

на правах рукописи



НГУЕН ВАН ТИнь

**ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПЛОСКИХ КОЛЬЦЕВЫХ
ДЕТАЛЕЙ С УТОЛЩЕННЫМИ УПРУГИМИ СЛОЯМИ**

Специальность 2.5.7 – Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула, 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
Черняев Алексей Владимирович.

Официальные оппоненты: **Сосенушкин Евгений Николаевич,**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ
ВО «Московский государственный технологи-
ческий университет «СТАНКИН» (г. Москва),
профессор кафедры «Системы пластического
деформирования»;

Булычев Владимир Александрович,
кандидат технических наук, доцент,
ОАО «Центральное конструкторское бюро апа-
ратостроения» (г. Тула), главный специалист.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Орловский государственный уни-
верситет им. И.С. Тургенева».

Защита состоится «15» марта 2022 г. в 16:00 на заседании диссертаци-
онного совета 24.2.417.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский госу-
дарственный университет» (300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, 9-101).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ
ВО «Тульский государственный университет»
https://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/Nguyen_Van_Tin/

Автореферат разослан «20» января 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Черняев
Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Среди различных способов повышения эффективности изготовления различной продукции важное значение имеет уменьшение трудоемкости и себестоимости ее производства, а также улучшение качества и эксплуатационных характеристик. Во многих отраслях промышленности, таких, как машиностроение, атомная энергетика, строительство нефтяных, газовых и прочих магистралей для перемещения жидких и газообразных агрессивных сред широко применяются многослойные комбинированные конструкции с чередующимися металлическими и упруго-эластичными слоями из композитных материалов. Это относится и к многослойным уплотнительным плоским элементам различной конфигурации и назначения, в частности, к трехслойным уплотнительным (прокладочным, компенсаторным и прочим) деталям, у которых средний слой является металлическим, а периферийные слои – из терморасширенного графита (ТРГ). Также часто используются аналогичные конструкции, у которых наоборот, периферийные слои – металлические, а средний слой – из ТРГ.

Терморасширенный графит представляет собой экологически чистый материал, имеющий уникальные свойства. Он химически инертен к агрессивным средам, не реагирует на радиацию. Ему свойственны большая упругость и высокая термостойкость, а также низкий коэффициент трения и высокая стойкость к старению.

Значительную сложность изготовления указанных деталей высокого качества из данного многослойного материала наиболее эффективными способами обработки давлением (вырубка-пробивка) вызывает проблематичность применения жесткого прижима металлических слоев перед срезом вследствие наличия упруго-эластичных слоев. Указанное обстоятельство обуславливает образование комплекса дефектов изготавливаемых уплотнительных элементов, таких как изгиб металлических слоев в зоне обработки, увеличение эксцентриситета, а также отклонение от перпендикулярности периферийных плоскостей и торцевой поверхности детали. Особую значимость уменьшение возникающих дефектов имеет при увеличенных (относительно металлических) упруго-эластичных слоях (ТРГ). Результаты исследования известных литературных данных и проведенные патентные исследования позволяют утверждать, что повысить качество изготовления указанных уплотнительных элементов можно применением клиновых (в меридиональной плоскости) выступов на инструменте и штамповой оснастке.

Теоретическое и экспериментальное обоснование усовершенствованных конструкций инструмента и силовых режимов изготовления трехслойных уплотнителей повышенного качества с металлическими и увеличенными упруго-эластичными слоями является **актуальной научно-технической задачей**.

Работа выполнена в рамках гранта по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации НШ-2601.2020.8.

Цель работы. Расширение технологических возможностей разделительных операций штамповки многослойных уплотнительных, прокладочных и компенсаторных деталей с металлическими и упруго-эластичными слоями по толщине получаемых изделий путем обоснования рациональных конструкций инструмента, силовых режимов и совершенствования штамповой оснастки.

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

1. Усовершенствовать конструкции инструмента для изготовления разделительными операциями штамповки трехслойных плоских кольцевых уплотнительных, прокладочных и компенсаторных деталей с металлическими и упруго-эластичными слоями из композитных материалов (ТРГ) с установлением рациональных геометрических параметров деформирующего инструмента, оснастки и силовых режимов.

2. Исследовать влияние геометрических размеров инструмента с клиновыми кольцевыми выступами на качество вырубки трехслойных уплотнителей со средним металлическим слоем и утолщенными периферийными слоями из ТРГ путем проведения планируемого многофакторного эксперимента.

3. Определить аналитическим методом линий скольжения распределение напряжений при вдавливании в жесткопластическое полупространство клиновых (в меридиональном сечении) выступов на инструменте и установить результирующие аналитические зависимости для нахождения геометрических и силовых параметров, описывающих этот процесс.

4. Выполнить экспериментальную проверку полученных аналитических зависимостей для силового анализа разделительных операций штамповки трехслойных уплотнителей.

5. Разработать конструкцию универсального автоматизированного штампа с быстросъемным инструментом для изготовления кольцевых плоских деталей из материалов, имеющих металлические и эластичные слои.

6. Использовать результаты исследований в учебном процессе.

Объект исследования. Разделительные операции штамповки многослойных уплотнительных деталей с металлическими и упруго-эластичными слоями.

Предмет исследования. Закономерности и технические возможности уменьшения дефектов при изготовлении в штампах качественных трехслойных уплотнителей с металлическими и упруго-эластичными слоями.

Методы исследования. В теоретическом исследовании применен аналитический метод линий скольжения (характеристик) с использованием интегрального преобразования Лапласа-Карсона (операционного исчисления), позволяющий получить результирующие геометрические и силовые зависимости для расчета требуемых параметров процесса вдавливания гладкого клина в полуплоскость в условиях осесимметричного деформированного и напряженного состояний.

Экспериментальные исследования разделительных операций штамповки многослойных уплотнительных деталей выполнялись на испытательной машине Р5 с записью индикаторных диаграмм. При проведении экспериментальных исследований были задействованы положения полного планируемого факторного эксперимента, обработка результатов осуществлялась методами математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

- усовершенствованные конструкции инструмента для изготовления трехслойных плоских кольцевых деталей с металлическими и упруго-эластичными слоями разделительными операциями штамповки для следующих типовых конструктивных вариантов, имеющих: а) средний (силовой) металлический слой и утолщенные периферийные упруго-эластичные слои из ТРГ; б) наружные утолщенные (относительно среднего) периферийные металлические слои и средний слой из ТРГ;

- установленные путем проведения планируемого многофакторного эксперимента закономерности влияния геометрических размеров инструмента с клиновыми (на фронтальном разрезе) кольцевыми выступами на качество изготовления трехслойных уплотнителей;

- полученные и статистически обоснованные соответствующие уравнения регрессии, позволяющие сводить к малым допустимым значениям образующиеся дефекты;

- результаты исследований аналитическим методом линий скольжения (характеристик) процесса внедрения гладкого конусного инструмента в жесткопластическое полупространство с образованием наплыва с прямолинейной свободной границей для условий осесимметричного пластического течения деформируемого материала и установленные результирующие аналитические зависимости, позволяющие производить расчет геометрических и силовых параметров данной операции;

- результаты экспериментальных исследований силовых параметров разделительных операций штамповки трехслойных кольцевых уплотнителей из композитного материала;

- разработанные практические рекомендации для проектирования базового технологического процесса изготовления в штампах трехслойных кольцевых уплотнителей.

Научная новизна:

- установлены зависимости величины изгиба центрального металлического слоя в зоне разделения, отклонения от перпендикулярности торцевой поверхности изготавливаемой детали и технологической силы вырубки-пробивки трехслойных уплотнителей от геометрических характеристик инструмента;

- впервые аналитически описаны в форме соответствующих уравнений закономерности формирования и развития пластической области при внедрении конусного инструмента в жесткопластическую полуплоскость с образованием наплыва с прямолинейными свободными границами в условии осевой симметрии.

Практическая значимость. Разработаны регрессионные модели процессов изготовления разделительными операциями штамповки плоских трехслойных уплотнительных элементов типа шайба с металлическими слоями и слоями из терморасширенного графита; сформулированы практические рекомендации по рациональному проектированию предлагаемых технологий в условиях серийного многономенклатурного производства с назначением требуемых геометрических размеров инструмента; разработана конструкция универсального штампа для изготовления кольцевых уплотнителей из трехслойного материала.

Реализация работы. Результаты исследований использованы в учебном процессе при подготовке магистров по направлениям: 15.04.01 «Машиностроение» и 15.04.02 «Технологические машины и оборудование».

Апробация работы.

Результаты исследований доложены на: VII Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Металлургия XXI столетия глазами молодых» / Донецк: ДонНТУ – 2021; Региональной магистерской научной конференции (РМНК), Тула, ТулГУ (2020, 2021 г.г.); Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации». Тула, ТулГУ, 2021 г.

Публикации. Материалы проведенных исследований отражены в 8 статьях в изданиях, рекомендуемых ВАК для опубликования материалов диссертационных работ, 4 статьях и тезисах докладов на научно-технических конференциях различного уровня.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения и пяти разделов, заключения, списка использованных источников из 165 наименований, и включает 193 страницу машинописного текста, 78 рисунков и 25 таблиц.

Автор выражает глубокую благодарность д-ру техн. наук, профессору Г.В. Панфилову за оказанную помощь при выполнении работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой задачи, приведено краткое содержание разделов диссертационной работы и сформулирована цель работы.

В первом разделе проведен обзор области применения существующих трехслойных уплотнительных, прокладочных, компенсаторных и других конструкций из трехслойных материалов, состоящих из металлических (несущих, силовых) слоев и непосредственно уплотняющих различные соединения упруго-эластичных слоев (в частности, ТРГ). Выполнен анализ известных подходов к изготовлению указанных деталей и исследованию предельных технологических возможностей применения разделительных операций в штампах с соблюдением условий обеспечения их качества.

Проведен обзор работ по аналитическому методу линий скольжения применительно к условиям осесимметричного деформированного состояния. Данный метод был обоснован и получил свое развитие в работах Х. Генки, Р. Хилла, А.А. Ильюшина, А.Ю. Ишлинского, Д.Д. Ивлева, Р. Шилда, Б.А. Друянова, Р.И. Непершина, А.З. Журавлева, Л.С. Ураждиной, В.И. Ураждина, И.П. Ренне, Г.В. Панфилова и других.

Сформулированы цель и задачи исследования.

Во втором разделе осуществлено усовершенствование конструкций инструмента для изготовления разделительными операциями обработки металлов давлением трехслойных плоских кольцевых деталей с металлическими и упруго-эластичными слоями, содержащих средний металлический слой и наружные упруго-эластичные слои увеличенной (по отношению к среднему слою) толщины, а также предложена новая конструкция инструмента для изготовления изделий из трехслойных материалов, для которых наружными являются металлические слои, а средний – из ТРГ.

С целью расширения технологических возможностей изготовления трехслойных кольцевых плоских деталей с наружными слоями увеличенной толщины из композитных упругих материалов были обоснованы конструкции штамповой оснастки и инструмента для вырубки (рис. 1) и пробивки отверстий (рис. 2). Сформулированы рекомендации по назначению рациональных геометрических параметров пуансонов, матриц и кольцевых прижимов в зависимости от первоначальной толщины верхнего $S_{в.с.}^0$ и нижнего $S_{н.с.}^0$ упругих слоев и центрального металлического слоя S_M , обеспечивающие надежную реализацию исследуемых процессов.

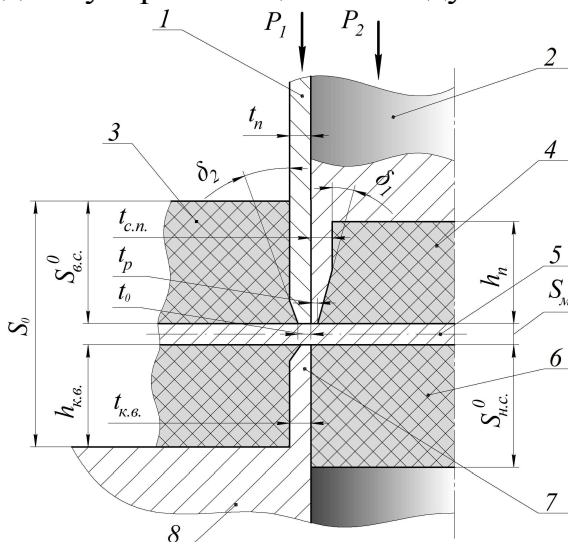


Рис. 1. Оснастка и специальный инструмент для вырубки:
1 – прижим, 2 – пуансон; 3 – верхний эластичный слой; 4 – глухое отверстие пуансона; 5 – металлический слой; 6 – нижний эластичный слой; 7 – режущая кромка матрицы; 8 – матрица.

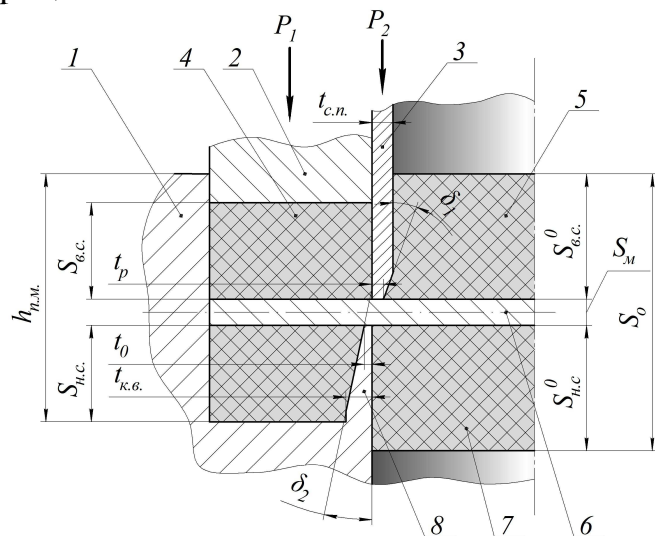


Рис. 2. Оснастка и специальный инструмент для пробивки:
1 - матрица; 2 – прижим; 3 – пуансон; 4 – верхний сжатый эластичный слой; 5 – верхний эластичный слой; 6 – металлический слой; 7 – нижний эластичный слой; 8 - режущая кромка матрицы.

Применение указанных рекомендаций позволяет расширить технологические возможности изготовления полуфабрикатов с требуемым наружным диаметром рассматриваемых трехслойных плоских кольцевых деталей с параметра $k_B = (S_{в.с.}^0 = S_{г.с.}^0) / S_M \leq 1,5$ до $k_B \leq 6,3$ для операции вырубki и с $k_{II} = (S_{в.с.}^0 = S_{н.с.}^0) / S_M \leq 4,5$ до $k_{II} \leq 8,8$ для операции пробивки.

Для конструктивных вариантов, когда наружными являются металлические слои, а средний – из ТРГ, определены предельные значения толщин $S_{пред}$ металлических слоев различных марок, при которых допустимо использование обычной вырубki-пробивки в зависимости от диаметра изделия D и допустимого предельного контактного давления на эластичный слой Q_{max} . Полученные зависимости аппроксимированы полиномиальными моделями, проведена оценка качества этой аппроксимации.

Для расширения технологических возможностей реализации данных разделительных операций предложено применять инструмент с фигурными режущими кромками конусной кольцевой формы, локализирующими зоны среза и снижающими контактные давления на средний слой из ТРГ (рис. 3 и 4). При этом конструкция штампа имеет внутренний упругий прижим, сохраняющий при вырубке или пробивке средний упруго-эластичный слой и уменьшающий дефекты изготавливаемой детали.

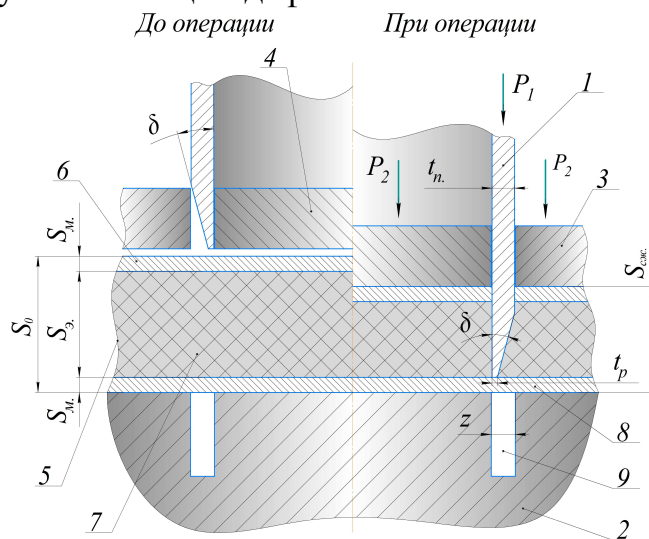


Рис. 3 - Схема вырубki-пробивки трехслойных прокладок со средним слоем из композитного материала.

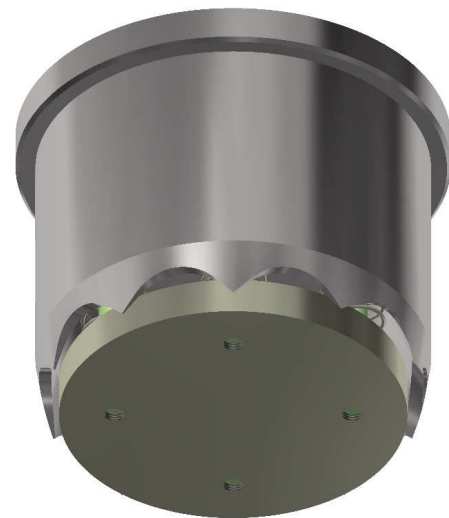


Рис. 4 - Твердотельная модель фигурного пуансона для вырубki с внутренним прижимом.

Принцип работы спроектированного инструментального пакета следующий. По ходу пуансона вниз, верхние прижимы 3 и 4 предварительно прижимают заготовку 5 снаружи и внутри зоны действия этого пуансона. Затем пуансон 1, продолжая перемещаться вниз, перерезает верхний металлический слой 6 заготовки, и далее, эластичный слой 7. На заключительной стадии рабочего хода пуансон подвергает срезу нижний металлический слой 8 сдвигом. За счет прижимов 3, 4 заготовка прижимается, к торцевой части матрицы 2, избегая склонности к изгибу. Пуансон 1 имеет фигурный венец

клиновидного профиля (рис. 4), который локализует линию среза по общему периметру вырубке или пробивке и, соответственно, технологическая сила и контактное давление на плоскости центрального эластичного слоя из ТРГ значительно снижаются. Использование фигурных кольцевых венцов с клиновыми (в меридиональном сечении инструмента) выступами и впадинами, позволяет увеличить предельные толщины наружных металлических слоев в зависимости от диаметра изделия на 23–35 %.

Технологические возможности предлагаемого способа расширились по толщине обрабатываемого материала с $f \leq 1,5$ до $f \leq 8,5$) по сравнению с ранее известными способами, где $f = S_{э.}/S_{м.}$.

Третий раздел посвящен установлению закономерностей влияния геометрических размеров инструмента на качество торцевой поверхности уплотнителя путем планирования, проведения и обработки результатов многофакторного натурального эксперимента.

Основной проблемой получения качественных поверхностей среза при вырубке-пробивке трехслойных плоских кольцевых уплотнительных и прокладочных деталей является проблематичность обеспечения жесткого прижима среднего металлического слоя перед его окончательным разделением срезом без значительного повреждения периферийных упруго-эластичных слоев. Последнее объясняется тем, что наружные эластичные слои из ТРГ допускают упругие сжимающие деформации не более 40 %. В противном случае они не обеспечивают восстанавливаемость эластичных слоев, что приводит к снижению герметичности уплотнительных деталей. Образующимися при этом неисправимыми повреждениями (в основном) являются: изгиб среднего металлического слоя по периметру его разделения, общее невосстанавливаемое смятие периферийных слоев, недопустимый эксцентриситет наружного и внутреннего диаметров изготавливаемой кольцевой многослойной детали. Значимым дефектом также является отклонение от перпендикулярности плоскостей и торцевых поверхностей изготавливаемого изделия (рис. 5).

Для процесса вырубке, в качестве исследуемых выходных параметров приняты: $y_1 = \frac{h_0}{2} - h_1/h_0 = \left| \frac{1}{2} - \frac{h_1}{h_0} \right|$ - относительная линейная деформация середины металлического торца (на участке его внешнего периметра) от центральной оси изготавливаемой трехслойной детали (изгиб металлического слоя в зоне обработки);

$$y_2 = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{2h_0} - \text{тангенс угла } (\alpha) \text{ отклонения от перпендикулярности}$$

образующей наружной торцевой поверхности (по внешнему периметру) и горизонтальной центральной оси изготавливаемой детали (отклонение от цилиндрической формы торцевой поверхности).



Рис. 5. Дефекты трехслойных изготавливаемых деталей:
слева - деформация среднего слоя и заусенец на торцевой поверхности;
справа - те же дефекты и неперпендикулярность торца и плоскостей детали

В качестве варьируемых факторов были приняты x_1 - угол δ_1 клиново-го выступа меридионального профиля пуансона; x_2 - относительная толщина верхнего эластичного слоя после предварительного поджатия $\bar{S}_{\theta,c}$; x_3 - толщина рабочей прижимной площадки t_0 на торцах клиновых выступов на прижиме и матрице. Матрица планирования многофакторного эксперимента с первичными результатами исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1. Матрица планирования с начальными результатами исследования разделительных операций изготовления трехслойной плоской детали.

№ опыта	Варьируемые факторы								Выходные параметры									
									y_1					y_2				
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y_1^1	y_1^2	y_1^3	\bar{y}_1	$S_{y_1}^2$	y_2^1	y_2^2	y_2^3	\bar{y}_2	$S_{y_2}^2$
1	+	+	+	+	+	+	+	+	0,334	0,337	0,361	0,344	0,00022	0,351	0,344	0,388	0,361	0,00056
2	+	-	+	+	-	-	+	-	0,243	0,249	0,267	0,253	0,00016	0,036	0,042	0,090	0,056	0,00088
3	+	+	-	+	-	+	-	-	0,377	0,402	0,382	0,387	0,00018	0,521	0,576	0,526	0,541	0,00093
4	+	-	-	+	+	-	-	+	0,265	0,291	0,263	0,273	0,00024	0,244	0,290	0,237	0,257	0,00083
5	+	+	+	-	+	-	-	-	0,351	0,367	0,344	0,354	0,00014	0,614	0,660	0,607	0,627	0,00083
6	+	-	+	-	-	+	-	+	0,296	0,301	0,321	0,306	0,00018	0,229	0,234	0,284	0,249	0,00093
7	+	+	-	-	-	-	+	+	0,406	0,384	0,380	0,390	0,00020	0,843	0,801	0,807	0,817	0,00052
8	+	-	-	-	+	+	+	-	0,294	0,318	0,300	0,304	0,00016	0,481	0,535	0,487	0,501	0,00088

В результате проведения полного многофакторного эксперимента установлены закономерности формирования погрешностей изготавливаемых трехслойных деталей. После обработки экспериментальных результатов и проверки соответствующих статистических гипотез получены следующие уравнения регрессии в кодированных переменных:

$$y_1 = 0,3262 + 0,0424x_1 - 0,0121x_2 - 0,0123x_3 - 0,0075x_1x_2 + 0,0088x_1x_3$$

$$y_2 = 0,4262 + 0,1603x_1 - 0,1028x_2 - 0,1223x_3 - 0,0131x_1x_3.$$

На рисунках 6 приведены графические иллюстрации полученных уравнений регрессии.

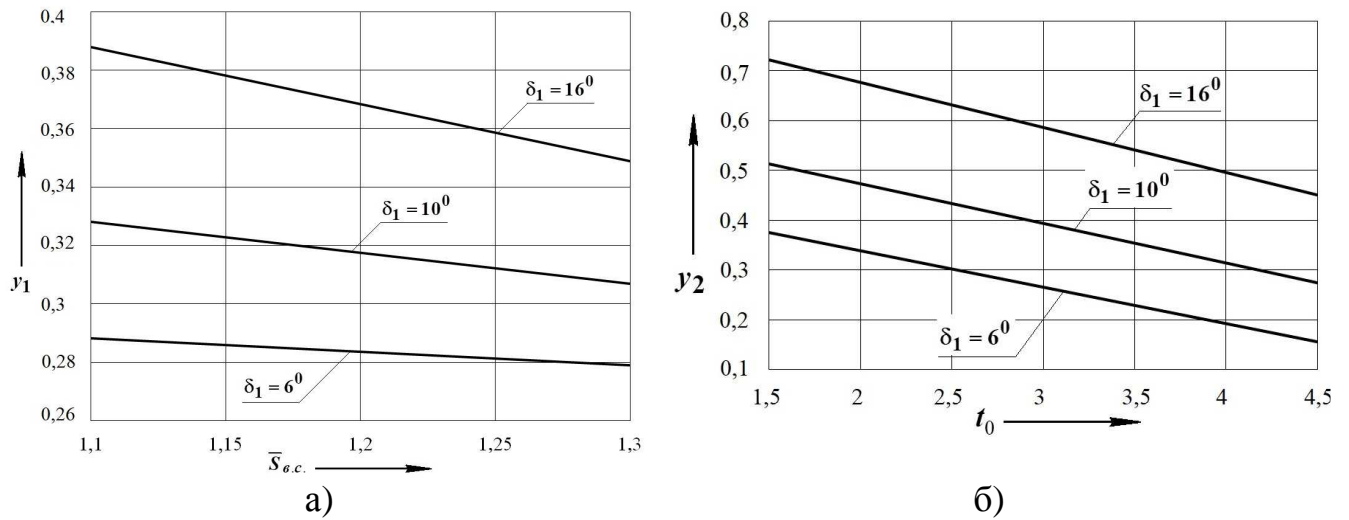


Рис. 6. Графические зависимости:
а - y_1 от $\bar{S}_{v.c.}$; б - y_2 от t_0 при различных значениях δ_1 .

Проведенный с использованием уравнений регрессии, полученных графических зависимостей, иллюстрирующих эти уравнения, и результатов штамповок опытных партий обобщенный анализ качества трехслойных уплотнительных деталей (рис. 7) толщиной $S_{v.c.} = S_{н.с.} = 4,5$ мм, толщиной центрального металлического перфорированного слоя $S_{м.} = 1,2$ мм и наружным диаметром $D = 85$ мм показал, что на операции вырубке уплотнителя (обрезки) величина изгиба металлического слоя уменьшилась на 35%, отклонение от формы торцевой поверхности по периметру среза на 42 % (по сравнению с данными предварительных исследований, результаты которых приведены в разделе 2).



Рис. 7. Образцы уплотнителя и отхода пробивки, полученные инструментом с рациональными размерами клиньев

В четвертом разделе выполнено аналитическое описание поля линий скольжения, возникающего при осесимметричном вдавливании симметричного клиновидного инструмента в жесткопластическое полупространство с образованием наплыва вытесненного деформируемого материала, имеющего свободную прямолинейную границу. Поскольку конусные (клиновые на фронтальном разрезе) выступы с малыми углами на инструменте являются хрупкими (не способными воспринимать значительные контактные давления) конструктивными элементами, то установление уточненных значений указанных давлений и величины интегральных сил, воспринимаемых конусными выступами, является весьма актуальным.

На основе анализа результатов численных решений установлены правила построения и аналитического описания полей линий скольжения, образованных логарифмическими спиралями, для пластических областей, примыкающих к свободной прямолинейной границе, разворота на угол Ψ относительно радиальной координаты, для условий осевой симметрии.

На рисунке 8 приведена конструкция пластической области указанного поля линий скольжения для режима B полной пластичности, соответствующего положительному направлению радиальной скорости течения деформируемого материала ($v_r > 0$). Полная конструкция поля линий скольжения при вдавливании осесимметричного гладкого конусного инструмента в жесткопластическое полупространство с образованием прямолинейного наплыва вытесняемого материала предоставлена на рисунке 9.

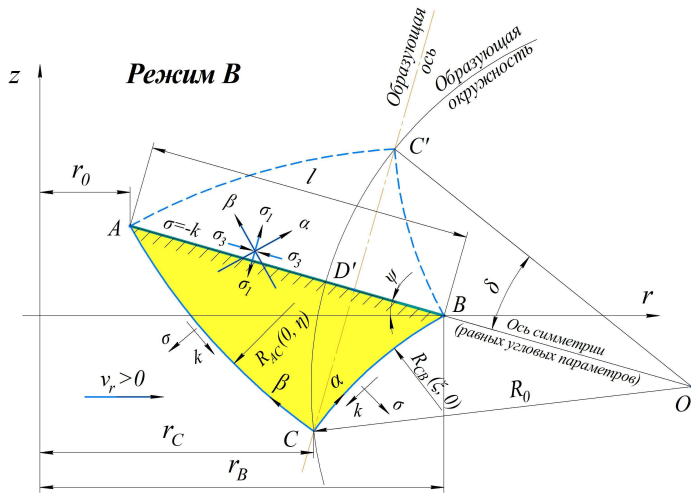


Рис. 8. Конструкции пластической области, примыкающей к свободной прямолинейной границе AB .

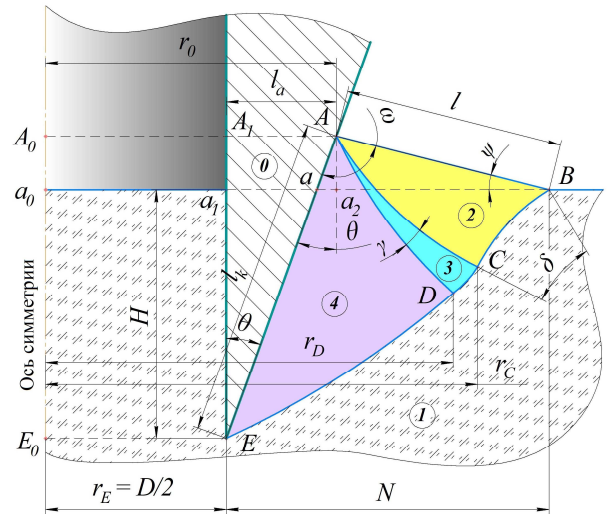


Рис. 9. Схема вдавливания конусного инструмента в полупространство.

При интегрировании вдоль граничных линий скольжения получены необходимые проекции кривизны, позволяющие установить геометрические и силовые параметры процесса (см. рис. 9):

- условие несжимаемости вытесняемого материала

$$H^2 \cdot \operatorname{tg} \theta \cdot \left(\frac{3D}{2} + H \cdot \operatorname{tg} \theta \right) = l^2 \cdot \sin \psi \cdot \left[\begin{array}{l} 3r_0 \cdot (\cos \psi + \sin \psi \cdot \operatorname{tg} \theta) + \\ + l \cdot (\cos^2 \psi - \sin^2 \psi \cdot \operatorname{tg}^2 \psi) \end{array} \right];$$

- горизонтальная протяженность поля линий скольжения

$$N = R_0 \cdot \left\{ \begin{array}{l} \cos(\psi - \delta) - \cos \psi \cdot \exp(-\delta) + \exp \delta \cdot \sin(\delta - \psi) + \\ + \sin \psi + 2 \sin \theta \cdot \left(\varphi_0^4 \{ \delta, (\delta + \gamma) \} - U_0 \{ 2\delta; 2\sqrt{\delta(\delta + \gamma)} i \} \right) \end{array} \right\} = \\ = l_a + l \cdot \cos(\theta - \gamma)$$

- суммарная вертикальная проекция общей жесткопластической границы BE должна быть равна глубине H вдавливания конуса

$$R_0 \cdot \left\{ \begin{aligned} & \sin(\delta - \psi) + \sin \psi \cdot \exp(-\delta) - \exp \delta \cdot \cos(\delta - \psi) + \cos \psi + \\ & + 2 \cos \theta \cdot \left[\varphi_0^4 \{ \delta, (\delta + \gamma) \} - U_0 \{ 2\delta; 2\sqrt{\delta(\delta + \gamma)} i \} \right] \end{aligned} \right\} = H$$

- длина линии контакта пластической области с инструментом

$$l_k = \frac{H + l \cdot \sin \psi}{\cos \theta};$$

- радиус круговой свободной границы

$$R_0 = \frac{l}{2 \cdot \operatorname{sh} \delta};$$

- начальная радиальная координата участка поля

$$r_0 = \frac{D}{2} + \operatorname{tg} \theta \cdot (H + l \cdot \sin \psi);$$

- технологическая сила исследуемого процесса

$$P = \pi \cdot (\sigma_E - k) \cdot [D + \operatorname{tg} \theta \cdot (H + l \cdot \sin \psi)] \cdot (H + l \cdot \sin \psi) \cdot \operatorname{tg} \theta;$$

где: D – диаметр вырубаемой заготовки или пробиваемого отверстия (имеет значение только при расчете среднего напряжения и силы в осесимметричной задаче); σ_E – среднее напряжение в вершине конуса E .

Выполнены исследования технологической силы вырубки-пробивки P для ряда исследуемых материалов в зависимости от геометрических параметров инструмента и заготовки: толщины центрального металлического слоя S_M , диаметра изготавливаемого изделия D (рис. 10,а) и угла конусности инструмента θ (рис. 10,б) по предлагаемой конструкции поля линий скольжения.

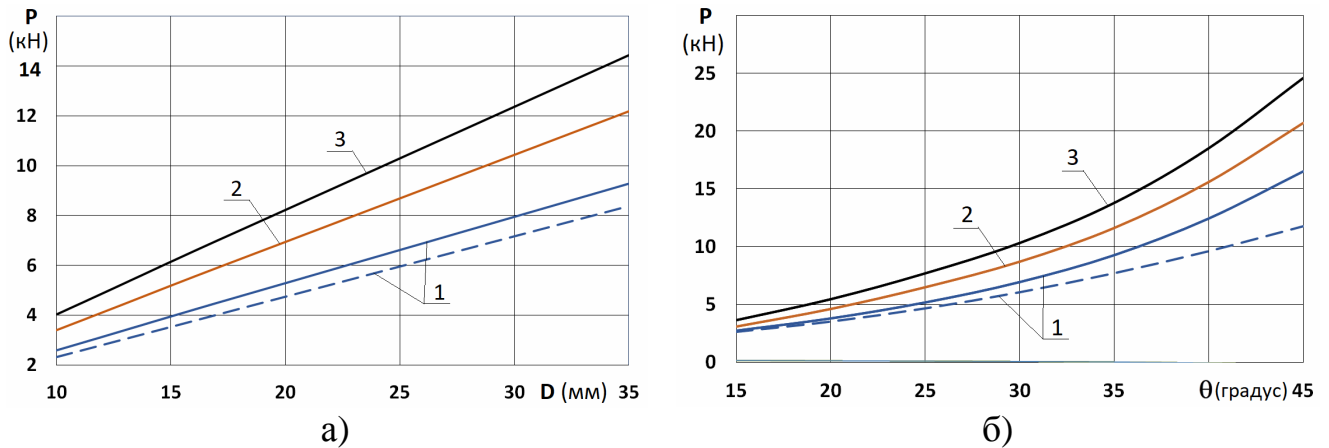


Рис. 10. Графические зависимости ($S_M = 0,2$ мм):

- а - P от D : 1 - 12X18H10T; 2 - 20X20H14C2; 3 - 08X13 ($\theta = 30^0$);
 б - P от θ : 1 - 12X18H10T; 2 - 20X20H14C2; 3 - 08X13 ($D = 25$ мм).

С целью подтверждения результатов силового анализа операции вырубки-пробивки, полученных аналитически, выполнены экспериментальные исследования влияния D и θ на технологическую силу процесса P для трехслойного композитного материала марки МГЛ-2-212-4,0 с наружными

эластичными слоями из ТРГ толщиной 2,2 мм, и армированным центральным слоем из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т толщиной 0,2 мм. В эксперименте использовались пуансоны с углами конуса рабочей части $\theta = 15, 30, 45^\circ$, и диаметрами $D = 12,5, 16, 20, 25, 32$ мм. Экспериментальные данные обозначены пунктирной линией на рис. 10. Показано, что расхождение результатов определения технологической силы вырубки-пробивки в зависимости от диаметра изделия, по полученному аналитическому выражению с опытными данными не превышает 10%. Расхождение по углу конусности инструмента в диапазоне углов $\theta = 15 \dots 30^\circ$ не превышает 15%.

В пятом разделе выполнена разработка конструкции автоматизированного быстропереналаживаемого штампа для многономенклатурного мелкосерийного и серийного производства деталей типа плоская шайба. Конструкция штампа содержит следующие необходимые подвижные регулируемые механизмы: магазин загрузки заготовок; настраиваемый механизм перемещения комплекта этих заготовок от оси загрузки до оси обработки, включающий пневмоцилиндр (с неизменным ходом поршня), используемый в качестве привода подачи; узел ориентации и фиксации заготовок в зоне обработки; специальный компенсаторный блок, предохраняющий систему подачи заготовок от поломки. Разработанный штамп обеспечивает быструю замену пуансонного и матричного блоков специальной конфигурации при изготовлении изделий, имеющих диапазон наружного диаметра от 95 мм до 26 мм.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

В работе решена актуальная научно-техническая задача, заключающаяся в теоретическом и экспериментальном обосновании усовершенствованных способов и силовых режимов изготовления трехслойных уплотнителей повышенного качества с металлическими и увеличенными упруго-эластичными слоями, применяемых в изделиях и объектах ответственного назначения.

В результате комплекса проведенных теоретических и экспериментальных исследований получены **следующие основные результаты и сделаны выводы:**

1. Усовершенствованы конструкции инструмента для изготовления разделительными операциями штамповки трехслойных плоских кольцевых уплотнительных, прокладочных и компенсаторных деталей с внутренним металлическим и наружными упруго-эластичными слоями из композитных материалов (ТРГ) с установлением рациональных геометрических параметров деформирующего инструмента.

Установлены предельные значения толщин металлических слоев для кольцевых плоских деталей с композитными материалами (у которых эти слои являются наружными, а центральным – прокладка из ТРГ), которые целесообразно изготавливать обычной вырубкой или пробивкой. Предложена конструкция инструмента (пуансон и матрица) с венцом клиновидного фигурного профиля, обеспечивающая снижение потребной технологической

силы и контактного давления на плоскости центрального эластичного слоя из ТРГ на 40–50%.

Технологические возможности усовершенствованных способов расширились по толщине обрабатываемого материала с $k_B \leq 1,5$ до $k_B \leq 6,3$ (вырубка) и с $k_{II} \leq 4,5$ до $k_{II} \leq 8,8$ (пробивка) для деталей с наружными эластичными и внутренним металлическим слоями и с $f \leq 1,5$ до $f \leq 8,5$ для деталей с наружными металлическими и внутренним эластичным слоями по сравнению с ранее известными способами.

2. Исследовано влияние геометрических размеров инструмента с клиновыми кольцевыми выступами на качество вырубки трехслойных уплотнителей со средним металлическим слоем и утолщенными периферийными слоями из терморасширенного графита путем проведения планируемого многофакторного эксперимента. В результате, установлены рациональные размеры клиновых выступов на прижиме и инструменте, обеспечивающие восстанавливаемость прокалываемых наружных упруго-эластичных слоев и максимально возможно жесткое прижатие центрального металлического слоя перед вырубкой.

3. Установлены результирующие аналитические зависимости для нахождения геометрических параметров, описывающих вдавливание гладкого конусного инструмента в полупространство с образованием прямолинейного наплыва, и силовых режимов процесса.

4. Выполненные экспериментальные исследования силы вырубки трехслойных уплотнителей подтвердили справедливость полученной математической модели процесса в исследуемом диапазоне геометрических параметров. Расхождение результатов аналитического решения с экспериментальными данными не превышает 10–15%.

5. Разработана конструкция универсального автоматизированного штампа с быстросъемным инструментом для удаления сдвигом наружного и внутреннего отхода кольцевых плоских деталей из заготовок (полуфабрикатов) диаметром от 32 мм до 100 мм из композитных материалов, имеющих металлические и эластичные (ТРГ) слои.

6. Результаты исследований использованы в учебном процессе на кафедре «Механика пластического формоизменения» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

1. Нгуен В.Т. Вдавливание клинового пуансона в полуплоскость / Панфилов Г.В., Нгуен В.Т., Михальченко С.Н. // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 6. Тула: Изд-во ТулГУ. 2018. С. 17–32.

2. Нгуен В.Т. Многофакторное экспериментальное исследование качества вырубки трехслойных уплотнителей / Панфилов Г.В., Нгуен В.Т., Фомичева Д.А. // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 6. Тула: Изд-во ТулГУ. 2018. С. 62–80.

3. Нгуен В.Т. Штамповая оснастка и инструмент для изготовления трехслойных плоских кольцевых деталей с композитными материалами / Панфилов Г.В., Нгуен В.Т. // Научно-технические технологии в машиностроении. 2021. № 2. С. 20–26
4. Нгуен В.Т. Способы изготовления трехслойных уплотнителей с наружными металлическими и центральным эластичным слоями / Панфилов Г.В., Нгуен В.Т. // Заготовительные производства в машиностроении. 2021. Том 19. № 2. С. 61–66.
5. Нгуен В.Т. Проектирование автоматизированных переналаживаемых штампов для мелкосерийного многономенклатурного производства кольцевых плоских деталей / Панфилов Г.В., Нгуен В.Т. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2021. № 5. С. 3–11.
6. Нгуен В.Т. Многофакторное экспериментальное исследование качества изготовления трехслойных уплотнительных плоских деталей / Панфилов Г.В., Нгуен В.Т. // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3. Тула: Изд-во ТулГУ. 2021. С. 7–15.
7. Панфилов Г.В., Черняев А.В., Нгуен В.Т. Аналитическое решение методом линий скольжения задачи о вдавливании конусного инструмента в полупространство в условиях осевой симметрии // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. №9. 2021. С. 449–457.
8. Черняев А.В., Коротков В.А., Нгуен В.Т. исследования технологической силы разделительных операций многослойных материалов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. №9. 2021. С. 475–480.
9. Нгуен В.Т. Определение предельной толщины металлического слоя при вырубке и пробивке многослойного материала // Сб. тезисов XV Региональной магистерской научной конференции 2020г. / Тула: ТулГУ, –2020. Часть 1. – С. 109–111.
10. Нгуен В.Т. Вдавливание гладкого конуса в полупространство при использовании условий осевой симметрии // Сб. тезисов XVI Региональной магистерской научной конференции 2021г. / Тула: ТулГУ, –2021. Часть 1 – С. 97-98.
11. Нгуен В.Т. Особенности проектирования штамповой оснастки для вырубке-пробивки трехслойных уплотнительных прокладок с металлическими и композитными слоями // Сборник докладов VII Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Металлургия XXI столетия глазами молодых» / Донецк: ДонНТУ – 2021 – С. 152-155.
12. Нгуен В.Т. Согласование параметров схемы процесса вдавливания гладкого конуса в полуплоскость с образованием прямолинейного наплыва и конструкции поля линий скольжения // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации». Тула, 12.10.2021 г. Тула: Изд-во ТулГУ, 2021. С. 28-29.

Подписано в печать 12.01.2022 г.

Формат бумаги 70x100 1/16. Бумага типограф. №2

Офсетная печать. Усл. печ. л. 1,1. Усл. кр. отг. 1.2. Уч. изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Тульский государственный университет. 300012, г. Тула, просп. Ленина, 92 Издательство ТулГУ. 300012, г. Тула, просп. Ленина, 95