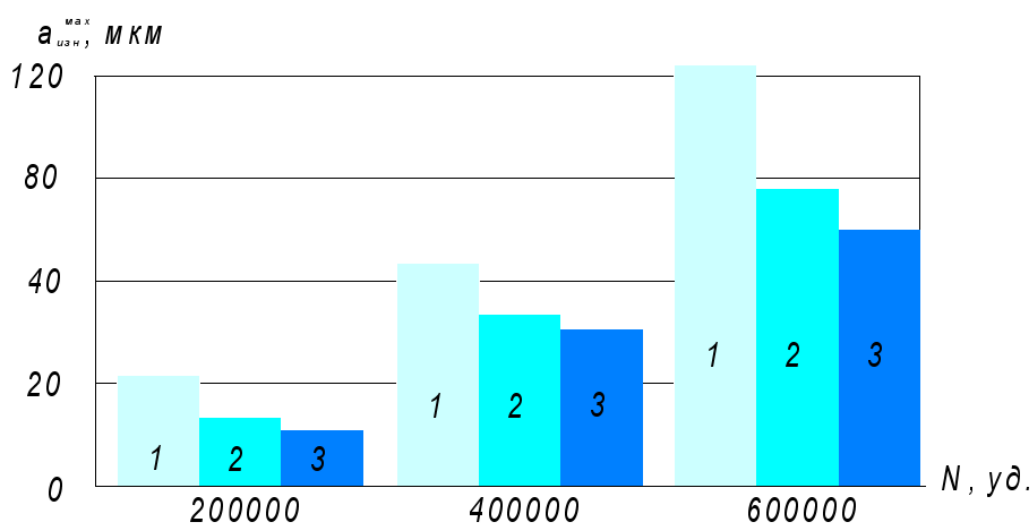


Рисунок 3.6 - Глубина максимального износа рабочей поверхности штампового инструмента $a_{\text{и}}$: 1 – б/п, 2 – TiN, 3 – TiZrN

При использовании износостойких покрытий на основе нитрида титана TiN и TiZrN наблюдается снижение глубины максимального износа, при этом имеет место более равномерный износ с увеличением количества рабочих циклов до появления дефектов на поверхности инструмента, т.е. с использованием покрытий обеспечивается более стабильная работа инструмента – износ протекает равномерно, обеспечивая тем самым повышение работоспособности штамповой оснастки.

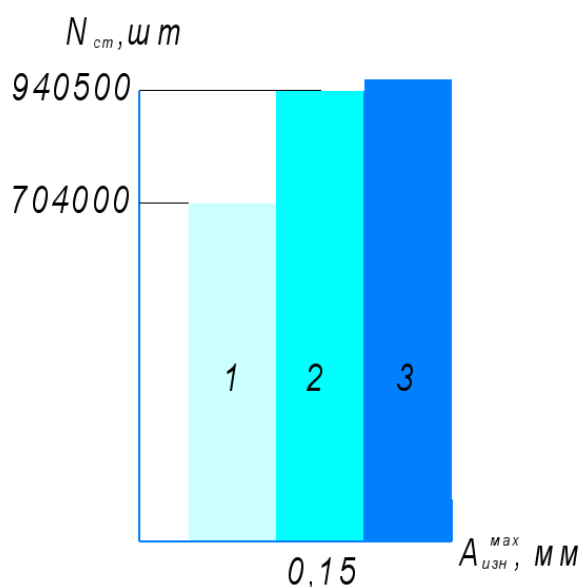


Рисунок 3.7 - Стойкость в циклах штампового инструмента $N_{ст}$ при максимальной глубине износа $A=0,15$ мм:
1 – б/п, 2 – TiN, 3 – TiZrN

Нанесение износостойких покрытий снижает длину изношенной зоны ($b_{и}$) и максимальную глубину износа ($a_{и}$) (рисунки 3.5, 3.6). Так, отмечено, что после 600000 циклов работы штампового инструмента с износостойким покрытием длина изношенной зоны меньше в 1,25 раза, а максимальная глубина износа на 30%. При этом максимальное снижение износа наблюдалось при использовании покрытия TiZrN. Повышение стойкости штампового инструмента при нанесении покрытий при глубине износа равной 0,15 мм составило 30%.

3.2. Численное моделирование процесса изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента на операции «вырубка»

Аналогично операции «вытяжка с принудительным утонением» было проведено численное моделирование процесса «вырубка», при котором инструмент работает на удар, с использованием штампового инструмента с износостойким покрытием на основе нитрида титана.

При численном моделировании процесса изнашивания штампового инструмента на операции «вырубка» было исследовано влияние износостойких покрытий на износ рабочей поверхности ($l_{ц}$ – длина износа по цилиндрической поверхности, $l_{т}$ – длина износа по торцевой поверхности, $a_{и}$ – максимальная глубина износа цилиндрической поверхности), контактные касательные (τ) и нормальные (σ) напряжения при различной величине межинструментального зазора и стойкость (N) пуансона для вырубки.

При численном моделировании операции «вырубка» также был произведен учет влияния технологического параметра – межинструментального зазора Z . Варьируемые параметры численного моделирования представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Варьируемые параметры численного моделирования

Параметр	Инструмент								
	Без покрытия			С покрытием TiN			С покрытием TiZrN		
Коэффициент износа K	$1.2 \cdot 10^{-6}$			$1.7 \cdot 10^{-6}$			$0,8 \cdot 10^{-7}$		
Межинструментальный зазор Z , мм	0,04	0,07	0,10	0,04	0,07	0,10	0,04	0,07	0,10

Схема износа рабочей поверхности штампового инструмента представлена на рисунке 3.8.

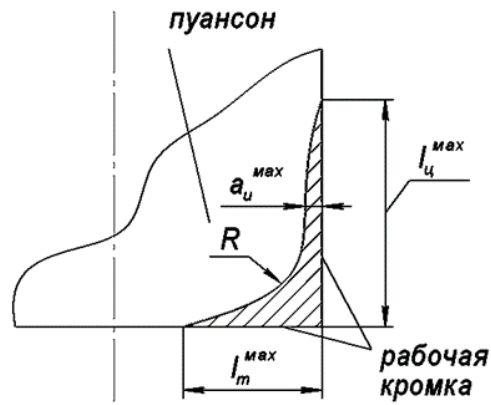


Рисунок 3.8 - Схема износа рабочей поверхности штампового инструмента при вырубке ($R \leq 0,1$ мм): $l_{ц}^{max}$ – длина износа по цилиндрической поверхности, $l_{т}^{max}$ – длина износа по торцовой поверхности, $a_{ц}^{max}$ – максимальная глубина износа цилиндрической поверхности

Результаты численного моделирования представлены на рисунке 3.9. Анализ результатов численного моделирования показал, что при использовании покрытий на основе нитрида титана снижается глубина и интенсивность износа рабочих кромок деформирующего инструмента (пуансонов для вырубке). При этом наибольшую эффективность, так же, как и на операции «вытяжка с принудительным утонением» имеет покрытие TiZrN.

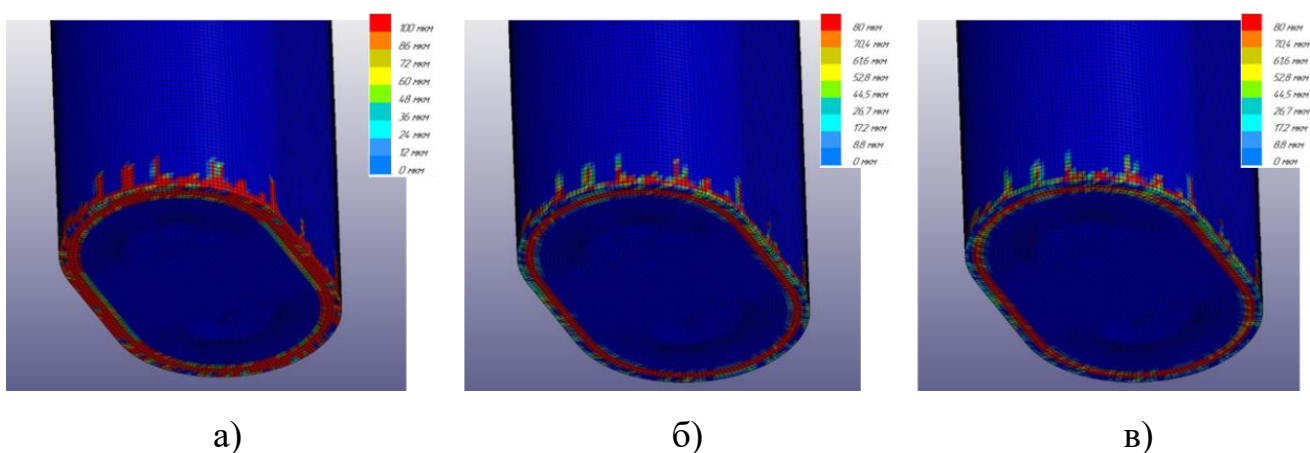


Рисунок 3.9 - Результаты численного моделирования износа рабочей поверхности пуансона при вырубке после 400000 циклов работы штампового инструмента: а – б/п, б - TiN, в - с TiZrN

По результатам численного моделирования построены соответствующие графические зависимости и номограммы, представленные на рисунках 3.10 и 3.11.

Установлено, что нанесение износостойкого покрытия уменьшает величину контактных касательных напряжений на 30% и нормальных напряжений на 7% (рисунок 3.10). При этом, как и в случае с операцией «вытяжка с принудительным утонением», большее снижение значений контактных напряжений имело место при использовании покрытия TiZrN.

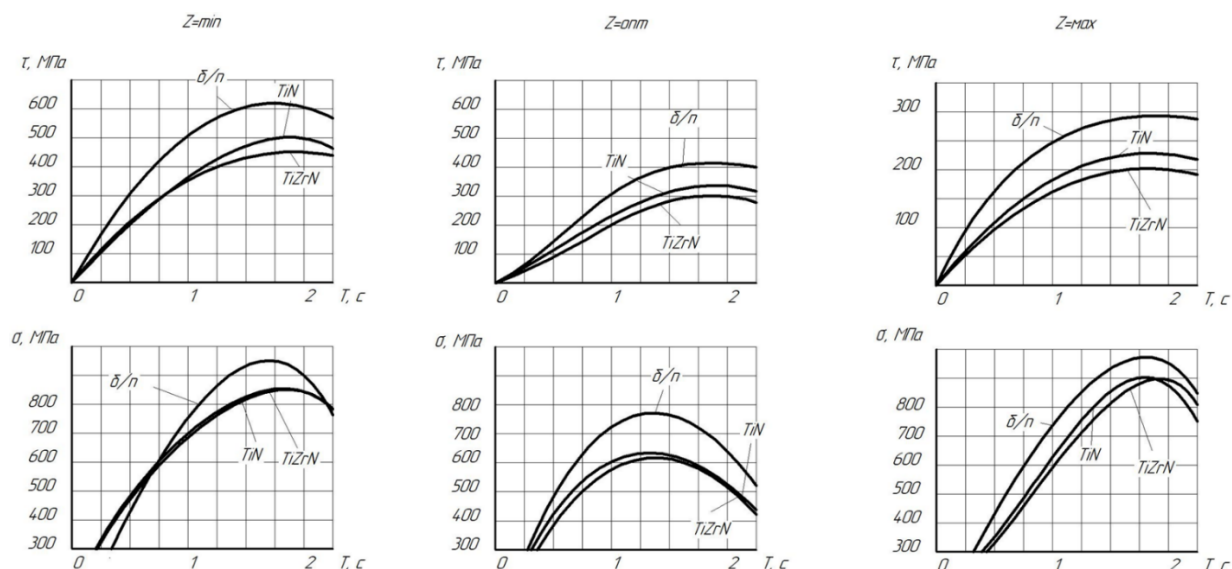


Рисунок 3.10 - Аппроксимированные зависимости касательных τ (а) и нормальных σ (б) напряжений на поверхности рабочего инструмента от времени рабочего хода T

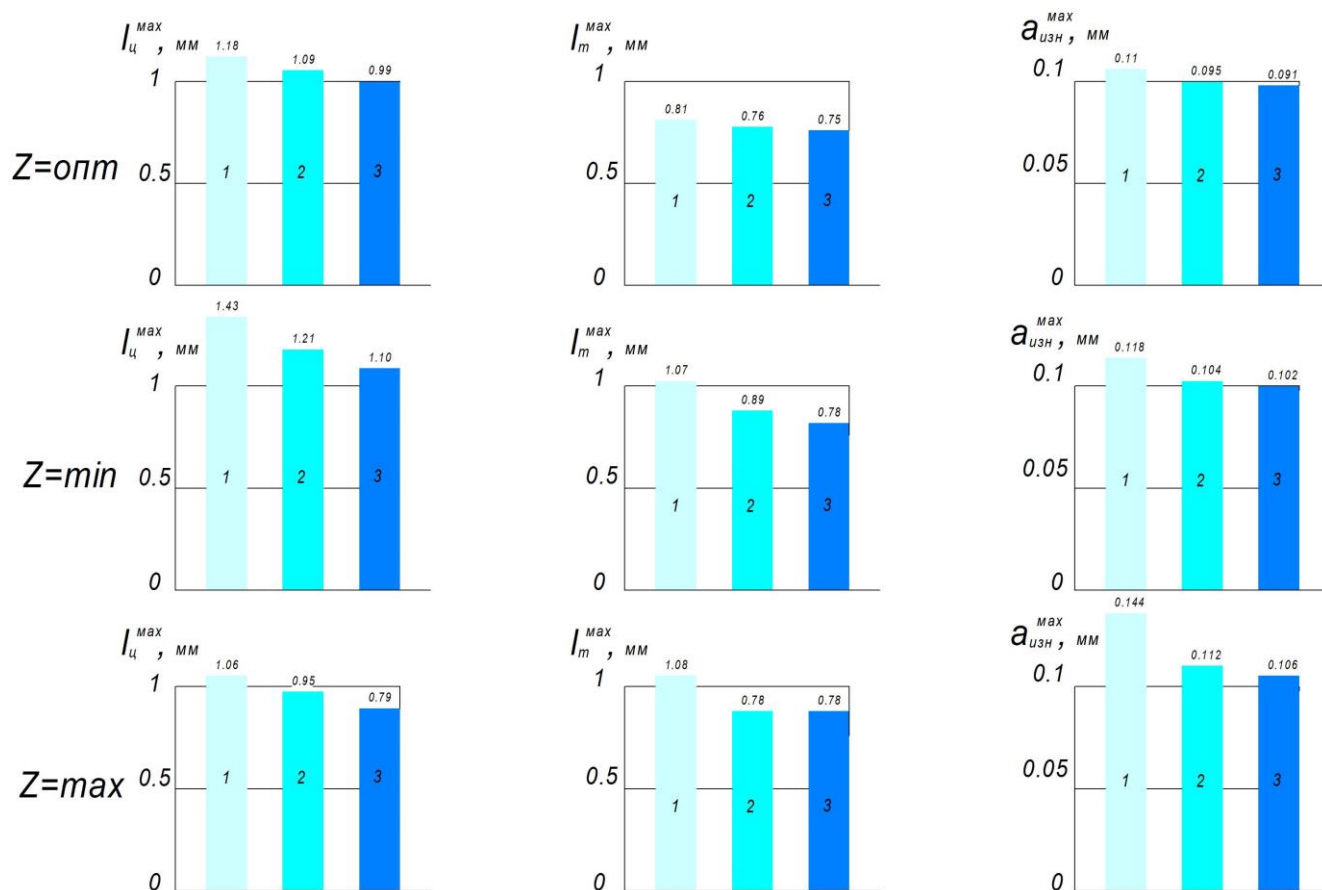


Рисунок 3.11 - Влияние покрытий на длину износа по цилиндрической ($l_{ц}$), торцовой (l_m) поверхности и глубину износа цилиндрической поверхности ($a_{ц}$):

1 – б/п, 2 - TiN, 3 – TiZrN

Нанесение износостойких покрытий TiN и TiZrN снижает параметры износа - длины износа по цилиндрической ($l_{ц}$), торцовой (l_m) поверхности и глубины износа цилиндрической поверхности ($a_{ц}$). При этом отмечается увеличение значений измеряемых параметров износа на (20-40) % при отклонении технологического параметра – межинструментального зазора от оптимальных значений – (4-7) % от толщины материала. Это объясняется изменением условий деформирования в рабочей зоне – прежде всего, созданием «мягкой» схемы НДС (снижение контактных напряжений) и уменьшением коэффициента трения.

Так, после 400000 циклов работы штампового инструмента снижение износа рабочих поверхностей по цилиндрической ($l_{ц}$) и торцовой (l_m) поверхностям составило (11-28) %, а глубины износа ($a_{ц}$) – (23-27) %. Повышение стойкости

штампового инструмента при нанесении износостойких покрытий при глубине износа $a_{и}=0,1$ мм составило на уровне (1,22-1,26) раза. При этом, наибольшее снижение износа рабочей поверхности и повышение стойкости штампового инструмента наблюдалось при нанесении покрытия TiZrN. Таким образом, можно сделать вывод о том, что нанесение износостойких покрытий снижает износ рабочих поверхностей штампового инструмента (рисунок 3.11).

Проведенное численное моделирование позволило определить оптимальное значение межинструментального зазора, который составил (4-7) % от толщины материала. Установлено (см. рисунок 3.11), что отклонение величины межинструментального зазора от оптимального значения вызывает рост контактных напряжений на рабочей поверхности штампового инструмента, что приводит к увеличению значений параметров износа на (20-40) %.

По результатам численного моделирования путем обработки расчетных данных в статистической графической системе Statgraphics были получены регрессионные модели, позволяющие производить оценку НДС и износа рабочей поверхности инструмента с износостойкими покрытиями с целью разработки технологических рекомендаций на проектирование и производство инструмента с покрытием.

Основными технологическими откликами являлись: $Y_1=f(X_1; X_2)$ – нормальное напряжение (σ) и касательное напряжение (τ). В качестве основных факторов принимаем: $X_1=Z/S \in [0,04...0,10]$ – относительный зазор; X_2 =длины износа по цилиндрической ($l_{ц}$), торцовой (l_m) поверхности.

В таблицах 3.2-3.5 представлены результаты исследования по выявлению функциональной связи нормальных и касательных напряжений от изменения длины износа по цилиндрической ($l_{ц}$), торцовой (l_m) поверхности, а также технологического параметра Z/s (где Z – величина межинструментального зазора, s – толщина материала заготовки, X_1 – длина износа по цилиндрической или торцовой поверхности, X_2 – отношение Z/s)

Таблица 3.2 - Количественное выражение исследуемых функциональных связей

Покрытие	X1	X2	Y1
	Относительный зазор Z/S	Длина износа по цилиндрической (Ц) поверхности, мм	Нормальное напряжение σ , МПа
б/п	0,05	1.43	610
	0,10	1.18	402
	0,15	1.06	299
TiN	0,05	1.21	498
	0,10	1.09	320
	0,15	0.95	220
TiZrN	0,05	1.10	440
	0,10	0.99	299
	0,15	0.79	203

Таблица 3.3 - Количественное выражение исследуемых функциональных связей

Покрытие	X1	X2	Y1
	Относительный зазор Z/S	Длина износа торцевой (Т) поверхности, мм	Нормальное напряжение σ , МПа
б/п	0,05	1.07	610
	0,10	0.81	402
	0,15	1.08	299
TiN	0,05	0.89	498
	0,10	0.76	320
	0,15	0.78	220
TiZrN	0,05	0.78	440
	0,10	0.75	299
	0,15	0.76	203

Таблица 3.4 - Количественное выражение исследуемых функциональных связей

Покрытие	X1	X2	Y1
	Относительный зазор Z/S	Длина износа по цилиндрической (Ц) поверхности, мм	Касательное напряжение τ , МПа
б/п	0,05	1.43	940
	0,10	1.18	770
	0,15	1.06	965
TiN	0,05	1.21	840
	0,10	1.09	625
	0,15	0.95	904
TiZrN	0,05	1.10	837
	0,10	0.99	614
	0,15	0.79	899

Таблица 3.5 - Количественное выражение исследуемых функциональных связей

Покрытие	X1	X2	Y1
	Относительный зазор Z/S	Длина износа торцевой (Т) поверхности, мм	Касательное напряжение τ , МПа
б/п	0,05	1.07	940
	0,10	0.81	770
	0,15	1.08	965
TiN	0,05	0.89	840
	0,10	0.76	625
	0,15	0.78	904
TiZrN	0,05	0.78	837
	0,10	0.75	614
	0,15	0.76	899

При построении 2-факторной степенной модели $Y_1=f(X_1;X_2)$ рассмотрена степенная модель зависимости отклика от факторов:

$$Y = AX_1^{b^a} \cdot X_2^{b^z} \quad (3.1)$$

В соответствии с планом полнофакторного эксперимента $N=2^n$ на двух уровнях варьирования был проведен анализ влияния определяющих факторов на нормальное напряжение (σ) и касательное напряжение (τ).

В соответствии с планом эксперимента и двукратной воспроизводимостью каждой точки статистическая обработка полученных результатов проведена при использовании стандартной программы регрессионного и дисперсионного анализа по методу наименьших квадратов.

В результате расчётов была получены следующие регрессионные модели, представленные в таблице 3.6.

Таблица 3.6 - Уравнения регрессии износа рабочей поверхности

Функция	Без покрытия	С покрытием TiN	С покрытием TiZrN
	Уравнение регрессии	Уравнение регрессии	Уравнение регрессии
Нормальные напряжения: $\sigma = f(Z/s, l_m)$	$y = 554,509 - 3129,81 \cdot x_1 + 198,113 \cdot x_2$	$y = 145,6 - 2208 \cdot x_1 + 520 \cdot x_2$	$y = -330,25 - 2145 \cdot x_1 + 1125 \cdot x_2$
Касательные напряжения: $\tau = f(Z/s, l_m)$	$y = 194,057 + 181,132 \cdot x_1 + 688,679 \cdot x_2$	$y = -2304,2 + 4262,67 \cdot x_1 + 3293,33 \cdot x_2$	$y = -9227 + 3160 \cdot x_1 + 12700 \cdot x_2$
Нормальные напряжения: $\sigma = f(Z/s, l_{ц})$	$y = -238,923 - 121,538 \cdot x_1 + 807,692 \cdot x_2$	$y = 5863 - 12920 \cdot x_1 - 3900 \cdot x_2$	$y = 1186 - 3920 \cdot x_1 - 500 \cdot x_2$
Касательные напряжения: $\tau = f(Z/s, l_{ц})$	$y = -3806,92 + 10638,5 \cdot x_1 + 2807,69 \cdot x_2$	$y = 33906 + 63580 \cdot x_1 - 24700 \cdot x_2$	$y = 7889,78 - 16877,8 \cdot x_1 - 5644,44 \cdot x_2$

Используя полученные модели, были построены графики, представленные на рисунках 3.12-3.15, учитывающие функциональную зависимость нормальных и касательных напряжений от изменения длины износа по цилиндрической ($l_{ц}$), торцевой (l_m) поверхности, а также технологического параметра Z/s (где Z – величина межинструментального зазора, s – толщина материала заготовки, X_1 – длина износа по цилиндрической или торцевой поверхности, X_2 – отношение Z/s).

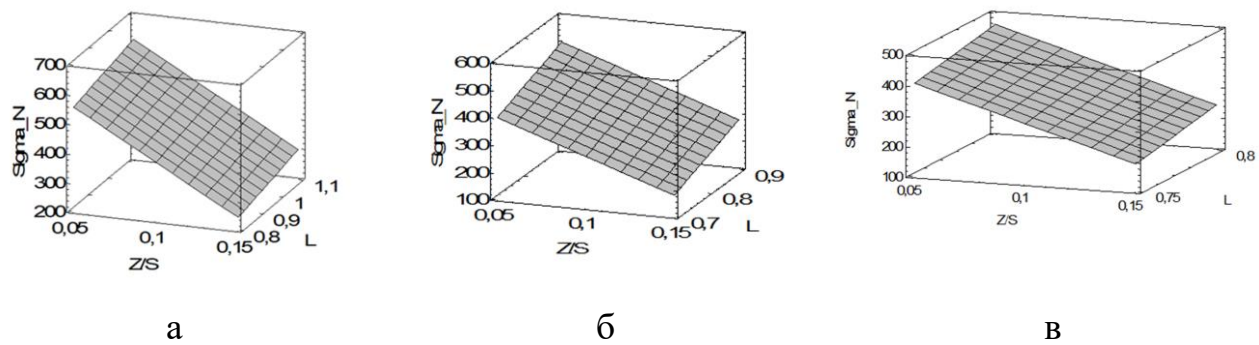


Рисунок 3.12 - Влияние технологического параметра (Z/s) и длины износа по торцовой поверхности (l_m) на нормальные напряжения (σ):

а – без покрытия, б – TiN, в – TiZrN

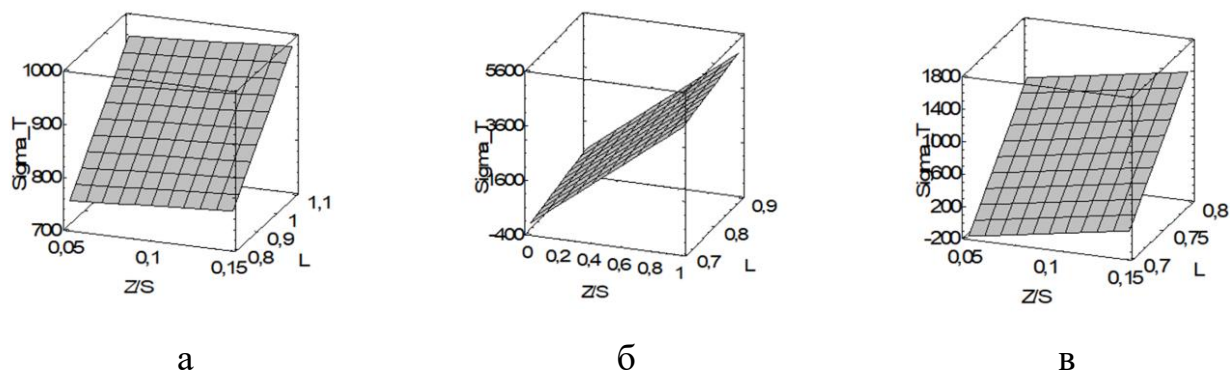


Рисунок 3.13 - Влияние технологического параметра (Z/s) и длины износа по торцовой поверхности (l_m) на касательные напряжения (τ):

а – без покрытия, б – TiN, в – TiZrN

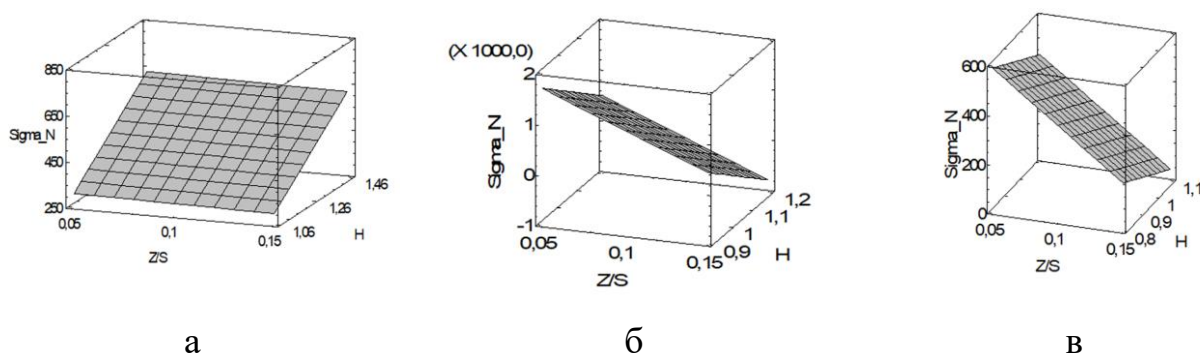


Рисунок 3.14 - Влияние технологического параметра (Z/s) и длины износа по цилиндрической поверхности ($l_{ц}$) на нормальные напряжения (σ):

а – без покрытия, б – TiN, в – TiZrN

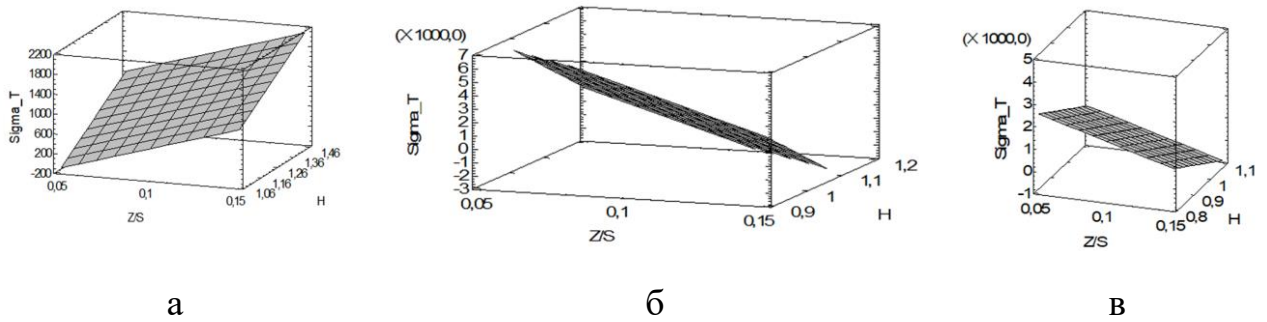


Рисунок 3.15 - Влияние технологического параметра (Z/s) и длины износа по цилиндрической поверхности ($l_{ц}$) на касательные напряжения (τ):

а – без покрытия, б – TiN, в – TiZrN

Проведенные исследования позволили установить функциональную связь между показателями износа рабочих поверхностей пуансонов и технологического параметра – межинструментального зазора и НДС на поверхности инструмента, что позволяет находить уточненные рациональные допуски зазоров при вырубке основных конструкционных сталей.

Установлено (см. рисунки 3.12-3.15), что при минимальном зазоре и использовании износостойких покрытий происходит: снижение контактных нормальных напряжений (σ) на 12% и касательных напряжений (τ) на 34%.

При максимальном зазоре происходит: снижение контактных нормальных напряжений (σ) на 6% и касательных напряжений (τ) на 17%, при этом глубина износа увеличивается на (10-15) % вследствие создания «жесткой» схемы деформирования (интенсивная деформация и высокие значения контактного трения).

Установлено, что зазор в диапазоне (4-7) % позволяет снизить значения контактных нормальных напряжений (σ) на 35% и касательных напряжений (τ) на 12%, при этом износ по контактным поверхностям снижается на (8-14) %. При этом установлено, что износ по контактным поверхностям при оптимальном зазоре снижается на 7 % по сравнению с минимальным и на 9% по сравнению с максимальным.

Анализ проведенных исследований позволяет отметить следующее: при отклонении межинструментального зазора от установленных диапазонов происходит увеличение значений контактных напряжений и образование «жестких» схем, что приводит к интенсификации износа рабочей поверхности инструмента.

3.3. Исследование влияния межинструментального зазора на напряженно-деформированное состояние в очаге деформации

Существенное значение в вопросе повышения качества изделий, полученных при разделительных операциях, оказывает величина зазора между рабочими частями штампа. Межинструментальный зазор, определяющий характер НДС, оказывает решающее влияние на качество поверхности среза, размерную точность получаемых деталей, величину потребного усилия деформирования, износ и стойкость штампа.

При разделительных операциях наблюдается образование дефектов на торцевой поверхности детали в виде заусенцев. Это, во-первых, отрицательно сказывается на качестве полученных деталей, во-вторых, снижает стойкость штамповой оснастки (пуансона и матрицы) за счёт деформации острыми кромками заусенцев шлифованных поверхностей пуансона и матрицы, включая образование царапин на образующих рабочих поверхностях (рисунок 3.16). При этом, вследствие недостаточной жесткости системы «пресс-штамп-деталь» могут создаваться условия образования неравномерного межинструментального зазора, что приводит к формированию некачественной поверхности разделения металла [87-89].

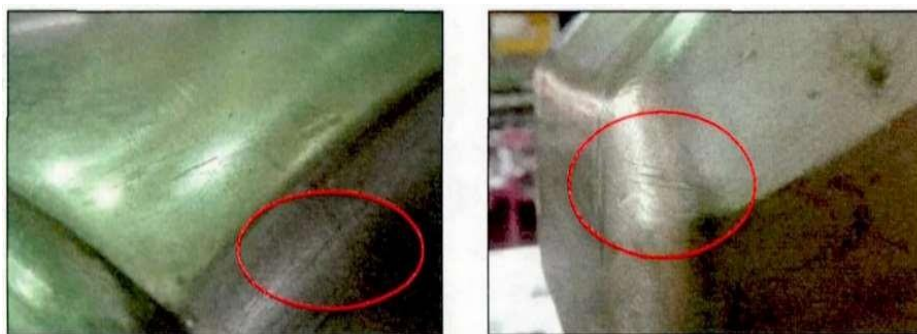


Рисунок 3.16 - Дефекты на рабочих поверхностях инструмента [87]

На рисунке 3.17 представлен дефект вырубki, при котором часть контура вырубаемой детали может получиться удовлетворительной, другая часть может иметь заусенец вследствие неравномерного межинструментального зазора.



Рисунок 3.17 - Образование заусенцев при неравномерном межинструментальном зазоре

В современной научно-технической литературе имеется значительное количество информации, определяющей требования к качеству поверхности разделения, которые заключаются в том, чтобы поверхность среза была без дефектов (рванин, трещин, заусенцев), причем, диапазон рекомендуемого зазора имеет самый широкий спектр значений [90-92].

Например, в работах российских авторов Ю.А. Аверкиева и В.И. Кухтарова [90] приводятся данные по величине одностороннего зазора для различных материалов на уровне 0,04 мм при толщине материала 1 мм. Р.А. Головин, А.Г. Навроцкий и др. [88] предлагают выбирать зазор в диапазоне (3-6) % от толщины

заготовки для мало- и среднеуглеродистых сталей. Для заготовок из низкоуглеродистой стали толщиной 0,5...1,5 мм в работах Л.И. Рудмана и М.Е. Зубцова [91,92] приведена рекомендуемая величина одностороннего зазора, которая составляет (4-16) % от толщины материала.

При этом величина межинструментального зазора определена неоднозначно с сильно дифференцированными допустимыми интервалами значений. Л.И. Рудман в своей работе [91] для стали 08 толщиной $S=1,0$ мм рекомендует назначать межинструментальный зазор в диапазоне $(0,05\div 0,07)$ мм. В свою очередь, в работах М.Е. Зубцова [92] для аналогичного материала одинаковой толщины межинструментальный зазор составляет $(0,04\div 0,08)$ мм.

Таким образом, назначение рациональной величины межинструментального зазора является важной технической задачей, определяющей как качество получаемой поверхности вырубаемых деталей, так и износостойкость самого штампа.

3.3.1. Экспериментальное исследование и анализ влияния межинструментального зазора на качество изделий, получаемых на разделительных операциях

Были выполнены стендовые экспериментальные исследования по определению функциональных связей между маркой материала, величиной заусенца, межинструментальным зазором и усилием вырубки. Для проведения эксперимента использовали полосы из наиболее широко используемых марок сталей машиностроительного назначения: сталь 08 (ГОСТ 9045-80), сталь 20 (ГОСТ 4041-71), сталь 45 (ГОСТ 1050-88).

Для проведения исследования влияния величины межинструментального зазора на высоту заусенца и технологическое усилие использовали специализированную оснастку, представленную на рисунке 3.18, состоящую из деформирующего пуансона, вырубной матрицы и прижима.



а

б

Рисунок 3.18 - Экспериментальная вырубная оснастка:

а) блок штампа с матрицей и пуансонами различных диаметров;

б) штамп вырубки в процессе штамповки

В качестве заготовок использовали полосы из углеродистой стали шириной $B=30$ мм, толщиной $S=1$ мм.

Было исследовано влияние величины межинструментального зазора (Z) и величины сопротивления срезу ($\sigma_{ср}$) на характер образования заусенцев. В качестве регистрируемого параметра принята высота заусенца ($h_{заус}$) и фактическое технологическое усилие (P).

При проведении экспериментальных исследований использовали следующее оборудование и инструмент: испытательная машина УМ-50 (выполнение разделительной операции (вырубки)), микрометр (измерение высоты заусенца), ЭВМ (статистическая обработка результатов, выполнение расчетов, построение графиков зависимостей). Результаты стендовых экспериментальных исследований сведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 - Влияние межинструментального зазора на высоту заусенца и усилие вырубki

№ обр	Материал	$\sigma_{ср}$, МПа	S, мм	D _м , мм	d _п , мм	Z, мм	P, тс	h _{заусс1} , мм	h _{заусс2} , мм	h _{ср} , мм
1	Сталь 08	280	1,0	24,8	24,7	0,05	3,42	0,1	0,18	0,14
2						2,78	0,14	0,3	0,18	
3						2,36	0,18	0,34	0,23	
4	Сталь 20	360				0,05	4,2	0,12	0,2	0,16
5						3,48	0,14	0,22	0,22	
6						2,98	0,18	0,28	0,26	
7	Сталь 45	550	1,0	24,8	24,7	0,05	4,92	0,22	0,34	0,28
8						4,28	0,32	0,4	0,36	
9						3,56	0,44	0,56	0,5	

D_м- диаметр матрицы; d_п- диаметр пуансона.

На рисунках 3.19-3.21 представлена графическая интерпретация результатов экспериментов по выявлению функциональных связей величины межинструментального зазора (Z) и величины сопротивления срезу ($\sigma_{ср}$) с высотой заусенца (h_{заус}) и фактическим технологическим усилием (P).

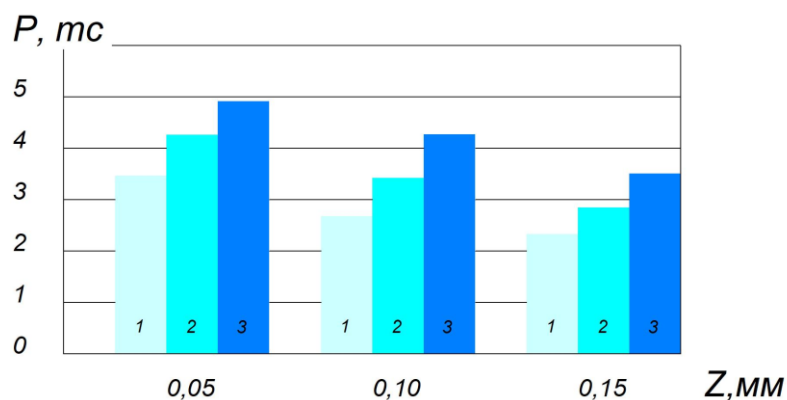


Рисунок 3.19 - Влияние межинструментального зазора (Z) на усилие вырубki (P): 1 — сталь 08; 2 — сталь 20; 3 — сталь 45

Установлено (рисунок 3.19), что с увеличением межинструментального зазора (Z) с 0,05 мм до 0,15 мм наблюдается уменьшение значений величины технологического усилия (P). Так, для заготовок из стали 08 при Z=0,05 мм усилие

(P) составило 3,42 тоннсил, в то время как при $Z=0,15$ мм усилие (P) составляет 2,36 тс. Аналогичный характер изменения зависимостей сохраняется и для сталей 20 и 45.

На рисунке 3.20 показано влияние межинструментального зазора на среднюю величину заусенца. Установлено, что с увеличением зазора (Z) с 0,05 мм до 0,15 мм наблюдается рост значений средней величины заусенца (h_{cp}) для заготовок из сталей 08, 20 и 45. Так, для заготовок из стали 20 при $Z=0,05$ мм средняя величина заусенца (h_{cp}) составила 0,16 мм, в то время как при $Z=0,15$ мм $h_{cp} = 0,23$ мм ($\Delta=0,07$ мм; 30%).

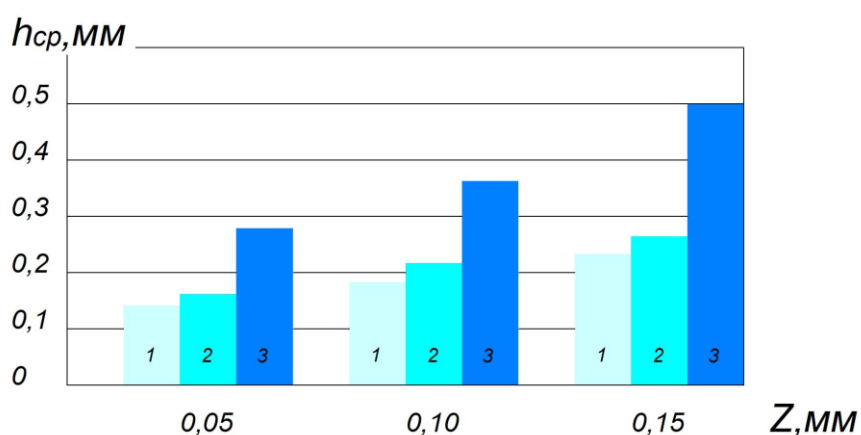


Рисунок 3.20 - Влияние параметра межинструментального зазора Z на среднюю величину заусенца h_{cp} :

1 — сталь 08; 2 — сталь 20; 3 — сталь 45

Установлено, что в зависимости от группы стали, наблюдается различие интенсивности увеличения высоты заусенца (h_{cp}) увеличивается с увеличением содержания углерода в стали.

Было изучено влияние величины сопротивления срезу σ_{cp} на среднюю величину заусенца h_{cp} (рисунок 3.21). Выявлено, что с увеличением величины сопротивления срезу (σ_{cp}) с 280 МПа до 550 МПа наблюдается повышение средней величины заусенца (h_{cp}). Так, при $\sigma_{cp}=280$ МПа (сталь 08) средняя величина заусенца (h_{cp}) составила 0,14 мм, в то время как при $\sigma_{cp}=550$ МПа (сталь 45) (h_{cp}) – 0,28 мм ($\Delta=0,14$ мм; 50%). Для заготовок из стали 08 наблюдается первоначальное

резкое увеличение средней высоты заусенца до значения зазора $Z=0,1$ мм, затем интенсивность роста заусенца снижается. Для заготовок из сталей 20 и 45, ввиду большего в них содержания углерода, и, следовательно, увеличения твердости и хрупкости, увеличение заусенца до значения зазора $Z=0,1$ мм незначительно. При дальнейшем увеличении зазора Z с 0,1 до 0,15 мм наблюдается интенсивное увеличение средней высоты заусенца (рисунок 3.21).

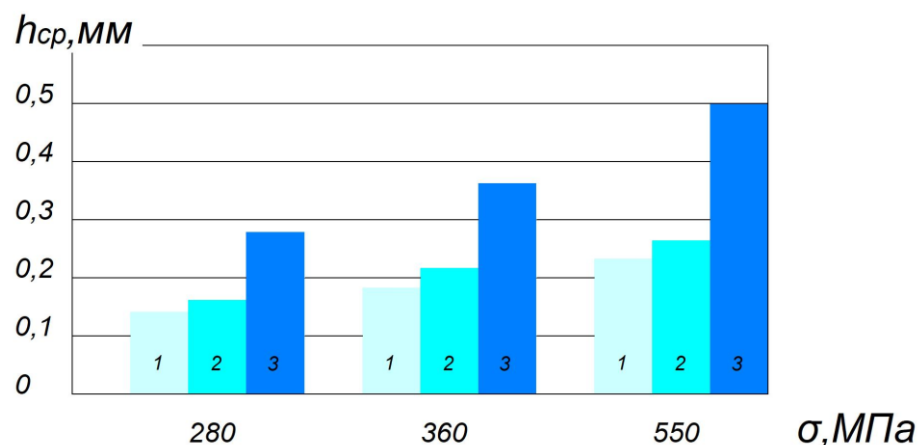


Рисунок 3.21 - Влияние величины сопротивления срезу σ_{cp} на среднюю величину заусенца h_{cp} :

1 — зазор 0,05мм; 2 — зазор 0,1мм; 3 — зазор 0,15мм

Полученные в ходе эксперимента данные позволяют сделать вывод, что увеличение межинструментального зазора с 0,05 мм до 0,15 мм ведет к уменьшению величины технологического усилия ($P=f(Z)$) и увеличению средней величины заусенца ($h_{cp}=f(Z)$). Также на среднюю величину заусенца оказывает серьезное влияние величина сопротивления срезу.

Проведенные исследования позволили установить величину рекомендуемого межинструментального зазора (Z) при вырубке заготовок из сталей марок 08, 20 и 45, который должен составлять (4-7) % от толщины материала.

Определенный диапазон межинструментального зазора обеспечивает снижение «жесткости» процесса разделения в очаге деформации при вырубке листового материала.

Установленные значения межинструментального зазора могут быть использованы для выявления рациональных режимов деформирования при исследовании процессов износа рабочих поверхностей штампового инструмента с износостойкими покрытиями на основе нитрида титана.

3.3.2. Разработка модели разделения металла при вырубке (пробивке)

Изучали влияние величины межинструментального зазора (Z) и величины сопротивления срезу ($\sigma_{ср}$) на характер нагружения в очаге деформации. В качестве регистрируемого параметра (отклика) принята высота заусенца ($h_{заус}$).

Основными технологическими откликами, выделенными в настоящих исследованиях, являлись: $Y_1=f(X_1; X_2)$ – высота заусенца; $Y_2=f(X_1; X_2)$ – потребное усилие. В качестве основных факторов принимаем: $X_1=Z/S \in [0,05...0,15]$ – относительный зазор; $X_2=\sigma_{ср}/\sigma_{сртехн.жел} \in [1,12...2,2]$ – относительная величина $\sigma_{ср}$.

В таблице 3.8 представлены результаты экспериментального исследования по выявлению функциональной связи высоты заусенца от сопротивления срезу и межинструментального зазора: $h_{заус}=f(Z, \sigma_{ср})$.

Таблица 3.8 - Количественное выражение исследуемых функциональных связей

№	Материал	Форма детали, мм	Варьируемые параметры				Отклик
				X1		X2	Y1
			Односторонний зазор Z , мм	Относительный зазор Z/S	Напряжение среза $\sigma_{ср}$, МПа	Относительная величина $\sigma_{ср}/\sigma_{ср техн. жел.}$	Высота заусенца $h_{заус}$, мм
1	Сталь 08	Круг, $D=30$ мм	0,05	0,05	280	1,12	0,14
			0,10	0,10			0,18
			0,15	0,15			0,23
2	Сталь 20	Круг, $D=30$ мм	0,05	0,05	360	1,44	0,16
			0,10	0,10			0,22
			0,15	0,15			0,26
3	Сталь 45	Круг, $D=30$ мм	0,05	0,05	550	2,2	0,28
			0,10	0,10			0,36
			0,15	0,15			0,5

При построении 2-факторной степенной модели $Y=f(Z/S; \sigma_{\text{ср}}/\sigma_{\text{сртехн.жел}})$ рассмотрена степенная модель зависимости отклика от факторов аналогично, как и в п. 3.2.

В соответствии с планом полнофакторного эксперимента $N=n^2$ на двух уровнях варьирования был проведен анализ влияния определяющих факторов: Z/S , $\sigma_{\text{ср}}/\sigma_{\text{сртехн.жел}}$ на высоту заусенца и потребное усилие. Матрица планирования полнофакторного эксперимента представлена в таблице 3.9.

Таблица 3.9 - Матрица планирования эксперимента типа $N=n^2$ ($n=2$)

№ опыта	Варьируемые параметры		Регистрируемый отклик
	X_1 (Относительный зазор Z/S)	X_2 (Относительная величина $\sigma_{\text{ср}}/\sigma_{\text{ср}}$)	Y_1 (Высота заусенца $h_{\text{заус}}$, мм)
1	0,15(+)	2,2(+)	0,5
2	0,15(+)	1,12(-)	0,26
3	0,05(-)	2,2(+)	0,28
4	0,05(-)	1,12(-)	0,14

В соответствии с планом эксперимента и двукратной воспроизводимостью каждой точки статистическая обработка полученных результатов проведена при использовании стандартной программы регрессионного и дисперсионного анализа по методу наименьших квадратов.

В таблице 3.10 приведены результаты статистического анализа коэффициентов регрессии.

Таблица 3.10 - Коэффициенты регрессии

Переменная	Коэффициент	Значимость α
Константа А	1,0054	0,581
b_α	0,0081	0,009
b_z	0,0024	0,112
Коэффициент детерминации		0,949
Сумма квадратов остатков		2,83E-05
Значимость уравнения регрессии по критерию Фишера α		0,004

В результате расчётов была получена следующая регрессионная зависимость для определения высоты заусенца $h_{\text{заус}}$ (Y_1):

$$Y = -0,172222 + 1,65 * x_1 + 0,180556 * x_2 \quad (3.2)$$

Среднеквадратичная ошибка модели (рисунок 3.22) составила $\varepsilon_{\text{кв}} = 0,000533$; доля объясненной дисперсии $R^2 = 99,6\%$; средняя относительная ошибка $A = 12,9\%$, уровень статистической значимости уравнения регрессии – $0,004$, статистическая значимость факторов X_1 и X_2 – $0,009$ и $0,112$ соответственно.

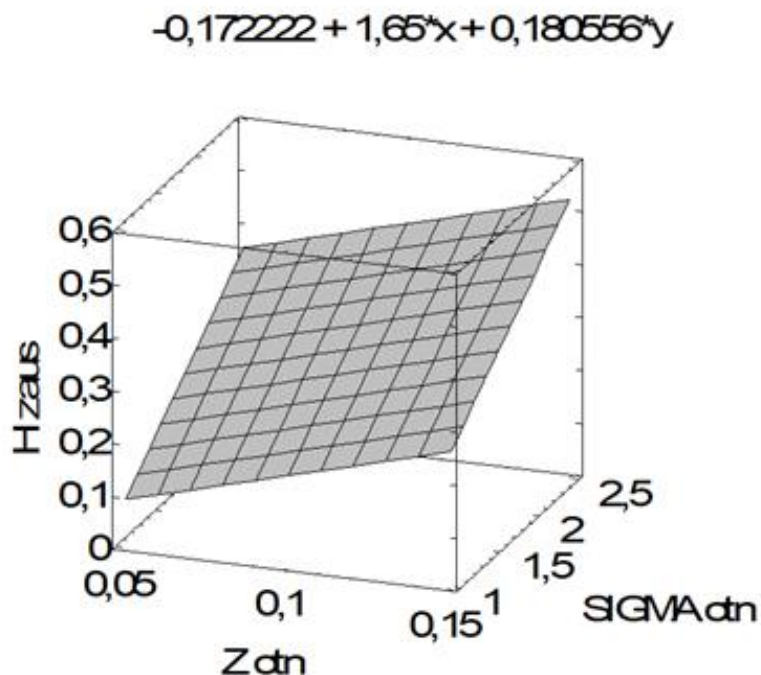


Рисунок 3.22 - Влияние межинструментального зазора Z и сопротивления срезу $\sigma_{\text{ср}}$ на высоту заусенца $h_{\text{заус}}$

Использование полученной регрессионной модели (формула 3.2) позволяет проводить инженерный расчет по управлению процессом разделения листового металла с обеспечением как высокого качества изделий (минимизация высоты заусенца), так и высокой стойкости рабочих поверхностей вырубных матриц и пуансонов за счет создания наиболее благоприятной «мягкой» схемы деформирования.

3.3.3. Исследование напряженного состояния металла в очаге деформации при изменении межинструментального зазора

Процесс вырубки характеризуется неоднородной схемой НДС с наличием как растягивающих, так и сжимающих напряжений. При этом, по толщине материала и этапах деформации наблюдаются как плоская, так и объёмная схемы НДС [2]. Значения и знак напряжений и деформаций «растяжение-сжатие» в очаге разделения определяют качество боковой поверхности среза, которая может быть обеспечена за счет варьирования величины межинструментального зазора. Управляя схемой НДС, можно прогнозировать продолжительность этапов разделения металла и характер разрушения в очаге деформации процесса вырубки при различных значениях межинструментальных зазоров.

Для анализа НДС в системе «заготовка - рабочий инструмент» в очаге деформирования была разработана расчетная КЭМ процесса вырубки по наружному контуру для тонколистового материала при реализации процесса пластического деформирования.

Моделирование процесса вырубки с использованием программного обеспечения LS-DYNA осуществлялось в следующей последовательности. Была построена конечно-элементная модель процесса разделения (рисунок 3.23) со следующими параметрами: диаметры пуансонов – (24,5; 24,6; 24,7) мм, диаметр рабочего отверстия матрицы 24,8 мм, межинструментальный зазор соответственно (0,15; 0,1; 0,05) мм, толщина вырубаемой заготовки 1 мм.

Были заданы следующие параметры процесса вырубки: тип материала – упругопластический, размер конечно-элементной сетки – (0,03x0,03) мм.

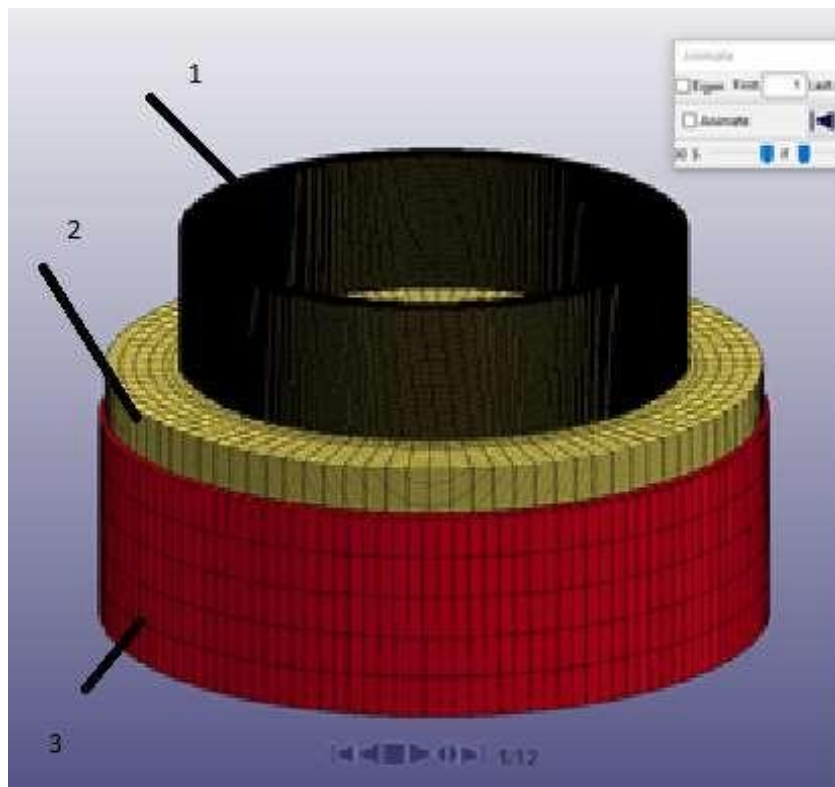


Рисунок 3.23 - Конечно-элементная 3D-модель процесса вырубki:
1 – пуансон (упрощенная модель), 2 – заготовка, 3 – матрица

Представленная модель позволяет оценить НДС рабочей зоны, однако, вследствие наличия большого количества расчетных элементов и наложенных ограничений, она требует длительного времени расчетов (от 12 до 48 часов) и является достаточно сложной для последующей модификации и корректировки. Для уменьшения времени расчета при одновременном уменьшении размеров ячеек конечно-элементной сетки был осуществлен переход к построению плоской двухмерной модели (рисунок 3.24).

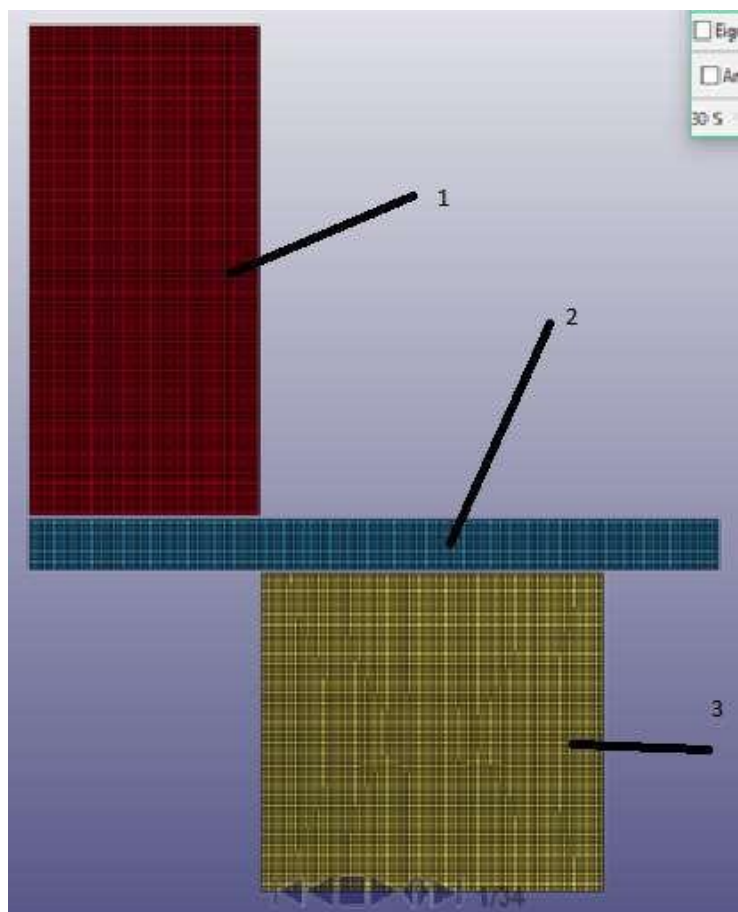


Рисунок 3.24 - 2D-модель процесса вырубki:

1 – заготовка, 2 – пуансон, 3 – матрица

Оптимизированная модель позволяет уменьшить размер ячеек конечно-элементной сетки до значений 0,01 мм, при этом стоит отметить, что модель, выполненная в виде сечения (т.н. плоская задача), позволяет без внесения большого числа итерационных корректировок преобразовывать данную модель под конкретные операции и габаритные размеры инструмента; определить НДС в отдельном сечении и произвести анализ распределения полей напряжений и деформаций на протяжении всего процесса штамповки с достаточно высокой точностью, что позволяет управлять процессом разделения листового металла и износа инструмента.

Для оценки рациональных величин межинструментального зазора для обеспечения минимальной высоты заусенца ($h_{\text{заус}}$) и минимального усилия деформирования (P) был проведен расчёт НДС с использованием программного

обеспечения LS-Dyna. В качестве исходного материала использовали стали 08, 20 и 45, толщина материала заготовки $S=1$ мм. Вырубку производили при величине зазора, равной 5%, 10% и 15% от толщины материала.

Для уменьшения погрешности вычисления использовали сетку в виде правильных многоугольников. Заготовку разбивали на 11374 прямоугольных конечных элемента. Алгоритм расчета:

- область, в которой ищется решение дифференциальных уравнений, разбивается на конечное количество подобластей (элементов);
- в каждом из элементов произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции;
- вне своего элемента аппроксимирующая функция равна нулю;
- значения функций на границах элементов (в узлах) являются решением задачи.

На рисунке 3.25 представлена блок-схема моделирования процесса вырубki (пробивки).

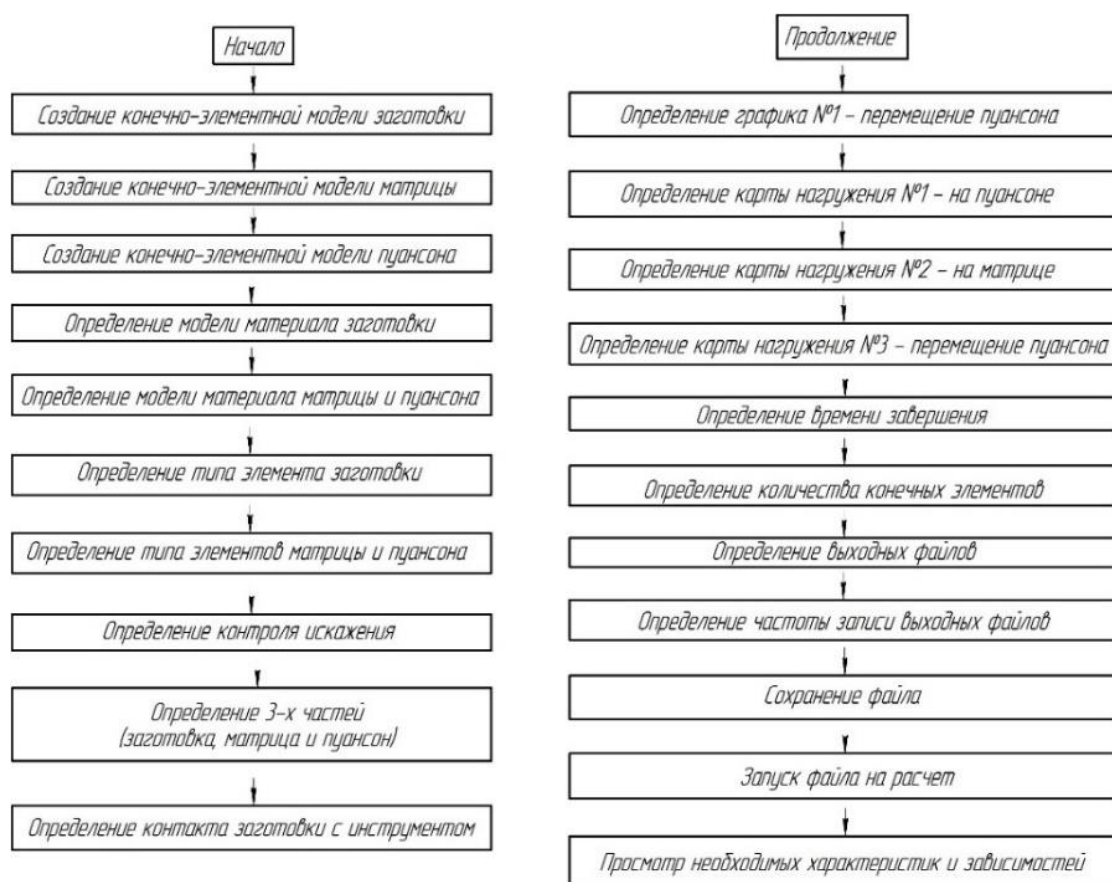
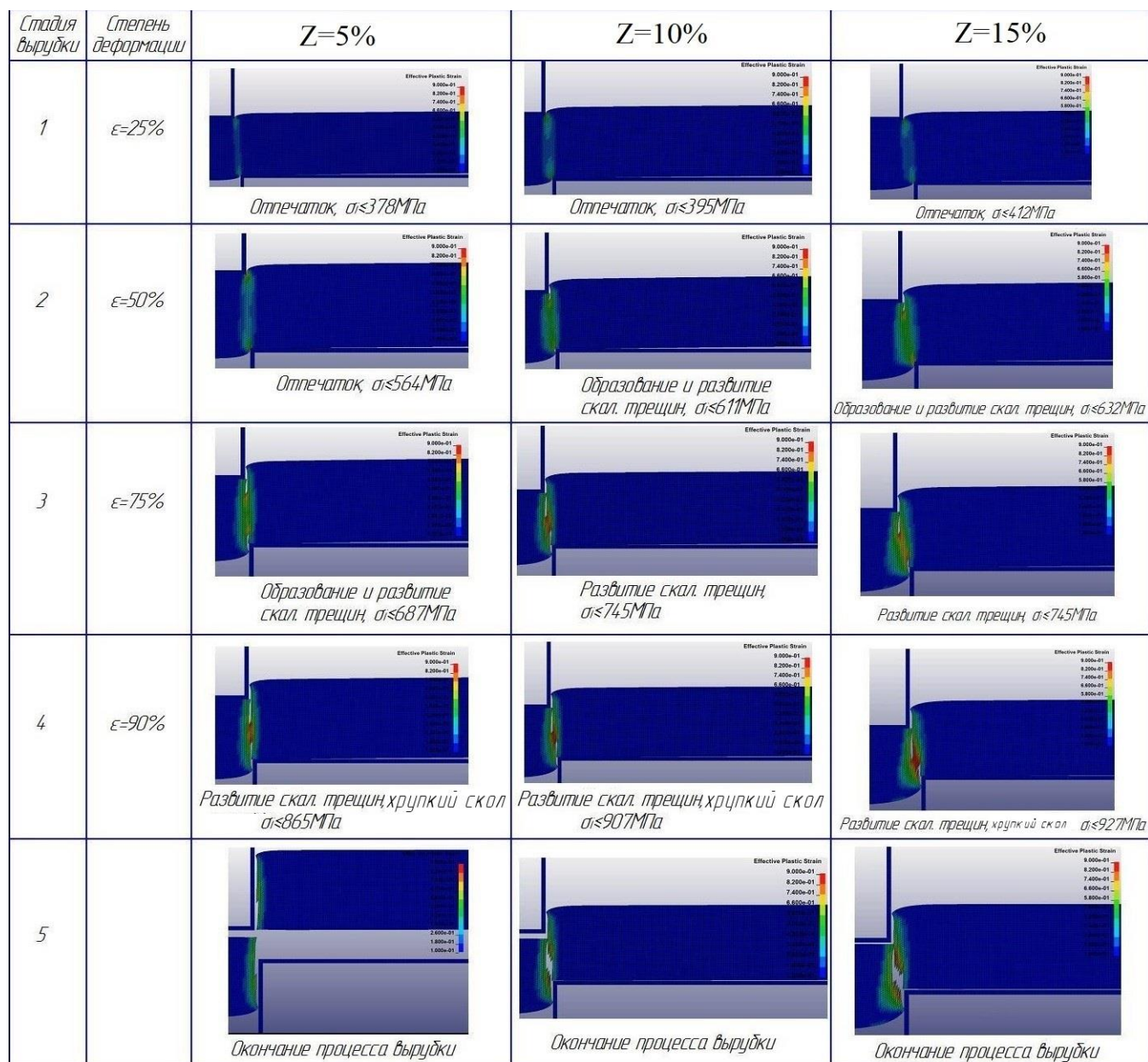


Рисунок 3.25 - Блок-схема моделирования процесса вырубki (пробивки)

В результате расчетов выявлено пять характерных стадий процесса вырубki, отличающихся между собой, как характером деформации металла (упругая, упругопластическая, срез), так и величиной нормальных напряжений в очаге деформации. На рисунке 3.26 представлены результаты анализа напряженного состояния материала в очаге деформации (разделения) при различных значениях межинструментального зазора для стали 08.



а)

б)

в)

Рисунок 3.26 - Результаты моделирования в характерных стадиях процесса вырубki стали 08:

а) Z=(5%)S; б) Z=(10%)S; в) Z=(15%)S

Первая стадия (рисунок 3.26) – момент касания пуансона с деталью (деформация составляет: $0 < \varepsilon \leq 25\%$). На данной стадии наблюдается появление упругой деформации, при этом пуансон производит сжатие металла, наблюдается упругий прогиб, металл вдавливается в рабочее отверстие матрицы. В конце стадии возникает упругопластическая деформация. Максимальные значения нормальных напряжений не превышают при $Z=5\%$ 378 МПа, при $Z=10\%$ 405 МПа, при $Z=15\%$ 490 МПа;



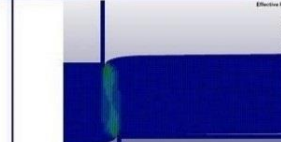


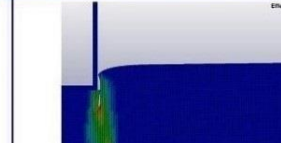


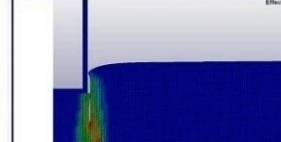


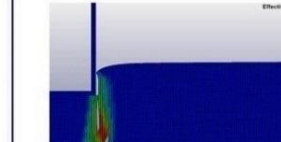
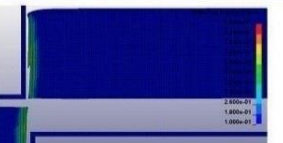

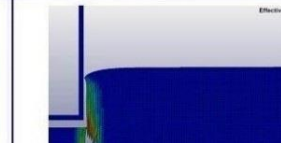
Вторая стадия – момент начала отделения детали от заготовки (деформация составляет: $25 < \varepsilon \leq 50\%$). Наблюдается появление упругопластической деформации. Максимальные значения нормальных напряжений не превышают при $Z=5\%$ 564 МПа, при $Z=10\%$ 598 МПа, при $Z=15\%$ 651 МПа;

Третья стадия – момент появления заусенца на поверхности среза детали (деформация составляет: $50 < \varepsilon \leq 75\%$). Происходит образование и развитие скалывающих трещин. Максимальные значения нормальных напряжений не превышают при $Z=5\%$ 687 МПа, при $Z=10\%$ 699 МПа, при $Z=15\%$ 733 МПа;

Четвертая стадия – характеризуется продолжением процесса разделения металла. (деформация составляет $\varepsilon=90\%$). Дальнейшее опускание пуансона приводит к полному отделению вырубаемого контура (хрупкий скол). Максимальные значения нормальных напряжений не превышают при $Z=5\%$ 865 МПа, при $Z=10\%$ 892 МПа, при $Z=15\%$ 925 МПа;

Пятая стадия – характеризуется окончанием процесса вырубki. Часть заусенца удаляется за счет пластического контакта поверхности разделения с матрицей.

На рисунках 3.27, 3.28 аналогично представлены результаты анализа НДС материала в очаге деформации (разделения) при различных значениях межинструментального зазора для сталей 20 и 45.

Стадия вырубki	Степень деформации	Z=5%	Z=10%	Z=15%
1	$\epsilon=25\%$	 <i>Отпечаток, $\sigma \leq 4.05 \text{ МПа}$</i>	 <i>Отпечаток, $\sigma \leq 4.23 \text{ МПа}$</i>	 <i>Отпечаток, $\sigma \leq 4.53 \text{ МПа}$</i>
2	$\epsilon=50\%$	 <i>Образование и развитие скал, трещин, $\sigma \leq 5.98 \text{ МПа}$</i>	 <i>Образование и развитие скал, трещин, $\sigma \leq 6.28 \text{ МПа}$</i>	 <i>Образование и развитие скал, трещин, $\sigma \leq 6.61 \text{ МПа}$</i>
3	$\epsilon=75\%$	 <i>Развитие скал, трещин, $\sigma \leq 6.99 \text{ МПа}$</i>	 <i>Развитие скал, трещин, $\sigma \leq 7.91 \text{ МПа}$</i>	 <i>Развитие скал, трещин, $\sigma \leq 8.18 \text{ МПа}$</i>
4	$\epsilon=90\%$	 <i>Развитие скал, трещин, хрупкий скал, $\sigma \leq 8.92 \text{ МПа}$</i>	 <i>Развитие скал, трещин, хрупкий скал, $\sigma \leq 9.29 \text{ МПа}$</i>	 <i>Развитие скал, трещин, хрупкий скал, $\sigma \leq 9.43 \text{ МПа}$</i>
5		 <i>Окончание процесса вырубki</i>	 <i>Окончание процесса вырубki</i>	 <i>Окончание процесса вырубki</i>

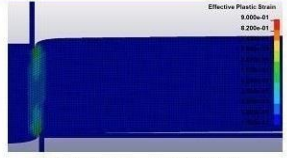
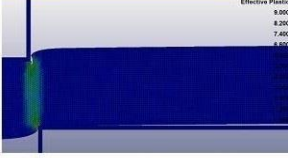
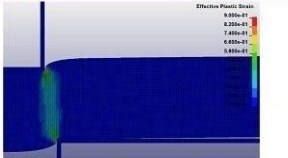


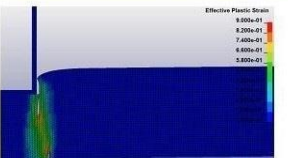
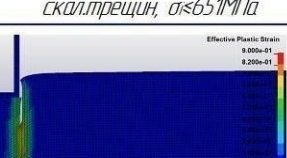

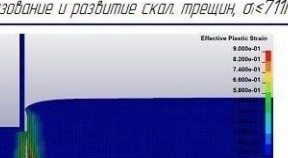

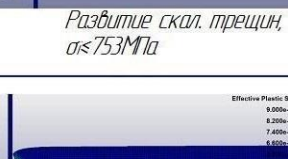
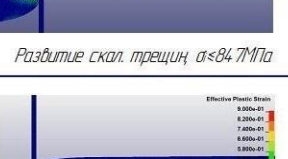
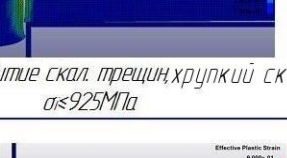
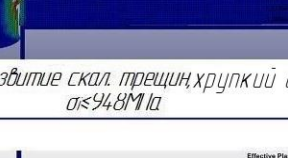
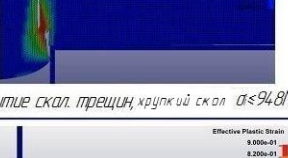
а)

б)

в)

Рисунок 3.27 - Результаты моделирования в характерных стадиях процесса вырубki стали 20:

а) Z=(5%)S; б) Z=(10%)S; в) Z=(15%)S

Стадия вырубki	Степень деформации	Z=5%	Z=10%	Z=15%
1	$\epsilon=25\%$	 Отпечаток, $\sigma \leq 490 \text{ МПа}$	 Образование и развитие скал трещин, $\sigma \leq 537 \text{ МПа}$	 Отпечаток, $\sigma \leq 587 \text{ МПа}$
2	$\epsilon=50\%$	 Образование и развитие скал трещин, $\sigma \leq 651 \text{ МПа}$	 Развитие скал трещин, $\sigma \leq 689 \text{ МПа}$	 Образование и развитие скал трещин, $\sigma \leq 711 \text{ МПа}$
3	$\epsilon=75\%$	 Развитие скал трещин, $\sigma \leq 733 \text{ МПа}$	 Развитие скал трещин, $\sigma \leq 753 \text{ МПа}$	 Развитие скал трещин, $\sigma \leq 847 \text{ МПа}$
4	$\epsilon=90\%$	 Развитие скал трещин, хрупкий скал $\sigma \leq 925 \text{ МПа}$	 Развитие скал трещин, хрупкий скал $\sigma \leq 948 \text{ МПа}$	 Развитие скал трещин, хрупкий скал $\sigma \leq 948 \text{ МПа}$
5		 Окончание процесса вырубki	 Окончание процесса вырубki	 Окончание процесса вырубki

а)

б)

в)

Рисунок 3.28 - Результаты моделирования в характерных стадиях процесса вырубki стали 45:

а) $Z=(5\%)S$; б) $Z=(10\%)S$; в) $Z=(15\%)S$

Анализ результатов моделирования позволил сделать заключение, что основные этапы механизма разделения при вырубке (пробивки) остаются постоянными в пределах рассматриваемых величин межинструментального зазора для различных материалов. При этом наблюдается увеличение величины

нормальных напряжений в материале заготовки за счет интенсификации контактных явлений в очаге деформации.

Установлена рациональная величина межинструментального зазора для сталей 08, 20, 45, соответствующая (4-8) % от толщины материала, при котором обеспечивается повышение качества поверхности разделения, уменьшение максимальных напряжений в очаге деформации, и как следствие, повышение стойкости инструментальной оснастки.

Аналогичным образом было произведено моделирование процесса вырубki для штампового инструмента с износостойкими покрытиями TiN и TiZrN.

Исследовали влияние межинструментального зазора и состава износостойкого покрытия на нормальные напряжения в материале заготовок из сталей 08, 25, 40. Результаты моделирования представлены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 - Результаты моделирования нормальных напряжений в материале заготовок

Значение напряжений	Покрытие	Материал заготовки		
		Сталь 08	Сталь 20	Сталь 45
$\sigma_{н(мак)}$, МПа	б/п	890	920	944
	TiN	810	830	813
	TiZrN	805	811	816

Установлено (см. таблицу 3.11), что применение износостойких покрытий на основе нитрида титана способствует снижению пиковых значений нормальных напряжений в материале заготовки. При использовании износостойких покрытий TiN и TiZrN значения нормальных напряжений (σ_n) снижаются на 7, 9 и 11% для стали 08, стали 20 и стали 45 соответственно. Это объясняется, прежде всего, снижением значений коэффициента трения (с 0,3 до 0,28) и, соответственно, уменьшением уровня деформации в очаге разделения материала.

3.4. Выводы по главе

1. Проведено численное моделирование процесса изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента с износостойким покрытием с использованием программных комплексов КОМПАС-3D и LS-Dyna.

2. На основе результатов численного моделирования установлено влияние износостойких покрытий на контактные напряжения, износ рабочих поверхностей и стойкость штампового инструмента. Установлено, что на операции «вытяжка с принудительным утонением» нанесение износостойких покрытий уменьшает величину контактных нормальных и касательных напряжений в 1,4-2 раза, снижает износ рабочих поверхностей на (25-30) % (п.3.1) и повышает стойкость штампового инструмента на 30%; на операции вырубки снижение контактных напряжений составило до 30 %, износа рабочих поверхностей (11-28) % (п.3.2.) и повышение стойкости штампового инструмента в (1,22-1,26) раза. При этом, наибольшую эффективность независимо от вида операции имеет покрытие TiZrN.

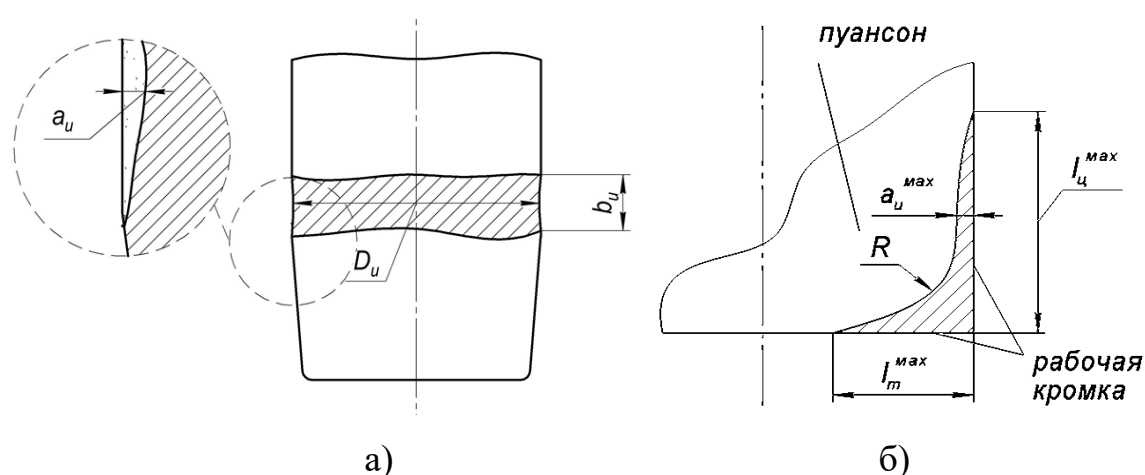
3. Установлена рациональная величина межинструментального зазора для сталей 08, 20, 45 соответствующая 4-7% от толщины материала, при котором обеспечивается повышение качества поверхности разделения, уменьшение максимальных напряжений в очаге деформации, и как следствие, повышение стойкости инструментальной оснастки.

4. Установлено, что применение износостойких покрытий, нанесенных методом ионно-плазменного напыления, способствует снижению пиковых значений нормальных напряжений в материале заготовки на 7-11 %, соответственно для износостойких покрытий TiN и TiZrN, прежде всего, за счет снижения коэффициента трения (п.3.3).

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА С ИЗНОСОСТОЙКИМИ ПОКРЫТИЯМИ

Экспериментальные исследования износостойкости штампового инструмента с ионно-плазменными покрытиями проводились в производственных условиях АО «Ульяновский патронный завод» и АО «Ульяновский НИАТ».

В ходе испытаний фиксировался износ рабочей поверхности - схемы измерений износа штампового инструмента представлены на рисунке 4.1.



Рисунке 4.1 - Схема измерений износа штампового инструмента на операциях «вырубка» (б) и «вытяжка с принудительным утонением» (а): а – D_u – диаметр изношенной зоны, b_u – длина изношенной зоны, a_u – максимальная глубина износа; б – l_c^{\max} – длина износа по цилиндрической поверхности, l_m^{\max} – длина износа по торцевой поверхности

4.1. Экспериментальные исследования эффективности штампового инструмента с износостойкими покрытиями на операции «вытяжка с принудительным утонением»

На АО «Ульяновский патронный завод» исследования штампового инструмента с износостойким ионно-плазменным покрытием на операции

«вытяжка с принудительным утонением» проводили при изготовлении деталей типа «Гильза» на 2-м переходе вытяжки. В экспериментальных исследованиях использовали пуансоны из инструментальной стали марки У10А без покрытий и с износостойким покрытием на основе нитрида титана - TiN (рисунок 4.2).



Рисунок 4.2 - Пуансоны для вытяжки без покрытия и с покрытием TiN

Материал обрабатываемой заготовки – марганцевая сталь, плакированная томпаком (разновидность латуни с содержанием меди 88-97% и цинка до 10%, обладает высокой пластичностью, антикоррозионным и антифрикционными свойствами).

Покрытие TiN наносили на установке для нанесения износостойких покрытий «Булат-6» (рисунок 4.3) ФГБОУ ВО УлГТУ. В рабочую камеру, заполненную азотом, устанавливались три катода из титана (рисунок 4.4). Толщина формируемого износостойкого покрытия – 4-5 мкм (как соответствующая максимальным значениям предела на изгиб хрупкого материала износостойкого покрытия), температура в рабочей камере – 350-400°C.



Рисунок 4.3 - Установка для нанесения износостойких покрытий «Булат-6»

Компоновочная схема нанесения покрытий представлена на рисунке 4.4.

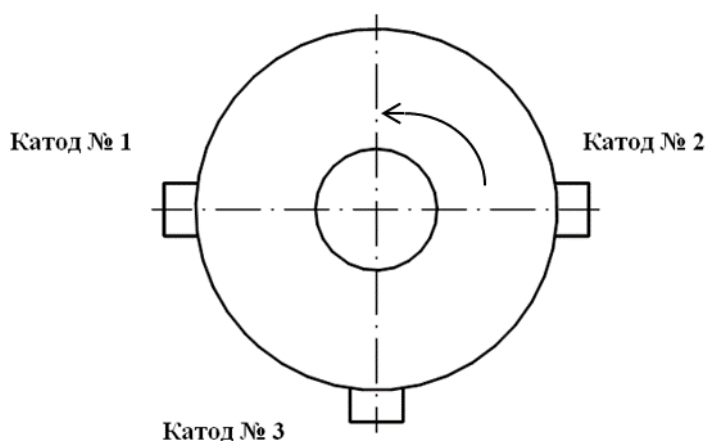


Рисунок 4.4 - Компоновочная схема нанесения покрытий (материал катодов № 1, 2, 3 – Ti, газ в рабочей камере - N)

Химический состав покрытия представлен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Химический состав наносимого покрытия

Покрытие	Содержание элементов в покрытии, % ат.			
	Ti	Zr	Nb	Al
TiN	100	-	-	-

Технологические параметры нанесения однослойных покрытий на основе нитрида титана представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Технологические параметры нанесения однослойных покрытий на основе нитрида титана

№	Покрытие	Технологические параметры процесса конденсации										Опорное напряжение $U_{оп}$, В	Время конденсации τ_k , мин
		Катод №1			Катод №2			Катод №3					
		материал	$I_{д'}$, А	$I_{ф'}$, А	материал	$I_{д'}$, А	$I_{ф'}$, А	материал	$I_{д'}$, А	$I_{ф'}$, А			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1	TiN	Ti	105	0,4	-	-	-	Ti	105	0,4	160	32	

Перед нанесением износостойкого покрытия рабочие поверхности штампового инструмента подвергали шлифованию до 7 квалитета точности и полировке рабочих поверхностей алмазными пастами мелкой зернистости (тип АМ1, АСМ1, АМ5, АСМ5, зернистость - 1/0,5 - 0,1/0 мкм).

Комплекты пуансонов с износостойким покрытием TiN и без покрытия устанавливали попарно в роторные линии ЛГ-207 и ЛГ-407 для тестового анализа. В ходе испытаний фиксировали выход инструмента из строя по счетчику произведенных операций и выявляли причину выхода из строя.

Результаты измерений параметров износа рабочей поверхности штампового инструмента на операции «вытяжка с принудительным утонением» представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Влияние покрытия TiN на параметры износа рабочей поверхности штампового инструмента на операции «вытяжка с принудительным утонением»

Номер измерения	b_i , мм	b_i , мм	l_i , мм	l_i , мм
	б/п	TiN	б/п	TiN
1	10,92	8,25	10,4	7,4
2	10,85	8,24	10,1	7,3
3	10,84	8,23	10,3	8,1
4	10,86	8,26	10,6	7,8
5	10,86	8,22	10,7	7,2
6	10,91	8,25	10,4	7,3
Среднее значение	10,856	8,25	10,22	7,78

Как видно из таблицы 4.3, значения показателей износа снижаются с использованием износостойкого покрытия TiN. При этом, длина изношенной зоны

($l_{и}$) рабочей поверхности штампового инструмента уменьшилась на 18 %, ширина пояска износа ($b_{и}$) – на 25 %, а максимальная глубина износа ($a_{и}$) – на 23 %.

Стойкость штампового инструмента по результатам испытаний на операции «вытяжка с принудительным утонением» представлена в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Стойкость штампового инструмента с покрытием TiN на операции «вытяжка с принудительным утонением»

Операция	№ п\п блоков	Материал инструмента	Покрытие	Частичный износ	Полный износ	ΔИ, %
				Выполненные операции, шт.	Выполненные операции, шт.	
Вытяжка с принудительным утонением (2-й переход)	1	Углеродистая инструментальная сталь У10А	TiN	790000	895000	12,2
	2		б\п	545000	699000	22,1
	3		TiN	810000	986000	8
	4		б\п	563000	709000	20,6

Анализ данных, представленных в таблице 4.4, позволил выявить, что нанесение износостойкого покрытия TiN повышает стойкость пуансонов для вытяжки с принудительным утонением на (30-39) %.

На рисунке 4.5 представлена графическая интерпретация износа штампового инструмента без покрытия и с износостойким покрытием TiN.

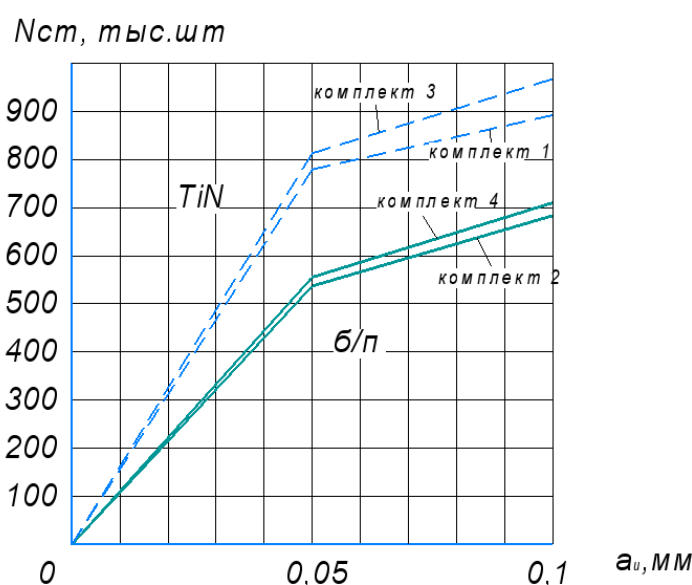


Рисунок 4.5 - График износа рабочей поверхности штампового инструмента:

0,05 мм – частичный износ; 0,1 мм – полный выход инструмента из строя

Установлено, что применение износостойких покрытий уменьшает диапазон рабочих циклов инструмента между частичным (образование рисок на поверхности инструмента – рисунок 4.5а) и полным (образование пояска износа при $a=0,1$ мм – рисунок 4.5б) износом рабочей поверхности инструмента (с 20 до 10 %). Таким образом, можно сделать вывод, что использование покрытия TiN снижает интенсивность износа инструмента в 2 раза, что подтверждает сделанные по результатам численного моделирования выводы о влиянии наличия износостойкого покрытия на увеличение твердости, уменьшения коэффициента трения и значений контактных напряжений на поверхности штампового инструмента в процессе деформирования.

На рисунке 4.6 представлен изношенный инструмент с износостойким покрытием после полного цикла производственных испытаний. Как видно на рисунке, с использованием покрытий уменьшаются геометрические размеры пояска износа.



а

б

Рисунок 4.6 - Изношенный инструмент:

а – б/п, б – TiN

Проведенными исследованиями установлено, что применение износостойких покрытий приводит к повышению стойкости штампового инструмента на (30-39) %. Параметр, определяющий отношение циклов работы

инструмента с частично изношенной поверхностью к общему количеству рабочих циклов ($\Delta И$) снизился на (10-12) %, а значения показателей износа снижаются с использованием износостойкого покрытия TiN.

4.2. Экспериментальные исследования эффективности штампового инструмента с износостойкими покрытиями на операции «вырубка»

В условиях производства АО «Ульяновский НИАТ» были проведены экспериментальные испытания штампового инструмента для разделительных операций («вырубка») с износостойкими покрытиями TiN и TiZrN при изготовлении деталей типа «Профиль с перфорацией». В экспериментальных исследованиях использовали пуансоны из инструментальной легированной стали марки 9ХС без покрытий и с износостойкими покрытиями TiN и TiZrN (рисунок 4.7).



Рисунок 4.7 - Пуансоны для вырубки:

а – б/п, б – TiN, в – TiZrN

Перед нанесением износостойкого покрытия рабочие поверхности штампового инструмента аналогично инструменту для вытяжки (АО «Ульяновский патронный завод») подвергали шлифованию до 6 качества точности

и полировке поверхности алмазными пастами мелкой зернистости (тип АМ1, АСМ1, АМ5, АСМ5, зернистость - 1/0,5 - 0,1/0 мкм).

Покрyтия TiN и TiZrN наносили на установке «Булат-6». Условия осаждения покрyтия TiN были описаны выше. При нанесении покрyтия TiZrN использовали два катода из титана и один катод из циркония. Толщина формируемого износостойкого покрyтия – 4-5 мкм, температура в рабочей камере – 350-450°С.

Компоновочная схема нанесения покрyтий представлена на рисунке 4.8.

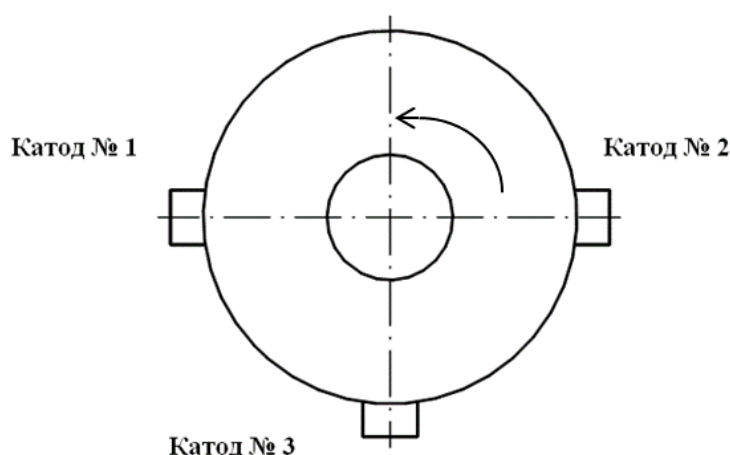


Рисунок 4.8 - Компоновочная схема нанесения покрyтий TiZrN
(катод № 1, 2 – Ti, №3 – Zr, газ в рабочей камере - N)

Химический состав покрyтия представлен в таблице 4.5. Технологические параметры нанесения однослойных покрyтий на основе нитрида титана представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.5 - Химический состав наносимых покрyтий

Покрyтие	Содержание элементов в покрyтии, % ат.			
	Ti	Zr	Nb	Al
TiN				
TiZrN	5			

Таблица 4.6 - Технологические параметры нанесения однослойных покрытий на основе нитрида титана

№	Покрытие	Технологические параметры процесса конденсации										Время конденсации τ_k , мин
		Катод №1			Катод №2			Катод №3			Опорное напряжение $U_{оп}$, В	
		материал	$I_{д'}$, А	$I_{ф'}$, А	материал	$I_{д'}$, А	$I_{ф'}$, А	материал	$I_{д'}$, А	$I_{ф'}$, А		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	TiN	Ti	105	0,4	Ti	105	0,4	Ti	105	0,4	160	32
2	TiZrN	Ti	105	0,4	Ti	105	0,4	Zr	110	0,4	160	32

Влияние покрытий TiN и TiZrN на параметры износа рабочей поверхности штампового инструмента на операции вырубке представлено в таблице 4.7.

Таблица 4.7 - Влияние покрытий TiN и TiZrN на параметры износа рабочей поверхности штампового инструмента на операции вырубке

Номер измерения	l_m , мм			$l_{ц}$, мм			a_n , мм		
	б/п	TiN	TiZrN	б/п	TiN	TiZrN	б/п	TiN	TiZrN
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,31	1,12	1,11	0,94	0,78	0,81	0,131	0,091	0,088
2	1,33	1,17	1,08	0,98	0,79	0,78	0,130	0,090	0,089
3	1,34	1,13	1,10	0,97	0,78	0,79	0,132	0,087	0,088
4	1,28	1,14	1,10	0,95	0,78	0,78	0,130	0,090	0,091
5	1,32	1,15	1,11	0,95	0,79	0,82	0,124	0,091	0,090
6	1,27	1,14	1,11	0,92	0,78	0,78	0,131	0,089	0,087
7	1,29	1,16	1,09	0,99	0,78	0,79	0,130	0,091	0,090
8	1,31	1,14	1,12	0,94	0,79	0,78	0,128	0,093	0,091
9	1,30	1,17	1,07	0,95	0,78	0,78	0,130	0,087	0,089
10	1,26	1,13	1,08	0,92	0,82	0,80	0,127	0,088	0,087
Среднее значение	1,30	1,15	1,10	0,95	0,79	0,78	0,13	0,09	0,089

Как видно из таблицы 4.7, значения показателей износа снижаются с использованием износостойких покрытий, при этом наибольшую эффективность демонстрирует покрытие TiZrN. Снижение износа рабочей поверхности штампового инструмента, при этом, составило 12 % и 15,5 % по величине $l_{ц}$, 18 % по величине l_m , 29 % и 30 % по величине a_n соответственно для TiN и TiZrN.

Стойкость штампового инструмента по результатам испытаний на операции вырубке представлена в таблице 4.8.

Результаты проведенных исследований показали, что применение износостойких покрытий на операции «вырубка» повышает стойкость штампового инструмента по сравнению со штамповым инструментом без покрытия на 26 % и 32 % для износостойких покрытий TiN и TiZrN соответственно.

Таблица 4.8 - Стойкость ШИ с покрытием TiN и TiZrN на операции «вырубка»

Операция	№ п\п блока	Материал инструмента	Покрытие	$l_{ц}, мм$	$l_{м}, мм$	Нст, шт.
Вырубка	1	Инструментальная сталь 9ХС	б/п	0,1	0,07	420000
	2		TiN			528000
	3		TiZrN			554000

На рисунке 4.9 представлены графики износа штампового инструмента без покрытия и с износостойким покрытием TiN и TiZrN. Критерием выхода инструмента из строя служил радиус скругления кромки, равный $R=0,1$ мм, после достижения которого требовалась его переточка [2].

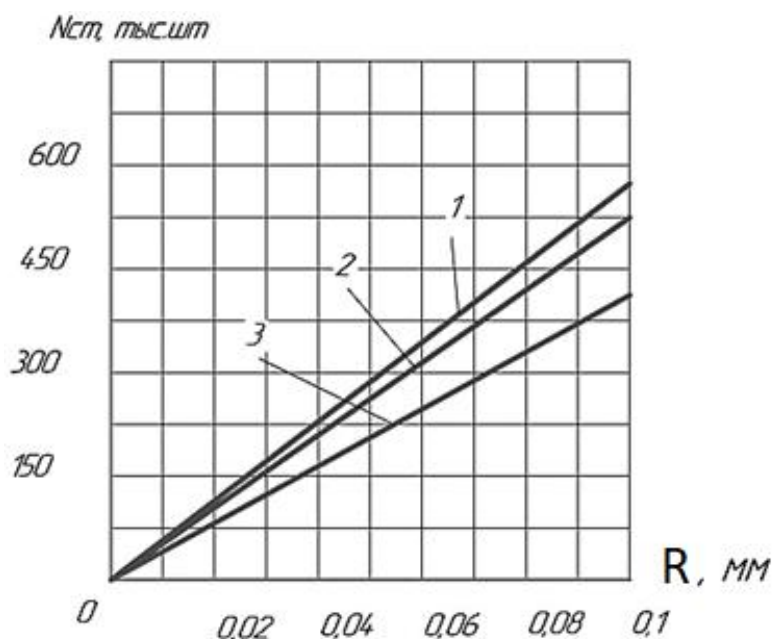


Рисунок 4.9 - Стойкость штампа с ИП в зависимости от износа:

1 - TiZrN, 2 - TiN, 3 – б/п

На рисунке 4.10 представлен изношенный инструмент после полного цикла производственных испытаний.



Рисунок 4.10 - Комплект изношенных пуансонов
(после испытаний)

Анализ данных, представленных на рисунке 4.9 показывает, что нанесение износостойкого покрытия приводит к увеличению эксплуатационного ресурса (количества рабочих циклов) инструмента. Так, при $l_{ц}=0,1\text{мм}$ и $l_{м}=0,07\text{ мм}$ применение износостойких покрытий на операции вырубке повышает стойкость штампового инструмента по сравнению со штамповым инструментом без покрытия на 26 % и 32 % для износостойких покрытий TiN и TiZrN соответственно.

4.3. Сравнительный анализ результатов математического моделирования и эксперимента

С целью верификации полученных результатов исследования процессов износа рабочих поверхностей штампового инструмента с износостойким покрытием было проведено сравнение результатов численного моделирования и результатов эксперимента.

Для процесса «вытяжка с принудительным утонением» в качестве контролируемых параметров были использованы следующие величины: $N_{ст}$ – стойкость штампа, D - диаметр изношенной зоны, $b_{и}$ – длина изношенной зоны, $a_{и}$ – максимальная глубина износа боковой поверхности. Результаты анализа представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 - Результаты численного моделирования и результаты эксперимента на операции «вытяжка с принудительным утонением».

Параметр	инструмент без покрытия			инструмент с покрытием TiN		
	эксперимент	модель	Δ , %	эксперимент	модель	Δ , %
$D_{и}$, мм	10,85	10,87	1,1	10,91	10,92	7,4
$b_{и}$, мм	9,99	10,0	1,0	8,08	8,25	1,02
$N_{ст}$, шт	704000	689563	3,1	940500	893569	5,1
$a_{и}$, мкм	150	130	13	90	80	12

Установлено, что для параметра $D_{и}$ отклонения результатов моделирования и эксперимента не превышают 7,4 %, для параметра $b_{и}$ – 1,02 %, для параметра $N_{ст}$ – 5,1%, для параметра $a_{и}$ -13%. Графическая интерпретация анализа показателей износа представлена на рисунке 4.11.

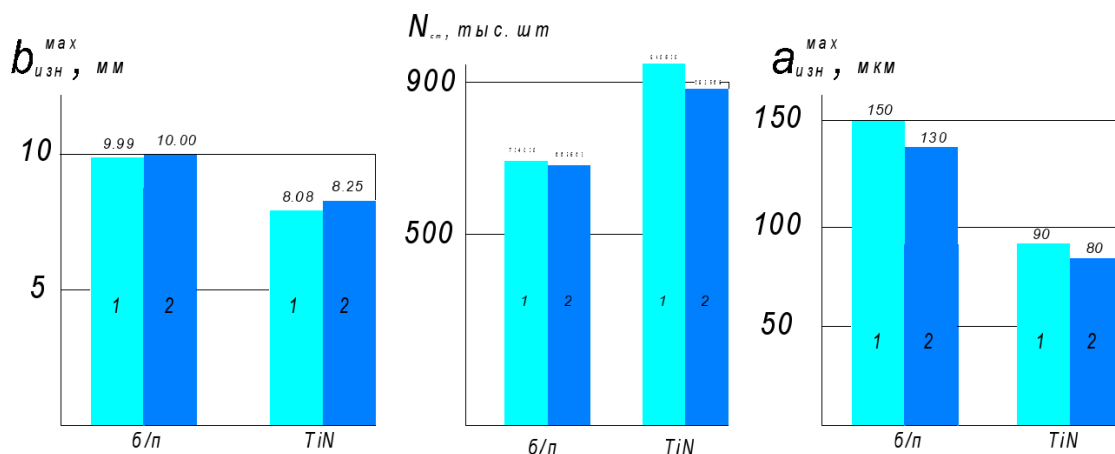


Рисунок 4.11 - Сравнительный анализ результатов математического моделирования и эксперимента («вытяжка с принудительным утонением»): N_s – стойкость штампа, $b_{\text{и}}$ – длина изношенной зоны, $a_{\text{и}}$ – максимальная глубина износа боковой поверхности; 1 – эксперимент, 2 – моделирование

Таким образом, результаты экспериментальных испытаний штампового инструмента на операции «вытяжка с принудительным утонением» подтверждают результаты математического моделирования.

Для процесса «вырубка» в качестве контролируемых параметров были выбраны следующие величины: длина износа по цилиндрической ($l_{\text{ц}}$), по торцевой ($l_{\text{м}}$) поверхности и $N_{\text{ст}}$ – стойкость штампа.

Результаты анализа представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 - Результаты численного моделирования и результаты эксперимента на операции «вырубка»

Параметр	инструмент без покрытия			инструмент с покрытием TiN			инструмент с покрытием TiZrN		
	эксперимент	модель	Δ , %	эксперимент	модель	Δ , %	эксперимент	модель	Δ , %
$l_{\text{ц}}$, мм	1,30	1,18	9,3	1,15	1,09	5,3	1,10	0,99	9,9
$l_{\text{м}}$, мм	0,95	0,81	14,8	0,84	0,76	9,6	0,84	0,75	11,1
$N_{\text{ст}}$, шт	420000	452563	7,8	528000	548457	4,6	554000	568623	4,1
$a_{\text{и}}$, мм	0,1								

Установлено, что для параметра $l_{\text{ц}}$ отклонения результатов моделирования и эксперимента не превышают 9,9 %, для параметра $l_{\text{м}}$ – 14,8 %, для параметра $N_{\text{ст}}$

– 7,8 %. Графическая интерпретация анализа показателей износа представлена на рисунке 4.12.

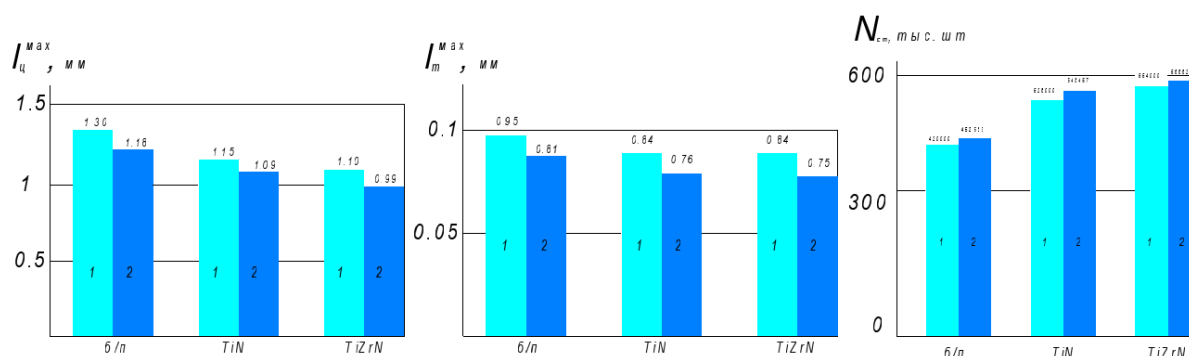


Рисунок 4.12 - Сравнительный анализ результатов математического моделирования и эксперимента («вырубка»): длина износа по цилиндрической (l_c), по торцовой (l_m) поверхности и N – стойкость штампа;

1 – эксперимент, 2 – моделирование

Таким образом, результаты экспериментальных испытаний штампового инструмента на операции «вырубка» также подтверждают результаты математического моделирования.

Анализ представленных результатов показывает, что отклонение результатов моделирования и эксперимента не превышают (13-14) %, а в случае с рядом показателей (7-8) %. При этом стоит отметить, что увеличение времени расчета и количества конечных элементов в модели может привести к дополнительному повышению ее точности.

Промышленная апробация штампового инструмента с износостойким покрытием на основе нитрида титана подтвердила высокую точность и практическую значимость полученных аналитических зависимостей, математических моделей процессов изнашивания штампового инструмента с износостойкими покрытиями и всех установленных закономерностей.

4.4. Выводы по главе

1. Проведены экспериментальные исследования по анализу эффективности штампового инструмента с износостойкими покрытиями, нанесенными методом ионно-плазменного напыления, в производственных условиях АО «Ульяновский патронный завод» и АО «Ульяновский НИАТ».

2. Выявлены закономерности связи процесса изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента с составом износостойкого покрытия, схемой НДС и технологическими параметрами процесса листовой штамповки.

3. Экспериментальные исследования, проведенные в условиях действующего производства, показали эффективность штампового инструмента с износостойкими покрытиями:

- применение износостойких покрытий на основе нитрида титана на операции «вытяжка с принудительным утонением» приводит к повышению стойкости штампового инструмента на 39%, при этом, длина изношенной зоны рабочей поверхности уменьшилась на 18%, а максимальная глубина износа – на 23%.

- применение износостойких покрытий на операции вырубки повышает стойкость штампового инструмента по сравнению с штамповым инструментом без покрытия на 26 % и 32 % для TiN и TiZrN соответственно. Снижение износа рабочих поверхности штампового инструмента, при этом, составило 12 % и 15,5 % по величине $l_{ц}$, 18 % по величине $l_{м}$, 29 % и 30 % по величине $a_{и}$ соответственно для TiN и TiZrN.

ГЛАВА 5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ С ИЗНОСОСТОЙКИМ ПОКРЫТИЕМ

В данной главе представлен технико-экономический анализ эффективности рассмотренных в главе 4 процессов листовой штамповки с использованием штампового инструмента с износостойким покрытием на примерах деталей и инструмента номенклатуры АО «Ульяновский патронный завод» и АО «Ульяновский НИАТ».

Для проведения технико-экономического анализа эффективности использования рабочего инструмента листовой штамповки с износостойким покрытием была разработана методика расчета показателя экономической эффективности ($K_{ср}$ - сравнительный коэффициент).

В качестве основного критерия экономической эффективности использования рабочего инструмента листовой штамповки с износостойким покрытием предложен параметр полной стоимости пуансона с учетом перешлифовок [2]:

$$C_{\text{пуанс}} = \frac{C_{\text{из}} + C_i * n}{K_{\text{ст}}} \text{ [руб/дет]}, \quad (5.1)$$

где $C_{\text{из}}$ – стоимость изготовления пуансона, руб, C_i – стоимость одной перешлифовки, руб., n – количество перешлифовок, $K_{\text{ст}}$ – полная стойкость одного штампа, дет.

Для определения показателя экономической эффективности $K_{ср}$ определены следующие параметры:

- $C_{\text{из}}$ – стоимость изготовления пуансона, согласно технической документации АО «УПЗ», составляет 30000 руб., и 25000 руб. согласно технической документации АО «Ульяновский НИАТ»;

- $C_{\text{отн}}$ – относительная стоимость изготовления [руб/дет];

Разработанный алгоритм анализа технико-экономической эффективности представлен на рисунке 5.1.

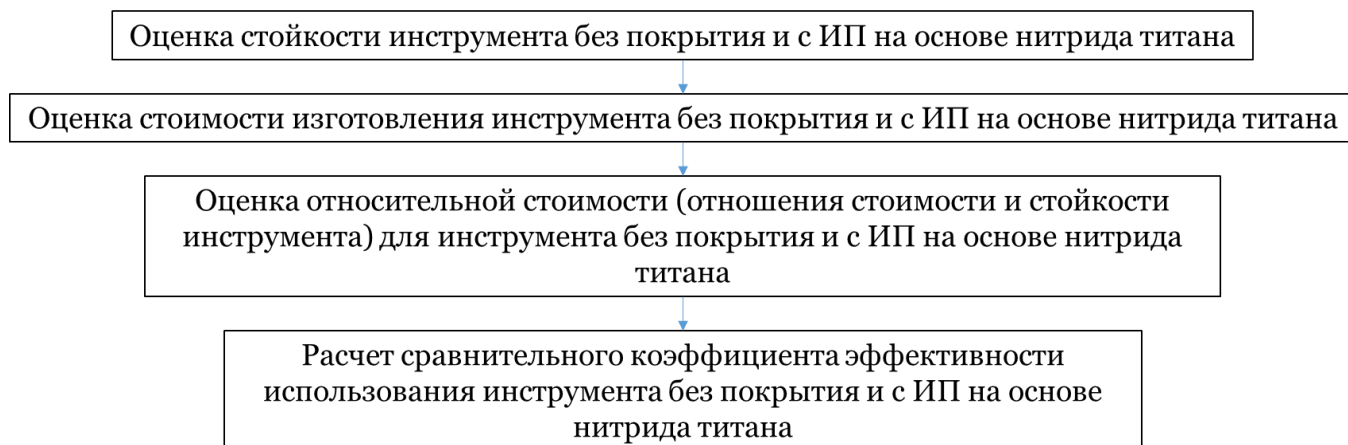


Рисунок 5.1 - Алгоритм оценки экономической эффективности ШИ с ИП

Данная методика позволяет произвести комплексный сопоставительный анализ эффективности использования рабочего инструмента листовой штамповки с износостойким покрытием в основных операциях обработки металлов давлением.

5.1. Анализ экономической эффективности использования рабочего инструмента с износостойким покрытием на операции «вытяжка с принудительным утонением»

Исходными данными для расчета являются результаты экспериментальных исследований, проведенных на АО «Ульяновский патронный завод» (см. главу 4) и данные технической документации на изготовление пуансона для вытяжки с утонением.

Принимаем $C_i \cdot n = 0$ (см. формулу 5.1), т.к. на операции «вытяжка с принудительным утонением» отсутствует переточка, следовательно, $n = 0$.

Параметр *стойкость* [дет], принимаем для инструмента без покрытия $K_{ст}^{б/п} = N$, соответственно, для инструмента с покрытием TiN принимаем $K_{ст}^{TiN} = 1,3 * N$, где 1,3 – повышающий коэффициент. Повышающий коэффициент 1,3 вводится, так как по результатам экспериментальных испытаний при

использовании износостойкого покрытия TiN стойкость пуансонов увеличилась на 30% (см. главу 4).

Параметр *стоимость* изготовления [руб] принимаем для инструмента без покрытия М (где М=30000 руб, АО «УПЗ»). Стоимость нанесения износостойких покрытий составляет, согласно справочным данным [66], до 20% процентов от стоимости изготовления инструмента, соответственно, для инструмента с покрытием TiN принимаем $C_{из}^{TiN} = 1,2 * М$, где 1,2 – повышающий коэффициент стоимости нанесения покрытий, $C_{из}^{TiN} = 1,2 * М = 36000$ руб.

Относительная стоимость изготовления [руб/дет] определяется, как отношение стоимости изготовления инструмента к его стойкости и определяется для инструмента без ИП по формуле 5.2:

$$C_{отн}^{б/п} = \frac{C_{из}^{б/п}}{K_{ст}^{б/п}} = \frac{М}{N} \quad (5.2)$$

$$C_{отн}^{б/п} = \frac{30000}{700000} = 0.0428$$

Соответственно, для инструмента с покрытием TiN:

$$C_{отн}^{TiN} = \frac{C_{из}^{TiN}}{K_{ст}^{TiN}} = \frac{1.2 * М}{1.3 * N} \quad (5.3)$$

$$C_{отн}^{TiN} = \frac{36000}{910000} = 0.0395$$

Сравнительный коэффициент определяется, как отношение разности относительной стоимости изготовления инструмента без покрытия и с износостойким покрытием к относительной стоимости изготовления инструмента:

$$K_{ср} = \frac{\Delta C_{отн}}{C_{отн}^{б/п}} * 100\% \quad (5.4)$$

$$K_{ср} = \frac{0,0428 - 0,0395}{0,0428} * 100\% = 8,4\%$$

Таким образом, можно сделать вывод о том, что использование износостойких покрытий на основе нитрида титана увеличивает экономическую эффективность штампового инструмента на операции «вытяжка с принудительным утонением» на 8,4%, с учетом увеличения стойкости инструмента на 30%.

5.2. Анализ экономической эффективности использования рабочего инструмента с износостойким покрытием на операции «вырубка»

Исходными данными для расчета являются результаты экспериментальных исследований на АО «Ульяновский НИАТ» (см. главу 4) и данные технической документации на изготовление пуансона для вырубки.

Для инструмента на операции «вырубка» без покрытия $C * n = 0.2 C * (4 \div 5)$, т.к. $n=4 \div 5$ переточек [2].

Для инструмента с ИП принимаем $C * n = 0$ (см. формулу 5.1), т.к. на операции «вырубка» отсутствует переточка.

Параметр *стойкость* [дет], для инструмента без покрытия принимаем $K_{ст}^{б/п} = N$, соответственно, для инструмента с покрытием TiN принимаем, для инструмента с покрытием TiZrN, 1,26 – повышающий коэффициент, где 1,22 и 1,26 – повышающий коэффициент (см. главу 4). Повышающие коэффициенты вводятся, так как по результатам экспериментальных испытаний при использовании износостойких покрытий TiN стойкость пуансонов увеличилась на 22 и 26% соответственно (см. главу 4).

Параметр *стоимость* изготовления [руб], принимаем для инструмента без покрытия M ($M=25000$ руб, АО «Ульяновский НИАТ») соответственно, для инструментов с покрытием принимаем $C_{из}^{покр} = 1,2 * M$, где 1,2 – повышающий коэффициент стоимости нанесения покрытий (см. пункт 5.1), следовательно $C_{из}^{покр} = 1,2 * M = 30000$ руб.

Относительная стоимость изготовления [руб/дет] определяется, как отношение стоимости изготовления инструмента к его стойкости и определяется для инструмента без ИП:

$$C_{отн} = \frac{C_{из} + C_i * n}{K_{ст}} = \frac{M + 0.2M * 5}{N} \quad (5.5)$$
$$C_{отн} = \frac{25000 + 0.2 * 25000 * 5}{450000} = 0.11$$

Соответственно, для инструмента с покрытием TiN:

$$C_{\text{отн}}^{\text{TiN}} = \frac{C_{\text{из}}^{\text{TiN}}}{K_{\text{ст}}^{\text{TiN}}} = \frac{1.2 * M}{1.22 * N} \quad (5.6)$$

$$C_{\text{отн}}^{\text{TiN}} = \frac{30000}{530000} = 0.0566$$

Соответственно, для инструмента с покрытием TiZrN

$$C_{\text{отн}}^{\text{TiZrN}} = \frac{C_{\text{из}}^{\text{TiZrN}}}{K_{\text{ст}}^{\text{TiZrN}}} = \frac{1.2 * M}{1.26 * N} \quad (5.7)$$

$$C_{\text{отн}}^{\text{TiZrN}} = \frac{30000}{560000} = 0.0536$$

Сравнительный коэффициент определяется, как отношение разности относительной стоимости изготовления инструмента без покрытия и с ИП к относительной стоимости изготовления инструмента:

$$K_{\text{ср}}^{\text{TiN}} = \frac{\Delta C_{\text{отн}}}{C_{\text{отн}}} * 100\% \quad (5.8)$$

$$K_{\text{ср}}^{\text{TiN}} = \frac{0,11 - 0,0566}{0,11} * 100\% = 49\%$$

$$K_{\text{ср}}^{\text{TiZrN}} = \frac{\Delta C_{\text{отн}}}{C_{\text{отн}}^{\text{б/п}}} * 100\% \quad (5.9)$$

$$K_{\text{ср}}^{\text{TiZrN}} = \frac{0,11 - 0,0536}{0,11} * 100\% = 51\%$$

Таким образом, проведенные расчеты позволяют сделать вывод о том, что использование износостойких покрытий на основе нитрида титана увеличивает экономическую эффективность штампового инструмента на операции «вырубка» на (49 и 51) %, с учетом увеличения стойкости инструмента на (22 и 26) %, соответственно, для покрытий TiN и TiZrN (см. главу 4).

5.3. Технологические рекомендации применения ИП на ШИ на операциях «вытяжка с принудительным утонением» и «вырубка»

По результатам проведенных теоретико-экспериментальных исследований было определено, что покрытия являются эффективным и ресурсоемким способом повышения износостойкости, обеспечивая значительное повышение

эксплуатационных характеристик штампового инструмента по сравнению с другими методами упрочнения поверхностного слоя штамповой оснастки.

Для процессов обработки металлов давлением экспериментально подтверждены диапазоны толщин износостойких покрытий 4-5 мкм, принятые в практике упрочнения режущего инструмента, позволяющие формировать устойчивые системы «подложка-покрытие», обеспечивающие требуемый уровень адгезии и механических свойств.

Установлены ограничения и рациональные технологические схемы упрочнения и эксплуатации штампового инструмента для операций «вытяжка с принудительным и утонением» и «вырубка» методом ионно-плазменного напыления, заключающиеся в следующем:

1) перед нанесением износостойких покрытий методом КИБ рабочие поверхности должны подвергаться шлифованию до 7-8 квалитетов точности;

2) инструментальные стали, не относящиеся к категории теплостойких, должны обрабатываться при температуре не выше 400° С во избежание отпуска и разупрочнения (для сталей марок X12M, X12MФ и др. температурные режимы могут быть увеличены до 500° С);

3) габаритные размеры рабочих частей штамповой оснастки, подвергающихся процессу ионно-плазменного напыления, должны соответствовать отношения длины к диаметру не более, чем 12 к 1 во избежание неравномерности прогрева в процессе обработки;

4) приоритетным является использование инструментальных сталей с высоким содержанием хрома (выше 12%);

5) для инструмента с износостойким покрытием на операции вырубка наиболее рациональным является диапазон зазоров, равный 4-7% от толщины материала заготовки.

Установлено, что среди покрытий TiN и TiZrN наибольшую эффективность как на операции «вытяжка с принудительным утонением», так и на операции «вырубка», демонстрирует покрытие TiZrN.

Рекомендации по химическому составу износостойких покрытий TiN и TiZrN представлены в п. 4.1-4.2.

5.4. Выводы по главе

1. Предложена методика оценки экономической эффективности рабочего инструмента с износостойким покрытием.

2. При использовании рабочего инструмента с износостойким покрытием формоизменяющих и разделительных операций листовой штамповки дана оценка стойкости и стоимости его изготовления, рассчитана относительная стоимость изготовления и определен сравнительный коэффициент.

3. Проведенные расчеты для одного комплекта штампового инструмента без покрытия и с износостойкими покрытиями TiN и TiZrN на операциях «вытяжка с принудительным утонением» и «вырубка» показали, что использование износостойких покрытий позволит увеличить параметр оценки экономической эффективности использования штампового инструмента на 8,4% для формоизменяющих операций и на (49-51) % - для разделительных операций.

4. Предложены технологические рекомендации по упрочнению и эксплуатации штампового инструмента с износостойкими покрытиями на основе нитрида титана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполнения диссертационного исследования получены следующие научные результаты и выводы:

1. Произведен анализ современного состояния проблемы повышения стойкости и работоспособности рабочих деталей штампов, а также качества получаемых деталей. Выявлены причины изнашивания и разрушения штампового инструмента на операциях листовой штамповки. Определены факторы, влияющие на стойкость рабочих поверхностей штамповой инструментальной оснастки разделительных и формоизменяющих операций листовой штамповки.

2. Разработаны математические модели разрушения износостойких покрытий, наносимых методами ионно-плазменного напыления, и процесса изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента с износостойкими покрытиями на операциях «вытяжка с принудительным утонением» и «вырубка», учитывающие особенности разрушения хрупкого материала износостойкого покрытия, формирования зон разрушения в условиях ударных и сдвиговых нагрузок. Определены значения безразмерных коэффициентов изнашивания и константы разрушения износостойких покрытий на основе нитрида титана.

3. Проведено численное моделирование процесса изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента и разрушения износостойких покрытий на основе нитрида титана с использованием программных комплексов КОМПАС-3D и LS-Dyna. Результаты исследований, полученных численным моделированием, подтверждены экспериментальными данными, полученными в условиях действующего производства. Отклонение результатов моделирования и эксперимента составило (4-13) %.

4. На основе результатов численного моделирования установлено влияние износостойких покрытий на основе нитрида титана на уровень нормальных и касательных контактных напряжений на рабочей поверхности инструмента, износ рабочих поверхностей и стойкость штампового инструмента. Установлено, что на операции «вытяжка с принудительным утонением» нанесение износостойкого

покрытия TiN уменьшает величину контактных напряжений в (1,4-2) раза, снижает износ рабочих поверхностей на (25-30) % и повышает стойкость штампового инструмента на 30%; на операции «вырубка» снижение контактных напряжений составило до 30 %, износа рабочих поверхностей (11-28) % и повышение стойкости штампового инструмента в (1,22-1,26) раза. При этом, установлено, что наибольшую эффективность независимо от механизма деформирования имеет покрытие TiZrN.

5. Выявлены закономерности связи процесса изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента с составом износостойких покрытий, схемой напряженно-деформированного состояния и технологическими параметрами процесса листовой штамповки. Установлена рациональная величина межинструментального зазора при вырубке для сталей 08, 20, 45, соответствующая (5-7) % от толщины материала, при котором обеспечивается повышение качества поверхности разделения, уменьшение максимальных напряжений в очаге деформации, и как следствие, повышение стойкости инструментальной оснастки.

6. Установлено, что применение износостойких покрытий на основе нитрида титана, нанесенных методами ионно-плазменного напыления, способствует снижению пиковых значений нормальных напряжений в материале заготовки на (7-11) %, соответственно для износостойких покрытий TiN и TiZrN.

7. Экспериментальные испытания инструмента с покрытиями, проведенные в условиях действующего производства АО «Ульяновский патронный завод» и АО «Ульяновский НИАТ», подтвердили эффективность штампового инструмента с износостойкими покрытиями на основе нитрида титана, адекватность и достоверность расчётных моделей. Показано, что применение износостойких покрытий повышает износостойкость штампового инструмента на операции «вытяжка с принудительным утонением» на 39 %, на операции «вырубка» – (26-32) % в зависимости от состава износостойкого покрытия. При этом, установлено, что наибольшую эффективность независимо от механизма деформирования имеет покрытие TiZrN.

8. Предложена методика оценки экономической эффективности штампового инструмента с износостойкими покрытиями. Для операций листовой штамповки «вытяжка с принудительным утонением» и «вырубка» дана оценка стойкости и стоимости изготовления штампового инструмента, рассчитана относительная стоимость изготовления и определен сравнительный коэффициент. Техничко-экономическими расчетами показано, что использование износостойких покрытий позволяет добиться увеличения экономической эффективности использования штампового инструмента листовой штамповки на 8,4 % для формоизменяющих операций и на (49-51) % для разделительных операций.

9. Для процессов обработки металлов давлением экспериментально подтверждены диапазоны толщин износостойких покрытий 4-5 мкм, принятые в практике упрочнения режущего инструмента, позволяющие формировать устойчивые системы «подложка-покрытие», обеспечивающие требуемый уровень адгезии и механических свойств. Установлены ограничения и рациональные технологические схемы упрочнения и эксплуатации штампового инструмента для операций «вытяжка с принудительным и утонением» и «вырубка» методом ионно-плазменного напыления, заключающиеся в следующем:

1) перед нанесением износостойких покрытий методом КИБ рабочие поверхности должны подвергаться шлифованию до 7-8 квалитетов точности;

2) инструментальные стали, не относящиеся к категории теплостойких, должны обрабатываться при температуре не выше 400° С во избежание отпуска и разупрочнения (для сталей марок X12M, X12MФ и др. температурные режимы могут быть увеличены до 500° С);

3) габаритные размеры рабочих частей штамповой оснастки, подвергающихся процессу ионно-плазменного напыления, должны соответствовать отношения длины к диаметру не более, чем 12 к 1 во избежание неравномерности прогрева в процессе обработки;

4) приоритетным является использование инструментальных сталей с высоким содержанием хрома (выше 12%);

5) для инструмента с износостойким покрытием на операции вырубка наиболее рациональным является диапазон зазоров, равный 4-7% от толщины материала заготовки.

10. Технологические рекомендации по нанесению износостойких покрытий штампового инструмента переданы для использования на АО «Ульяновский НИИТ» (г. Ульяновск) и АО «Ульяновский патронный завод» (г. Ульяновск). Результаты исследований включены в учебный процесс подготовки бакалавров по направлению 15.03.01 Машиностроение.

Перспективными направлениями тематики диссертационной работы являются:

- вопросы использования многослойных функциональных износостойких покрытий на формоизменяющем инструменте;

- исследование процессов адгезии структур «подложка-покрытие» при нанесении износостойких покрытий на штамповый инструмент методом ионно-плазменного осаждения;

- расширение номенклатуры износостойких покрытий, наносимых на штамповый инструмент листовой и объемной штамповки;

- расширение номенклатуры и используемых материалов штампового инструмента, упрочняемого путем нанесения износостойких покрытий методами ионно-плазменного напыления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Северденко В.П. Брак в листовой штамповке / Северденко В.П., Овчинников П.С., Розенберг С.Э. - Минск: Наука и техника, 1973. – 168 с.
2. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке, 6-е изд., перераб. и доп. / Романовский В.П. – Ленинград: Машиностроение, 1979. – 520 с.
3. Хасуи, А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки. – Москва: Машиностроение, 1985. – 239с.
4. Рогов, В.А. Основы высоких технологий: [учебное пособие для вузов] / В. А. Рогов, Л. А. Ушомирская, А. Д. Чудаков. – Москва: Вузовская книга, 2001. – 253 с.
5. Тюрин, Ю.Н. Электролитно-плазменное упрочнение деталей буровых станков / Ю.Н. Тюрин // Сварщик. – 1998. – №4. – С. 6-10.
6. Дубинин, Г.Н. Прогрессивные методы химико-термической обработки / Г.Н. Дубинин, Л.Г. Ворошнин, И.И. Барам и др. - Москва: Машиностроение, 1979. - 184 с.
7. Самсонов В.Г. Электроискровое легирование металлических поверхностей / В. Г. Самсонов, А. Д. Верхотуров. – Киев: Наукова думка, 1976. – 220 с.
8. Косилова, А.Г. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Ю. А. Абрамов, В. Н. Андреев, Б. И. Горбунов, под ред. А. Г. Косиловой. – М.: Машиностроение, 1985. – Т. 2 – 1985. – 495 с.
9. Дубинин Г.Н. Диффузионное хромирование сплавов в порошках / Гос. науч.-техн. ком-т Совета Министров СССР. Акад. наук СССР. Филиал Всесоюз. ин-та науч. и техн. информации. - Москва: Б. и., 1959. - 32 с.
10. Лахтин Ю.М. Азотирование стали / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган. - Москва: Машиностроение, 1976. - 256 с.
11. Степанкин И.Н. Контактное изнашивание инструментальных сталей Х12М, 9ХС и У8А / Степанкин И.Н., Поздняков Е.П. // Вестник Гомельского государственного технического университета – 2015. - №3. - с. 19-24.

12. Жостик Ю.В. Исследование ударного изнашивания разделительных штампов и повышение их стойкости лазерным легированием: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.04, 05.02.08/ Жостик Юрий Владимирович – Брянск, 1998, - 150 с.

13. Левашов Е.А. Современное состояние в области получения и исследования функциональных наноструктурированных покрытий / Левашов Е.А., Штанский Д.В., Кирюханцев, Корнеев Ф.В., Петржик М.И. // Проблемы черной металлургии и материаловедения – 2009. - № 1. - С. 65–88.

14. Cherkasova N.Y. Study of mechanism and kinetics of wear of shearing dies from semi-heat-resistant steels in machining articles made from various structural materials / Cherkasova N.Y., Shein A.A., Antonenkova G.V., Sotova E.S. // Journal of Friction and Wear - 2013. - Т. 34. - № 3. - С. 214–220.

15. Тарасов С.Ю. Структурные изменения в металлических материалах в условиях адгезионного трения: дисс. ... докт. техн. наук: 05.02.01 / Тарасов Сергей Юльевич – 2008, Томск. - 123 с.

16. Карачун А.Е. Повышение стойкости рабочих деталей разделительных штампов покрытием нитридом титана: дисс. ... канд. техн. наук: 05.03.05 / Карачун Анджей – Москва, 1993, 140 с.

17. Фукс-Рабинович Г.С. Научные принципы выбора материалов для износостойкого режущего и штампового инструмента с учетом оптимизации структурного состояния: дисс. ... докт. техн. наук: 05.02.01 / Фукс-Рабинович Герман Симанович – Москва, 1993, 450 с.

18. Кисурина Н.А. Повышение стойкости штампового инструмента для горячей обработки металлов давлением: дисс. ... канд. техн. наук: 05.03.05 / Кисурина Наталия Александровна – Орел, 2001, 168 с.

19. Павлов И.В. Многослойные покрытия для инструмента штампов горячего деформирования из жаропрочных литых никелевых сплавов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / Павлов Игорь Васильевич – Курск, 2001, 186 с.

20. Бартенев Д.В. Разработка наплавочного сплава и технологии упрочнения и ремонта штампов горячего деформирования: дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / Бартенев Денис Викторович - Курск, 2008, 138 с.

21. Коваленко И.А. Исследование процесса поверхностного упрочнения сталей и сплавов ионами неметаллов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / Коваленко Ирина Анатольевна – Липецк, 2007, 122с.

22. Жилиев В.А. Повышение эксплуатационных свойств деталей из коррозионностойких упрочняемых сталей лазерной обработкой: дисс. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Жилиев Владимир Анатольевич – Волгоград, 2005, 133 с.

23. Шеин А.А. Технологическое обеспечение качества деталей в процессах разделительной штамповки путем нанесения на инструмент вакуумно-плазменных покрытий: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Шеин Александр Анатольевич – Москва, 2005, 156 с.

24. Кравцова Е.А. Влияние вакуумно-диффузионного упрочнения на стойкость штампового инструмента для горячего деформирования: дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / Кравцова Елена Александровна – Тольятти, 1998, 209 с.

25. Петров В.И. Технологические основы обеспечения стойкости инструмента и формирования качества изделий цепного производства при полугорячем выдавливании: дисс. ... докт. техн. наук: 05.03.05 / Петров Виктор Иванович – Тула, 2008, 392 с.

26. Фатеев В.И. Технологические основы повышения стойкости полых пуансонов для горячего деформирования осесимметричных поковок: дисс. ... докт. техн. наук: 05.03.05 / Фатеев Вячеслав Игоревич – Тула, 2009, 295 с.

27. Хмара С.М. Твердосплавные штампы / Хмара С.М., Марков А.Г., Герасименко К.С. - Харьков: Кн. изд-во, 1964. - 87 с.

28. Марков А.Г. Комбинированный штамп для изготовления деталей сложной формы / А. Г. Марков. - Москва: ГОСИНТИ, 1963. - 7 с.

29. Герасименко К.С. Твердосплавные штампы: Опыт конструирования, изготовления, эксплуатации / Герасименко К.С., Кириллов Г.И., Хмара С.М. - Харьков: Прапор, 1971. - 78 с.

30. Хмара С.М. Работы Харьковского политехнического института по созданию и внедрению твердосплавного штампового инструмента / Хмара С.М., Герасименко К.С. - Москва : ВНИИ, 1965. - 7 с.

31. Мацевитый, В. М. Покрытия для режущих инструментов: монография / В. М. Мацевитый. – Харьков: Вища шк., 1987. 128 с.
32. Кабалдин, Ю. Г. Структура, прочность и износостойкость композиционных инструментальных материалов / Ю.Г. Кабалдин; Рос. акад. наук. Дальневост. отд-ние, Ин-т машиноведения и металлургии, Комс.-на-Амуре гос. техн. ун-т. - Владивосток : Дальнаука, 1996. - 183 с.
33. Андриевский, Р. А. Прочность тугоплавких соединений и материалов на их основе: Справочник / Р. А. Андриевский, И. И. Спивак. - Челябинск : Металлургия : Челяб. отд-ние, 1989. - 367 с.
34. Зубарев, П. В. Жаропрочность фаз внедрения / П.В. Зубарев, под ред. С.Б. Масленкова. - М. : Металлургия, 1985. - 103 с.
35. Гольдшмидт, Х. Дж. Сплавы внедрения / Х. Дж. Гольдшмидт, перевод с англ. С. Н. Горина и Б. А. Клыпина ; Под ред. д-ра техн. наук Н. Т. Чеботарева. - Москва : Мир, 1971 - 464 с.
36. Самсонов, Г. В. Тугоплавкие соединения: справочник / Г.В. Самсонов, И. М. Веницкий. – Москва: Металлургия, 1976. – 560 с.
37. Верещака А. С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / Верещака А. С. - Москва: Машиностроение, 1993. - 336 с.
38. Адашкин А.М. Исследование механизма изнашивания твердосплавного инструмента при обработке жаропрочных сплавов / Адашкин А.М., Верещака А.А., Верещака А.С. // Трение и износ - 2013. - Т. 34. - № 3. - с. 277-283.
39. Табаков, В. П. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями на основе сложных нитридов и карбонитридов титана / В. П. Табаков; М-во общ. и проф. образования РФ. Ульян. гос. техн. ун-т. - Ульяновск : УлГТУ, 1998. - 122 с.
40. Табаков, В. П. Работоспособность торцовых фрез с многослойными износостойкими покрытиями / В. П. Табаков, М. Ю. Смирнов, А. В. Циркин; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш.

проф. образования Ульяновский гос. технический ун-т. - Ульяновск : УлГТУ, 2005. - 151 с.

41. Çalışkan H. Wear behavior and cutting performance of nanostructured hard coatings on cemented carbide cutting tools in hard milling / Çalışkan H., Kurbanoglu C., Panjan P., Čekada M., Kramar D. // Tribology International - Vol. 62. - 2013. - P. 215-222.

42. Fox-Rabinovich G.S. Disind and performange of AlTiN and TiAlCrN PVD coatings for machining of hart to cut materials / Fox-Rabinovich G.S., Kovalev A.I., Aguirre M.N. //Surface and Coatings Technology - 2009. - Vol.204. - P.489-496.

43. Faga M.G. AiSiTiN nanocomposite coatings developed via arscathodis PVD: evaluation of wear resistance via tribological analysis and high speed machining operations / Faga M.G., Gautiel G., Calzavarini R. et al. //Wear - 2007. - Vol.263. - P. 1306-1313.

44. Baimpas N. Stress evaluation in thin films: Micro-focus synchrotron X-ray diffraction combined with focused ion beam patterning for do evaluation / Baimpas N., Bourhis E.L., Eve S., Thiaudière D., Hardie C., Korsunsky A.M. //Thin Solid Films. - Vol. 549. - 2013. - P. 245-250.

45. Кравчук А.С. Прикладные контактные задачи для обобщенной стержневой модели покрытия: монография. / Кравчук А.С., Кравчук А.И. – СПб: Наукоемкие технологии, 2019. – 221 с.

46. Горячева И.Г. Моделирование контактно-усталостного разрушения двухслойного упругого основания / Горячева И.Г., Торская Е.В. // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. - 2008. - № 3. - С. 132-144.

47. Торская Е.В. Моделирование фрикционного взаимодействия тел с покрытиями: дисс. ... докт. техн. наук: 01.02.04 / Торская Елена Владимировна - Москва, 2015, 291 с.

48. Солдатенков И.А. Использование решения износоконтактной задачи для моделирования изнашивания при фреттинг-коррозии / Солдатенков И.А., Чой К.Й. // Трение и износ. - 2007. - Т. 28. - № 6. - С. 567-574.

49. Li P. Microstructure, mechanical and thermal properties of TiAlN/CrAlN multilayer coatings / Li P., Chen L., Wang S.O., Yang B., Du Y., Li J., Wu M.J.// International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. - Vol. 40. - 2013. P. 119
50. Bouzakis K.D. New Methods for Characterizing Coating Properties at Ambient and Elevated Temperatures / Bouzakis K.D., Batsiolas M., Maliaris G., Pappa M., Bouzakis E., Skordaris G. // Key Engineering Materials. – 2010. - T.438. - P.107-114.
51. Bouzakis K.D. Characterization of Cohesion, Adhesion and Creep-Properties of Dynamically Loaded Coatings through the Impact Tester / Bouzakis K.D., N. Michailidis, A. Lontos, A. Siganos, S. Hadjiyiannis, G. Giannopoulos, G. Maliaris, T. Leyentecker, G. Erkens // Zeitschrift fuer Metallkunde, - 2001. T-49. – P. 1180-1185.
52. Beake B.D. Coating optimisation for high speed machining with advanced nanomechanical test methods / B.D. Beake, G.S. Fox-Rabinovich, S.C. Veldhuis, S.R. Goodes // Surface & Coatings Technology. – 2009. – T. 203. P. 1919.
53. Fox-Rabinovich G.S. Effect of mechanical properties measured at room and elevated temperatures on the wear resistance of cutting tools with TiAlN and AlCrN coatings / G.S. Fox-Rabinovich, B.D. Beake, J.L. Endrino, S.C. Veldhuis, P. Parkinson, L.S. Shuster, M.S. Migranov // Surface & Coatings Technology. – 2006. – T. 200. P. 5738.
54. Beake B.D. Nano-impact testing of TiFeN and TiFeMoN films for dynamic toughness evaluation / B.D. Beake, V.M. Vishnyakov, J.S. Colligon // Journal of Physics D: Applied Physics – 2011, T. 44. – P.504.
55. Beake B.D. Nano-impact testing - An effective tool for assessing the resistance of advanced wear-resistant coatings to fatigue failure and delamination / Beake B.D., Smith J.F. // Surface & Coatings Technology – 2004. vol. 188-189, no. 1-3, p. 594-598.
56. Beake B.D. Investigating the correlation between nano-impact fracture resistance and hardness/modulus ratio from nanoindentation at 25–500 °C and the fracture resistance and lifetime of cutting tools with Ti_{1-x}Al_xN (x = 0.5 and 0.67) PVD coatings in milling operations /B.D. Beake, J.F. Smith, A. Gray, G.S. Fox-Rabinovich, S.C. Veldhuis, J.L. Endrino // Surface & Coatings Technology. – 2007. – T. 201. P. 4585-4593.

57. Constantinides G. A multi-technique investigation of the nanoporosity of cement paste / G. Constantinides, C.A. Tweedie, D.M. Holbrook, P. Barragan, J.F. Smith // *Materials Science and Engineering*, - 2008, Т. 489 (1-2), - P. 403-412.

58. Constantinides G. Quantitative Impact Testing of Energy Dissipation at Surfaces / G. Constantinides, C.A. Tweedie, N. Savva, J.F. Smith, K.J. Van Vliet // *Experimental Mechanics* – 2009 - Т. 49 – P.511-522.

59. Bouzakis K.D. Advanced analytical-experimental procedures facilitating the effective application of micro-blasting on coated tools considering among others the film brittleness / K.D. Bouzakis, G. Skordaris, E. Bouzakis, S. Gerardis // *Journal of production engineering* – 2012. - Vol.15 – Т.2 – P.2008

60. LS-DYNA® Keyword User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, CA, US [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals/LS-DYNA_Keyword_Manual_971_Rev5-beta.pdf

61. ANSYS FLUENT 12.0 Documentation, ANSYS, Inc., PA, US. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://usermanual.wiki/Document/ANSYSTheoryGuide.39891911.pdf>

62. Крагельский И.В. Трение и износ - 2-е изд., доп. и перераб. / Крагельский И.В. Москва: Машиностроение, 1968 – 480 с.

63. Archard, J. F. Wear theory and mechanisms. In *Wear control handbook*. / Archard, J. F. : American Society of Mechanical Engineers, 1980, P. 269-290.

64. Qiu, X. Prediction of wear of mill lifters using discrete element method / Qiu, X., Potapov, A., Song, M., and Nordell, L. // *Materials of 2001 SAG Conference Proceedings*. University of British Columbia, Vancouver, B.C., Canada – 2001 – P.129.

65. Табаков В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента / - Москва : Машиностроение, 2008. - 311 с.

66. Табаков В.П. Повышение эффективности режущего инструмента путем направленного изменения параметров структуры и свойств материала износостойкого покрытия: дисс. ... докт. техн. наук: 05.03.01 / Табаков Владимир Петрович - Ульяновск, 1992. - 584 с.

67. Borrval T. Simulation of Wear Processes in LS-DYNA / T. Borrvall, A. Jernberg, M. Schill // 14th International LS-DYNA Users Conference - 2016. P.1256.

68. Holmquist T. J. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures / Holmquist T. J., Johnson G. R., Cook W. H. // I Proc. 14th Int. Symp. Ballistics. Quebec City, Canada, 26-29 September, 1993. Vol. 2. P. 591–600.

69. Seagraves A. Large-scale 3D modeling of projectile impact damage in brittle plates / Seagraves A., Radovitzky R. // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2015. –Vol. 83. – P. 48-71.

70. Gamble E.A. Impact response of layered steel–alumina targets / Gamble E.A., Compton B.G., Zok F.W. // Mechanics of Materials. – 2013. –Vol. 60. P. 80-92.

71. Deshpande V.S. Inelastic deformation and energy dissipation in ceramics: A mechanism-based constitutive model / Deshpande V.S., Evans A.G. // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2008. Vol. 56. – P. 3077-3100.

72. Denoul C. A damage model for the dynamic fragmentation of brittle solids / Denoul C., Hild F. // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. –2000. – Vol.183. – Issue 2-3. – P. 247-258.

73. Forquin P. A probabilistic damage model of the dynamic fragmentation process in brittle materials / Forquin P., Hild F. // Advances in Applied Mechanics. – 2010. – Vol. 44. –P. 1-72.

74. Hild F. On the probabilistic-deterministic transition involved in a fragmentation process of brittle materials / F. Hild, C. Denoul, P. Forquin, X. Brajer // Computers and Structures. – 2003. – Vol. 81. – P. 1241-1253.

75. Bresciani L.M. Numerical modelling to reproduce fragmentation of a tungsten heavy alloy projectile impacting a ceramic tile: Adaptive solid mesh to the SPH technique and the cohesive law / L.M. Bresciani, A. Manes, T.A. Romano, P. Iavarone, M. Giglio // International Journal of Impact Engineering. – 2016. – Vol. 87. – P. 3-13.

76. Bürger D. Ballistic impact simulation of an armour-piercing projectile on hybrid ceramic/fiber reinforced composite armours / D. Bürger, A.R. de Faria, S.F.M. de

Almeida, F.C.L. de Melo, M.V. Donadon // International Journal of Impact Engineering. – 2012. – Vol. 43. – P. 63-77.

77. Кудрявцев О.А. Расчетно-экспериментальное исследование деформирования и разрушения слоистых керамокомпозитных пластин при локальном ударе: дисс. ... канд. техн. наук: 01.02.04 / Кудрявцев Олег Александрович – Челябинск, 2016, 125 с.

78. Holmquist T.J. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures / Holmquist T.J., Johnson G.R., Cook W.H. // Fourteenth International Symposium on Ballistics. Quebec City, Canada, September 1993. P. 1-10.

79. Polanco-Loria M. Numerical predictions of ballistic limits for concrete slabs using a modified version of the HJC concrete model / Polanco-Loria M., Hopperstad O.S., Borvik T., Berstad T. // International Journal of Impact Engineering – 2008 – vol.35 -P. 290-303.

80. Wu H.J. Experimental and numerical investigation on the dynamic tensile strength of concrete / Wu H.J., Zhang Q.M., Huang F.L., Jin Q.K. // International Journal of Impact Engineering – 2005. – vol. 32. - P. 605-617.

81. Пирогов С.А. Исследование деформирования и разрушения малопластичных разносопротивляющихся сред при ударных воздействиях: дисс. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.04 / Пирогов Сергей Александрович - Нижний Новгород, 2012, 135 с.

82. Пирогов С.А. Модель динамического деформирования и разрушения разносопротивляющихся материалов при интенсивных ударных воздействиях / Пирогов С.А. // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. Нижегород. ун-т. - 2012. - Вып. 74. - С. 40-48.

83. Садырин А.И. Моделирование процесса внедрения жесткого ударника в бетонную преграду / Садырин А.И., Крылов С.В., Пирогов С.А., Цветкова Е.В. // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. Нижегород. ун-т. - 2006. - Вып. 68. - С. 66-77.

84. Садырин А.И. Динамическое внедрение жестких ударников в бетонные преграды / Садырин А.И., Крылов С.В., Батарин А.Б., Пирогов С.А. // Вестник Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. - Н. Новгород: из-во Нижегородского университета. - 2008. - №4. - С. 112-116.

85. Ламзин Д.А. Высокоскоростное деформирование и разрушение мелкозернистых бетонов: дисс. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / Ламзин Дмитрий Александрович – Нижний Новгород, 2014, 161 с.

86. Табаков В.П. Определение механических характеристик износостойких ионно-плазменных покрытий на основе нитрида титана / Табаков В.П., Чихранов А.В. // Известия Самар. науч. центра РАН. – 2010. – Т. 12, № 4. – С. 292–297.

87. Шенбергер П.Н. Совершенствование процесса разделительных операций изготовления крупногабаритных заготовок из тонколистового материала и проектирование оснастки для их получения: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.09 / Шенбергер Полина Николаевна - Тольятти, 2018, 140 с.

88. Головин Р.А. Технология и оборудование холодной штамповки: [Учеб. для машиностроит. техникумов по спец. "Ковоч.-штамповоч. пр-во"] / В. А. Головин, Г. С. Ракошиц, А. Г. Навроцкий. - М. : Машиностроения, 1987. - 352 с.

89. Илюшкин М.В. Моделирование процессов обработки металлов давлением. Теория и семинары / Илюшкин М.В. – Ульяновск, 2017. 125 с.

90. Аверкиев Ю.А. Технология холодной штамповки: [Учеб. для вузов по спец. "Машины и технология обраб. металлов давлением" и "Обраб. металлов давлением"] / Ю. А. Аверкиев, А. Ю. Аверкиев. - М. : Машиностроение, 1989. – 303 с.

91. Рудман Л.И. Справочник конструктора штампов: Листовая штамповка / Под общ. ред. Л. И. Рудмана, М.: Машиностроение 1988. 495 с.

92. Зубцов М.Е. Листовая штамповка 3-е изд., перераб. и доп. / Зубцов М.Е. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1980. – 432 с.

93. Кокорин В.Н. Исследование и анализ напряженно-деформированного состояния разделительных операций листовой штамповки / В.Н. Кокорин, В.П.

Табаков, О.И. Морозов, Ю.А. Титов, Н.В. Мишов, Н.П. Шиллер, А.С. Корчакин // Заготовительные производства в машиностроении - 2021. - Том 19. - № 11, - с. 3.

94. Кокорин В.Н. Исследование напряженно-деформированного состояния материала заготовки при нагружении клиновидным инструментом / В.Н. Кокорин, Д.Р. Подмарев, М.А. Храмов, Н.В. Мишов, Н.В. Шиллер // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2020. - Т. 16. - № 7. - С. 297—299.

95. Табаков В.П. Повышение стойкости штампового инструмента с износостойким покрытием на формоизменяющих операциях / В.П. Табаков, В.Н. Кокорин, Е.Л. Корняков, О.И. Морозов, А.С. Алешин, Д.И. Сагитов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2020. - № 6. - С. 352—358.

96. Морозов О.И. Моделирование напряженно-деформированного состояния штампового инструмента с износостойким покрытием на разделительных операциях листовой штамповки с использованием программного пакета LS-DYNA / О.И. Морозов, В.П. Табаков, В.Н. Кокорин, М.В. Илюшкин, Ю.А. Титов, Д.И. Сагитов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. - 2020. - Т. 22. - № 3. - С. 5—11.

97. Морозов О.И. Физическая модель структурирования в процессах комплексного модифицирования поверхностного слоя рабочих частей штампов и пресс-форм / О.И. Морозов, Н.В. Мишов, Н.П. Шиллер, А.М. Бузыцкий // Сборник трудов XXX Междунар. инновационной конф. молодых ученых и студентов (МИКМУС—2018), Москва - 2019. - С. 39—41.

98. Табаков В.П. Моделирование процесса предварительной механической активации подложки композиции покрытие—металл и исследование напряженного и деформированного состояния рабочих поверхностей штампового инструмента / В.П. Табаков, В.Н. Кокорин, О.И. Морозов, А.С. Алешин, М.Ф.Д. Аль-Кадхими, Д.И. Сагитов // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2019. - Т. 15. - № 11 (179). - С. 523—528.

99. Морозов О.И. Повышение стойкости рабочих поверхностей деталей штампов при использовании комплексной модификации / О.И. Морозов, В.Н. Кокорин, В.П. Табаков, Д.И. Сагитов, М.В. Илюшкин, Н.А. Ширманов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2019. - № 3. - С. 317—326.

100. Кокорин В.Н. Исследование комплексного модифицирования поверхности рабочего штампового инструмента при использовании механической активации сортового металлопроката / В.Н. Кокорин, В.П. Табаков, А.А. Григорьев, О.И. Морозов // Наука, теория, практика авиационно-промышленного кластера современной России: материалы III Междунар. науч.-производственной конф., приуроченной ко Дню Российской науки и 95-летию гражданской авиации России. - 2018. - С. 39—42.



Акционерное общество
«Ульяновский
патронный завод»

432007, г. Ульяновск, ул. Шоферов, 1
ИНН 4303017328500127/732801001
ОГРН 1047301521520
Тел. (8422) 26-95-55
Факс (8422) 26-95-80, (8422) 26-97-12
E-mail: info@ulnammo.ru

24.02.2024

УТВЕРЖДАЮ
Технический директор



Е.Л. Корняков

Акт

об использовании результатов производственных испытаний штампового
инструмента с износостойким покрытием

Научно-техническая комиссия в составе технического директора Корнякова Евгения Львовича, главного технолога Глухова Алексея Александровича, начальника инструментального цеха №5 Свидерского Михаила Владимировича, констатирует, что результаты производственных испытаний штампового инструмента с износостойким покрытием, проводимых на АО «Ульяновский патронный завод» старшим преподавателем кафедры «Материаловедение и обработка металлов давлением» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» Морозовым О.И., проводимых в рамках исследования процессов повышения стойкости штампового инструмента с использованием износостойких покрытий, нанесенных методами ионно-плазменного напыления, имеют прикладной научно-технический характер и высокий



Система менеджмента качества ОАО «Ульяновский патронный завод» сертифицирована на соответствие требованиям национального стандарта Российской Федерации ГОСТ Р ИСО 9001-2015 и государственного военного стандарта Российской Федерации ГОСТ РВ 9015-002-2012

потенциал использования в технике и технологии холодного деформирования листового металлопроката.

На нашем предприятии успешно прошли опытно-промышленные испытания штампового инструмента с использованием износостойкого покрытия из нитрида титана при использовании разделительных и формоизменяющих операций листовой штамповки. Рабочие детали штампового инструмента с покрытием из нитрида титана показали высокий эксплуатационный ресурс. При использовании инструмента с нанесенным на рабочую поверхность износостойким ионно-плазменным покрытием прогнозировано повышение эксплуатационного ресурса рабочих деталей штампа в 1,5 раза, по сравнению с традиционной технологией изготовления инструмента.

Рабочий инструмент с нанесенным износостойким покрытием можно рекомендовать для изготовления широкой номенклатуры изделий листовой штамповки.

В дальнейшем наша организация готова к сотрудничеству с Морозовым О.И. по данной тематике и совместным работам по совершенствованию технологии изготовления рабочих деталей штампового инструмента листовой штамповки с использованием износостойких покрытий.

Главный технолог

Начальник цеха 5



Глухов А.А.

Свидерский М.В.



Система менеджмента качества ОАО «Ульяновский патронный завод»
сертифицирована на соответствие требованиям национального стандарта
Российской Федерации ГОСТ Р ИСО 9001-2015 и государственного военного
стандарта Российской Федерации ГОСТ РВ 6015.603-2015



Акционерное общество
"Ульяновский научно-исследовательский институт
авиационной технологии и организации производства"
(АО "Ульяновский НИАТ")

ИНН 7328049049 КПП 730350001

432010 г. Ульяновск, ул. Врача Михайлова, 34

тел./факс (8422) 55-13-48, 55-02-82, 52-46-81, 52-00-11, 52-67-47, 52-53-76

E-mail: info@ulniat.ru www.ulniat.ru

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

АО «Ульяновский НИАТ»

д.т.н., Марковцев В.А.

27.01.2022

Акт

об использовании результатов кандидатской диссертации О.И. Морозова «Повышение стойкости штампов листовой штамповки путем применения износостойких покрытий»

Научно-техническая комиссия в составе заместителя генерального директора по науке Илюшкина Максима Валерьевича, заместителя генерального директора по производству Баранова Александра Сергеевича, начальника НИС-132 Халилова Фарита Ханифовича, констатирует, что работа О.И. Морозова, посвященная исследованию процесса повышения стойкости инструмента за счет использования износостойких покрытий на основе нитрида титана, нанесенных методами физического осаждения, имеет прикладной характер и высокий потенциал использования в технике и

технологии листовой штамповки для повышения стойкости инструмента разделительных и формообразующих операций.

На нашем предприятии успешно прошли опытно-промышленные испытания и показали повышенный эксплуатационный ресурс опытной партии штампового инструмента с покрытием на основе нитрида титана (TiN и TiZrN). При использовании пробивных пуансонов с нанесенным на рабочую поверхность износостойким ионно-плазменным покрытием отмечено повышение эксплуатационного ресурса в 1,2-1,3 раза, по сравнению с традиционной технологией изготовления инструмента. Экономический эффект при использовании износостойких покрытий составляет 49-51% от затрат по сравнению со стойкостью изготовления без покрытия. Инструмент с нанесенным износостойким покрытием можно рекомендовать для использования при штамповке широкой номенклатуры изделий листовой штамповки.

В дальнейшем наша организация готова к сотрудничеству с Морозовым О.И. по данной тематике и совместным работам по совершенствованию технологии изготовления рабочих деталей штампового инструмента с использованием износостойких покрытий.

Заместитель генерального
директора по науке, к.т.н.



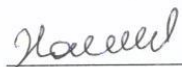
Илюшкин М.В.

Заместитель генерального
директора по производству



Баранов А.С.

Начальник НИС-132



Халилов Ф.Х.



Первый проректор,
проректор по учебной работе
Ульяновского государственного
технического университета
Суркова Е.В.

Акт

о внедрении результатов диссертации на тему «Повышение стойкости штампов листовой штамповки путем применения износостойких покрытий» в учебный процесс

Настоящим подтверждается внедрение материалов диссертации Морозова О.И. в учебный процесс подготовки бакалавров по направлению 15.03.01 Машиностроение (профили: «Системы пластического формоизменения в цифровом производстве», «Машины и технология обработки металлов давлением») Ульяновского государственного технического университета в рамках дисциплин «Технология листовой штамповки», «Численные методы моделирования процессов пластического формоизменения», «Цифровые технологии проектирования элементов гибких производственных систем», «Надежность гибких производственных систем».

Зав. кафедрой
«Материаловедение и ОМД»
д.т.н., профессор

Кокорин В.Н.

Параметры модели износа Д. Арчарда

Параметр	Инструмент								
	Без покрытия			С покрытием TiN			С покрытием TiZrN		
Коэффициент износа К	1.2*10 ⁻⁶			1.7*10 ⁻⁶			0,8*10 ⁻⁷		
Межинструментальный зазор Z, мм	0,04	0,07	0,10	0,04	0,07	0,10	0,04	0,07	0,10

Параметры модели хрупкого материала Джонсона-Холмквиста

Параметры модели	Покрытие TiN	Покрытие TiZrN	Параметры модели	Покрытие TiN	Покрытие TiZrN
ρ, кг*м ³	5,44	6,83	HEL, ГПа	9	12,38
G, ГПа	127	145	PHEL, ГПа	0	0
Константы прочности			Константы разрушения		
A	0,85	0,85	D1	0,021	0,023
B	0,3	0,4	D2	1,86	1,8
C	0,02	0,013	Константы уравнения состояния		
M	0,35	0,24	K1, ГПа	205	201
N	0,29	0,35	K2, ГПа	0	0
EPSI	1	1	K3, ГПа	0	0
T, ГПа	0,32	0,32	BETA	0	0
SFMAX, ГПа	0,8	0,8			