

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. ИСЛАМА КАРИМОВА

ФАКУЛЬТЕТ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

На правах рукописи

УДК 621.983.5

ЭДВАРС ВЛАДИМИР ЮРЬЕВИЧ

*Исследование разделительных операций с применением  
ультразвука.*

5А320201- Технология машиностроения и оборудования  
(обработка давлением)

ДИССЕРТАЦИЯ  
на соискание академической степени  
МАГИСТР

Научный руководитель:  
д.т.н. проф. Абдуллаев Ф.С.

Ташкент – 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	1
<b>Глава 1. Литературный обзор</b>	
1.1 Разделительные операции с применением ультразвука.....	3
..	
1.2 Разделительные операции.....	7
1.3 Применение ультразвука.....	14
1.4 Пробивка и вырубка ультразвуком.....	18
1.5 Выводы из обзора литературы. Цели и задачи исследования.....	33
...	
<b>Глава 2. Теоретическая часть</b>	
2.1 Очаг деформации и усилие деформирования.....	35
2.2 Деформирование при пробивке и вырубке.....	52
.....	
2.3 Выводы .....	71
<b>Глава 3. Технологическая часть</b>	
3.1 Исследование технологических факторов.....	72
3.2 Выводы.....	85
<b>Глава 4. Экспериментальная часть</b>	
4.1 Штампы и установка.....	87
4.2 Тензометрирование и тарировочные графики.....	94
4.3 Выводы.....	103
<b>Основные выводы.....</b>	<b>104</b>
<b>Литература.....</b>	<b>106</b>
<b>Приложение</b>	<b>113</b>

Сегодня для нас должна быть очевидной одна простая истина: самые благородные цели, стоящие сегодня перед нами – и великое будущее нашей страны, и наш завтрашний день, свободная жизнь и благоденствие, и то, какое место займет Узбекистан в мировом сообществе в XXI веке, - все это зависит, прежде всего, от нового поколения, от того, какими людьми вырастут наши дети.

И.А. Каримов

Первый Президент Республики Узбекистан.

## **Введение**

**Актуальность.** В настоящее время для повышения конкурентно-способности продукции отечественного машиностроения необходимо снижение ее себестоимости, уменьшение сроков освоения новых единиц продукции, сокращение доли ручного труда, снижения трудоемкости изготовления и металлоемкости технологической оснастки и приспособления. В значительной мере решению этих задач способствует внедрение в промышленность высокоэффективных технологий.

Результаты предшествующих исследований показали, что в операциях ультразвуковой штамповки можно получить более высокую предельную степень формоизменения, более высокую точность штампуемых деталей и качество поверхности разделения, надежную герметичность и прочность неразъемных соединений.

В настоящее время освоен выпуск опытных и серийных ультразвуковых установок.

Имеющиеся в литературе работы, как правило, позволяют дать оценку энергоемкости технологического процесса. Однако, вследствие принятых значительных упрощающих допущений, касающихся задания механизма деформирования заготовки и контактного взаимодействия ее с оснасткой.

**Цель работы** – разработка теории процессов деформирования заготовки и инструмента при ультразвуковой штамповке тонкостенных деталей и на ее базе научно-обоснованных методов проектирования, обеспечивающих решение крупной народнохозяйственной проблемы, состоящей в снижении энергоемкости технологических процессов, в повышении стойкости инструмента и технологического оборудования.

**Методы исследования.** Поставленная цель достигнута путем использования уравнений равновесия, теории упругопластического течения, экспериментальных методов определения силовых и кинематических параметров в процессе деформирования.

**Автор защищает:** - основные положения теории ультразвуковой штамповки, включающей модели упруго-вязко-пластического деформирования и разрушения заготовок в условиях объемного и плоского напряженного состояния и технологической оснастки;

- теоретические зависимости для расчета силовых и кинематических параметров разделительных операций ультразвуковой штамповки.

**Научную новизну** составляют результаты:

- разработана теория процессов ультразвукового деформирования заготовок и технологической оснастки.

- на ее базе созданы научно-обоснованные методы проектирования технологических процессов.

**Практическая значимость.** Создание на основе общей теории математических моделей технологических процессов штамповки и инструмента, разделительных операций листовой штамповки, что облегчает использование разработанных методов при внедрении в технологическую и конструкторскую практику.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации доложены и обсуждены на республиканских научно-технических конференциях, обсуждены на заседаниях кафедры Обработки Металлов Давлением и учебного центра АО «Узметкомбината» .

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 3 работы.(2 статьи 1 методическое пособие).

**Структура и объем работы.** Магистерская диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, общих выводов, списка использованной литературы (76 наименований) и приложения, изложена на 113 страницах машинописного текста с 1 таблицей и 67 рисунками.

## **ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.**

### **1.1 РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКА.**

Оснащение промышленности прогрессивными видами оборудования, широкого внедрения новейших технологических процессов, а также применение систем контроля за качеством продукции требуют развития производства современной быстродействующей электронно-вычислительной техники, приборов, радиоэлектронной аппаратуры, лазерной и другой новейшей техники.

Холодной штамповкой можно получать детали сложной пространственной конфигурации, что позволяет создавать облегченные конструкции заданной жесткости и прочности. И наконец следует отметить, что применение холодной штамповки позволяет резко сократить или исключить обработку резанием, что способствует экономии металла, а также повышению производительности труда.

Широкое применение холодной листовой штамповки обусловило создание специализированных машин для штамповки. Экономическая эффективность холодной листовой штамповки в производстве существенно зависит от технологических процессов, управления процессом деформирования, рациональности конструкции рабочих элементов штампов, механизации и автоматизации.

Более производительной операцией по сравнению со совершением является пробивка отверстий. Наиболее полно разработаны вопросы вырубки-пробивки металлов в работах М.Е.Зубцова, А.Н.Малова, Е.А.Попова, Г.А.Смирнова-Аляева, Д.А.Вайнтрауба, В.П.Романовского, Ф.П.Михайленко, А.Г.Лисина, Э.М.Шалмиса и др.

В последнее время для интенсификации процессов обработки материалов давлением стали применять энергию ультразвуковых колебаний. Исследования, проведенные В.П.Северденко, Д.Кумабо, А.В.Степаненко,

В.В.Клубовичем, В.Я.Осадчим, В.А.Цирюльниковым и другими, показали, что под действием ультразвука снижается усилие деформирования.

Совершенствование технологии процесса разделительных операций относительно малых отверстий в слоистых пластмассах путем введения ультразвука в очаг деформирования позволит с меньшей трудоемкостью, чем в настоящее время и при достаточно хорошем качестве поверхности пробиваемых отверстий обрабатывать платы печатного монтажа более прогрессивным способом – штамповкой (рис.1.1.1.).

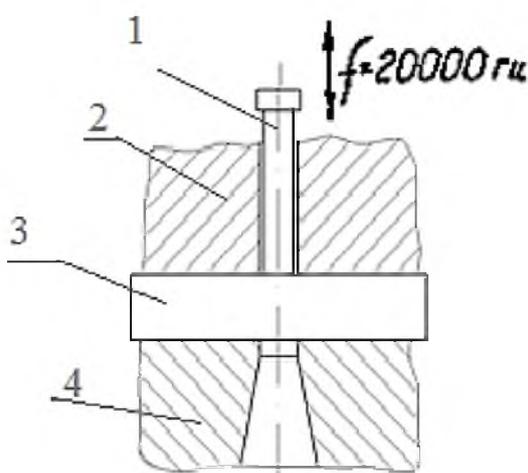


Рис.1.1.1. Схема процесса пробивки отверстий с ультразвуком:

1) пуансон, 2) прижим, 3) заготовка, 4) матрица.

Разделительные операции неметаллических материалов с применением ультразвука занимались В.П.Северденко, И.С.Баранов, В.С.Пашенки, Я.Б.Шустер, С.С.Костюкович и другие. Однако пробивка относительно малых отверстий с ультразвуком в слоистых пластмассах недостаточно изучена и поэтому при внедрении данного процесса возникают трудности.

Таким образом, из вышесказанного очевидна актуальности проблемы, которая заключается в получении качественных отверстий в печатных платах методом штамповки.

Степень локализации очага деформации зависит от размерных характеристик инструмента, в частности, от зазора между пуансоном и матрицей и от радиусом скругления рабочих кромок пуансона и матрицы.

Чем меньше зазор и радиусы скругления рабочих кромок инструмента, тем больше локализуется очаг деформации около рабочих кромок пуансона и матрицы.

Для разделительных операций стремятся иметь острые рабочие кромки (радиус скругления кромок пуансона  $r_{\text{и}}$  и кромок матрицы  $r_{\text{м}}$  равны примерно нулю), а зазор между пуансоном и матрицей составляет десятые или даже сотые доли от толщины заготовки.

Математически строго решить задачу по отысканию полей напряжений и деформаций при листовой штамповке с учетом всех существенно влияющих факторов практически невозможно.

Достаточно простое решение, с приемлемой точностью отражающее реальный процесс деформирования, может быть получено путем рациональной схематизации процесса деформирования. Такой подход требует не только хорошего знания теории пластичности, но и определенной изобретательности в отыскании простейшего решения сложных вопросов.

При анализе операций листовой штамповки могут быть использованы такие методы теории обработки давлением, как инженерный метод (совместное решение приближенных уравнений равновесия и пластичности); метод работ (условие равенства работ внешних и внутренних сил на кинематических возможных перемещениях) и метод характеристик (отыскание полей линий скольжения, вдоль которых действуют максимальные касательные напряжения), а также интенсивно развивающаяся в настоящее время численные методы, такие, как метод конечных элементов и т.п.

В данной работе будем в большей мере использовать первый метод, как обладающий большей наглядностью и позволяющий с приемлемой точностью учесть влияние значительного числа факторов.

В общем случае для решения задач по отысканию полей напряжений должны использоваться уравнения равновесия, уравнения пластичности,

уравнения связи напряжений и деформаций, уравнения неразрывности деформаций.

Так как очаг деформации зарождается у режущих кромок, то и накопленная в процессе сдвига интенсивность деформаций будет максимальной вблизи режущих кромок. Для каждого металла и данной схемы напряженного состояния существует предельное значение интенсивности деформаций, которую может выдержать металл без разрушения. Кромкам наступает момент, когда пластичность металла будет исчерпана и начнется разрушение заготовки.

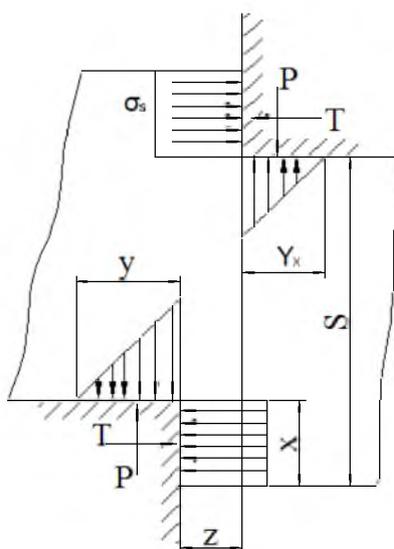


Рис.1.1.2. Схема деформирования при разделительных операциях

Из графиков видно, что на начальных стадиях деформирования усилие возрастает медленно (снятие и образование локальных очагов у режущих кромок), а затем усилие увеличивается достаточно быстро (образование единого очага деформации и начало сдвига одной части заготовки относительно другой).

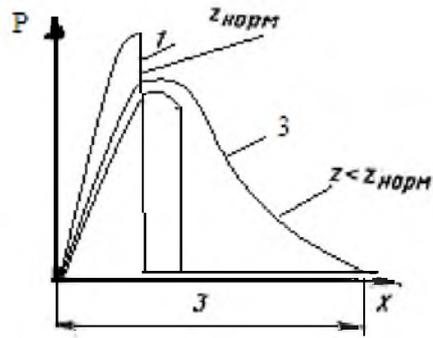


Рис.1.1.3. Типовые графики изменения усилий по пути в разделительных операциях:

1 – малопластичный металл, 2 и 3 – пластичный металл

## 1.2. РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ.

### Отрезка

Отрезка на ножницах с поступательным движением ножей. При параллельных режущих кромках разделение идет одновременно по всей длине отрезаемой заготовки. В этом случае усилие резко возрастает по мере внедрения режущих кромок и рывком падает до нуля при перемещениях  $x=h$ .

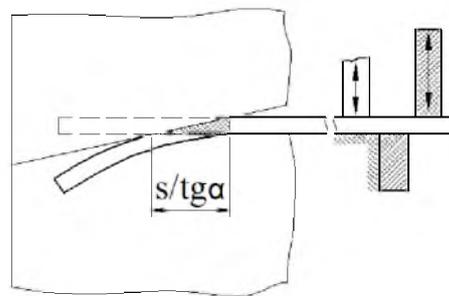


Рис.1.2.1. Отрезка на гильотинных ножницах:

1-прижим; 2-верхний нож; 3-нижний нож.

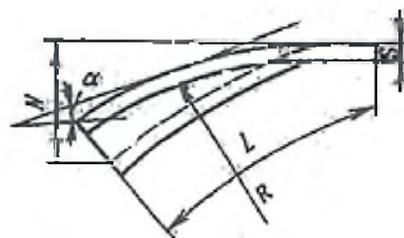


Рис.1.2.2. Деформация полосы при отрезке между наклонными ножами.

Вибрация, возникающая при резком снижении усилия, сказывается на работоспособности ножниц и приводит к быстрой разладке инструмента (изменение зазоров и т.п.).

Большую плавность изменения усилия обеспечивает наклонное расположение режущих кромок ножей (рис.1.2.1.). В этом случае процесс резания рассредоточивается по ходу ножа, а в любой момент резания площадь среза представляет собой треугольник с углом при вершине, равным углу  $\alpha$  створа между режущими кромками (ножницы с наклонным расположением режущих кромок называют обычно гильотинными ножницами).

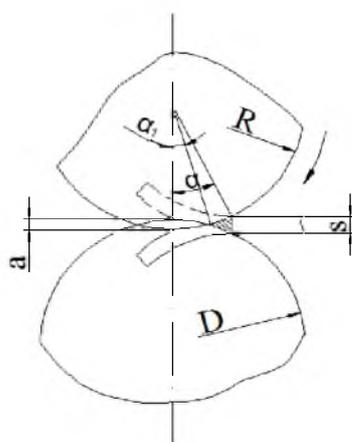


Рис.1.2.3. Схема отрезки на дисковых ножах.

Отрезка на ножницах с вращательным движением режущих кромок. В этом случае ножи представляют собой диски, установленные на осях и получающие вращательное движение (рис.1.2.3.). Если на ножницах с поступательным движением режущих кромок длина отрезаемой полосы не может быть больше длины ножей, то при отрезке на дисковых ножах длина отрезаемой полосы неограниченна. Эта является существенным достоинством дисковых ножниц. Чтобы облегчить подачу заготовки при отрезке на дисковых ножницах, стараются брать такие значения угла захвата  $\alpha$ , при которых заготовку действием сил трения втягивало бы между ножами (вращение обеспечивает не только разрезание заготовки, но и ее подачу).

## Вырезка.

Вырезкой называют операцию отделения части заготовки по замкнутому контуру на ножницах. Для вырезки применяют ножницы с вращательным движением режущих кромок (дисковые) и с поступательным движением режущих кромок (вибрационные).

При вырезке необходимо максимально облегчить поворот заготовки относительно ножей с тем, чтобы обеспечить возможность отделения заготовки по криволинейной линии реза.

При вырезке на дисковых ножницах облегчение поворота заготовки относительно ножей достигается тем, что боковая поверхность ножей имеет коническую форму, а режущих кромки ножей не доходят друг до друга (рис.1.2.4. а).

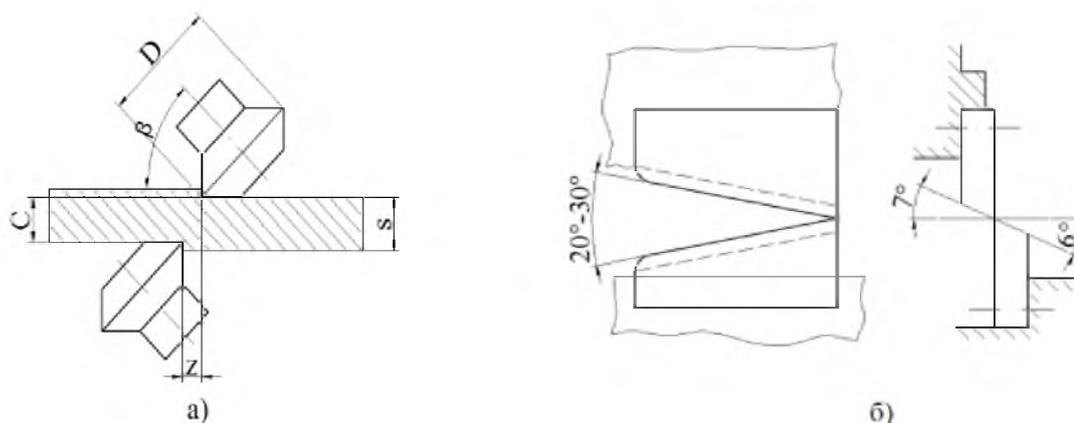


Рис.1.2.4. Схема расположения ножей при вырезке: а – на дисковых ножницах; б – на вибрационных ножницах

Вибрационные ножницы (рис.1.2.4.б) представляют собой небольшие гильотинные ножницы с малым рабочим ходом (2 – 3 мм) и большим числом ходов (1000-2500 ходов в минуту). Угол створа ножей у вибрационных ножниц больше угла трения ( $\alpha=24\dots 30^0$ ), что требует принудительной подачи заготовки к ножам.

Большой угол створа и малый заход режущих кромок относительно друг друга определяют малую площадь контакта поверхности среза с боковой поверхностью ножа, что облегчает поворот заготовки относительно ножей и позволяет вырезать контуры с малыми радиусами кривизны (12-15 мм).

Быстрое затопление ножей и прерывистость процесса резания ухудшают качество поверхности среза, и зачастую требуется опиловка заусенцев.

### **Вырубка и пробивка**

При вырубке получают наружный контур детали, при пробивке отверстие.

Качество получаемых деталей (заготовок) при вырубке и пробивке определяется размерной точностью наружных и внутренних контуров (и их взаиморасположением), качеством поверхности среза, размером торцового заусенца, величиной утяжин вблизи поверхности среза, а также искажениями заготовки вследствие изгиба (нарушение плоскости исходной плоской заготовки).

Вырубку и пробивку выполняют пуансоном и матрицей.

На рис.1.2.5 схематично показаны эпюры напряжений  $\sigma_p$ , которые отрицательны (сжатие) вблизи контактных плоскостей и положительны (растяжение) вблизи свободных поверхностей.

Слои, испытавшие сжатие, при разгрузке после завершения разделения будут удлиняться, а слои, испытавшие растяжение – сокращаться по длине.

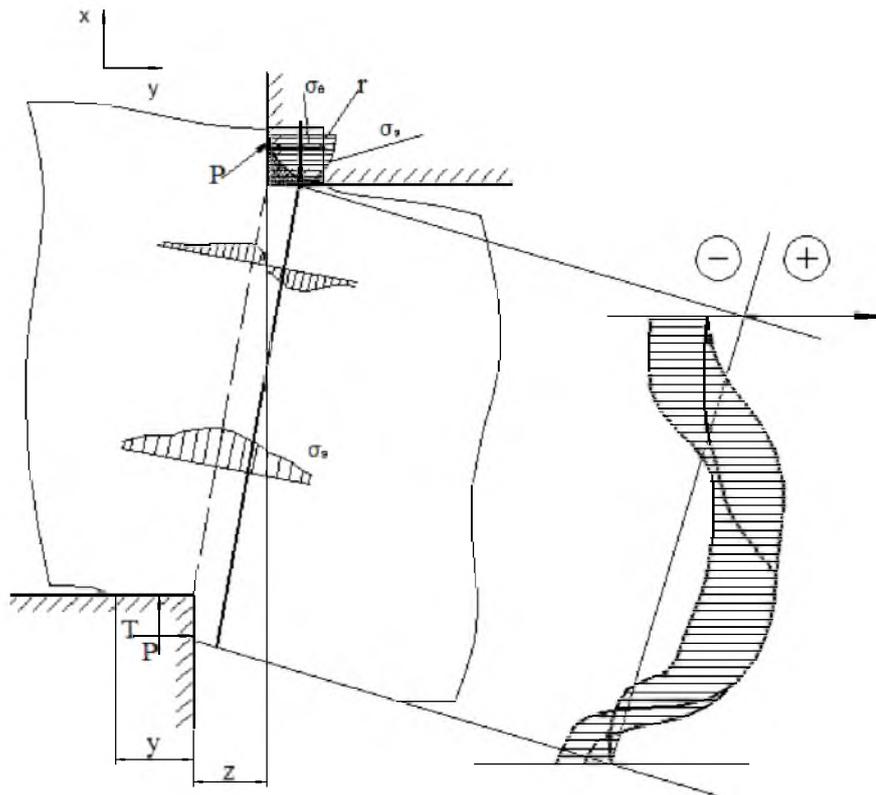


Рис.1.2.5. Поля напряжения при разделительных операциях

При рассмотрении технологии вырубki и пробивки следует коротко остановиться на определении усилия съема и проталкивания.

Чистовая вырубка и пробивка.

Высота блестящего пояска, образующегося при нормальных процессах вырубki и пробивки, а также шероховатость поверхности среза в ряде случаев не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к штампуемым деталям, особенно если поверхности среза являются поверхностями сопряжения штампуемой детали со смежной.

Увеличения высоты блестящего пояска и гладкости поверхности среза можно добиваться в основном двумя путями: уменьшением концентрации напряжений у режущей кромки и повышением пластичности материала за счет увеличения действия всестороннего сжатия.

Первое направление может быть частично реализовано путем притупления одной из сопряженных режущих кромок (пуансона или матрицы).

Другая режущая кромка должна оставаться острой во избежание появления торцовых заусенцев.

При пробивке притупляют режущую кромку пуансона, а при вырубке – матрицы.

Вырубка со сжатием может совмещаться с пробивкой отверстий и в ряде случаев сокращает объем механической обработки при изготовлении деталей, боковые поверхности которых должны быть перпендикулярны плоскостям детали и обладать достаточно низкой шероховатостью поверхности.

### **Обрезка.**

Для обеспечения заданных размеров полых деталей, получаемых формоизменяющими операциями (главным образом вытяжкой), в ряде случаев (особенно при высокой размерной точности получаемых деталей) требуется отделить припуск по краю полуфабриката. Для чего применяют операцию обрезки, которая может осуществляться дисковыми ножами или в штампах.

Способы обрезки в штампах весьма разнообразны. Наиболее сложными по конструкции являются штампы для обрезки припуска на полых полуфабрикатах без фланца, когда обрезка осуществляется при движении обрезной кромки матрицы в направлении, перпендикулярном боковой поверхности полуфабриката.

Значительно проще конструкция штампа для обрезки полуфабриката с фланцем (рис. 1.2.6.). Как видно из схемы, заготовка до обрезки должны быть зафиксирована в штампе (по внутренней или наружной поверхности) с тем, чтобы ширина остающегося после обрезки фланца была постоянной по периметру. Обрезка осуществляется режущими кромками пуансона 1 и матрицы 2, между которыми имеется зазор, определяемый по рекомендациям для случая вырубки. Отделенная часть фланца смещается по пуансону. В последующем накопившийся отход упирается в острые кромки ножей-рассекателей 3 (два или три) и разрезается на части тем же движением матрицы, укрепленной в верхней части штампа. Расстояние между торцем

матрицы в ее нижнем положении и режущими кромками ножей рассекателей должно быть 2...4 мм для того, чтобы кромки рассекателя не сминались. Таким образом, усилие деформирования при обрезке фланца должно определяться как сумма усилия обрезки (аналогично усилию вырубki), усилия съема по соответствующей формуле с учетом количества одновременно смещающихся по пуансону отходов после обрезки фланца и усилия разделения отхода на рассекателях.

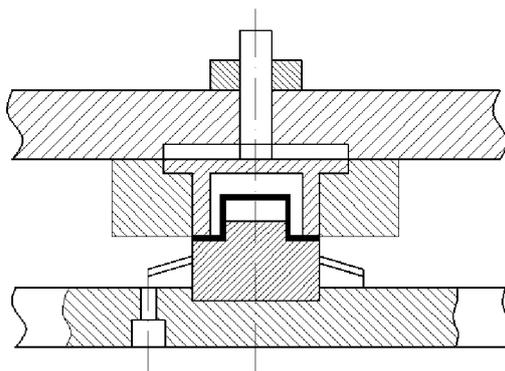


Рис.1.2.6. Схема штампа для обрезки фланца

### **Зачистка.**

Вырубка со сжатием, требующая специализированного оборудования и высокоточных дорогих штампов, не всегда оказывается экономически целесообразна для получения деталей с точными размерами и боковой поверхностью, перпендикулярной плоскости заготовки и обладающей низкой шероховатостью. Достаточно хорошее качество вырубаемых деталей можно получить также применением операций зачистки и калибровки. При зачистке повышение качества поверхности среза достигается срезанием припуска на боковых поверхностях детали и переводом части металла в стружку.

При зачистке на боковые поверхности заготовки действуют сжимающие контактные напряжения, которые при снятии внешних сил приводят к упругим деформациям, изменяющим размеры детали по сравнению с

размерами инструмента (при зачистке по внутреннему контуру поперечные размеры контура уменьшаются по сравнению с размерами пуансона). Это изменение размеров, исчисляющееся в микрометрах, учитывают при определении размеров инструмента зачистки при изготовлении отверстий в деталях приборов точной механики (часовое производство и т.п.)

### **Надрезка.**

Отделение части заготовки по незамкнутому контуру часто используется для формоизменения отделяемой части заготовки.

При надрезке применяемой для изготовления безотходной сетки с ромбообразными отверстиями, отделяемые полосы также испытывают удлинение, что заставляет опытным путем подбирать размерные характеристики ячеек сетки, гарантирующие отсутствие трещин.

Усилия деформирования при надрезке могут быть определены с использованием формул, приведенных при рассмотрении операций отрезки, вырубке и пробивки с учетом дополнительного воздействия на процесс резания изгиба или растяжения.

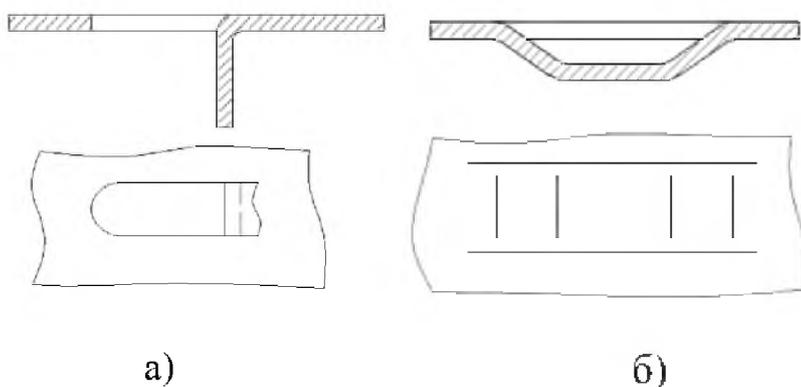


Рис. 1.2.7. Схема надрезки: а – с гибкой; б – с растяжением

### **1.3 ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА.**

Ультразвук, упругие колебания и волны с частотами приблизительно от  $1,5 \cdot 10^4$  гц (15-20 кгц) и до  $10^9$  гц (1 Ггц); область частот ультразвук от  $10^9$  до  $10^{12-13}$  гц принято наз гиперзвуком. Область частот ультразвука можно

подразделить на три подобласти: ультразвук низких частот ( $1,5 \cdot 10^4 - 10^{45}$  гц) – УНЦ, ультразвук средних частот ( $10^5 - 10^7$  гц) – УСЧ и область высоких частот ультразвука. ( $10^7 - 10^9$  гц) – УЗВЧ. Каждая из этих подобластей характеризуется своими специфическими особенностями генерации приема распространения и применения. [ 1 ]

Физические свойства и особенности распространения ультразвука. По своей физической природе ультразвук представляет собой упругие волны и в этом он не отличается от звука. Частотная граница между звуковыми и ультразвуковыми волнами поэтому условна; она определяется субъективными свойствами человеческого слуха и соответствует усредненной верхней границе слышимого звука. Однако благодаря более высоким частотам и следовательно малым длинам волн имеет место ряд особенностей распространения ультразвука. Так для УЗВЧ длины волн в воздухе составляют  $3,4 \cdot 10^{-3} - 3,4 \cdot 10^{-5}$  см, в воде  $1,5 \cdot 10^{-2} - 1,5 \cdot 10^{-4}$  см и в стали  $5 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-4}$  см. У. в газах и в частности в воздухе распространяется с большим затуханием. [ 2 ]

Ультразвук в твердых веществах используется в основном для сварки металлов, пластмасс и синтетических тканей (см. Ультразвуковая сварка), при резании металлов, стекла, керамики, алмаза и т.п (напр., сверлении, точении, гравировании) а также при обработке металлов давлением (волочении, штамповке, прессовании и др.).

Резание на ультразвуковых станках обеспечивает высокую точность, позволяет получать не только прямые круглые отверстия, но и вырезы сложных сечений, криволинейные каналы. Ультразвук, подведенный к инструменту обычного металлорежущего станка (напр., сверлу, резцу), интенсифицирует обработку и улучшает дробление стружки (см. Вибрационное резание). При обработке металлов давлением ультразвуковые колебания улучшают условия деформирования и снижают необходимые усилия. При ультразвуковом поверхностном упрочнении повышают микротвердость и износостойкость, снижается шероховатость поверхности.

Во всех этих процессах ультразвук обычно подводят с помощью волноводного концентратора к рабочим органам машин (напр., к сверлу, валкам, прокатного стана, штампу прессы, фильере).

**П р и м е н е н и е** ультразвука в технике. По данным измерений  $\epsilon$  и  $\alpha$ , во многих технических задачах осуществляется контроль за протеканием того или иного процесса (контроль концентрации смеси газов, состава различных жидкостей и т. д.). Используя явление отражения ультразвука на границе различных сред, конструируют ультразвуковые приборы для измерения размеров изделий (напр., ультразвуковые толщиномеры), для определения уровня жидкости в больших, недоступных для прямого измерения ёмкостях. ультразвук сравнительно малой интенсивности (до  $\sim 0,1$  Вт/см<sup>2</sup>) широко используется для целей неразрушающего контроля изделий из твёрдых материалов (рельсов, крупных отливок, качеств, проката и т. д.) (см. *Дефектоскопия*). Быстро развивается направление дефектоскопии, получившее назв. акустической эмиссии, которая состоит в том, что при приложении механического напряжения к образцу (конструкции) твёрдого тела он «потрескивает» (подобно кому, как при изгибе «потрескивает» оловянный стержень). Это объясняется тем, что в образце возникает движение *дислокаций*, которые при определённых условиях до конца ещё пока не выясненных) становятся источниками (так же, как и совокупность дислокаций и субмикроскопических трещин) акустических импульсов со спектром, содержащим частоты ультразвука. [ 8 ] При помощи акустической эмиссии удаётся обнаружить образование и развитие трещины а также определить её местонахождение в ответственных деталях различных конструкций. При помощи ультразвука осуществляется *звуковидение*: преобразуя ультразвуковые колебания в электрические, последние — в световые, оказывается возможным при помощи ультразвука видеть те или иные предметы в непрозрачной для света среде. На частотах УЗВЧ диапазона создан ультразвуковой микроскоп — прибор, аналогичный обычному микроскопу, преимущество которого перед оптическим состоит и

том, что при биологических исследованиях не требуется предварительного окрашивания предмета (рис.1.3.1.).

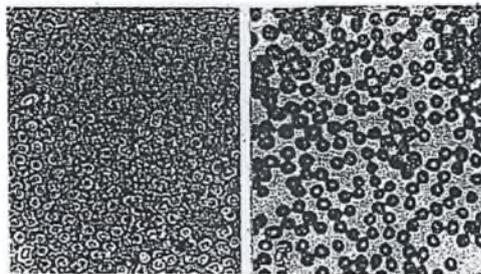


Рис .1.3.1 красные кровяные тельца полученные оптическим и ультразвуковым микроскопами.

Развитие голографии привело к определенным успехам области ультразвуковой голографии. Весьма важную роль ультразвук играет в гидроакустике, поскольку упругие волны являются единственным видом волн, хорошо распространяющимся в морской воде. На принципе отражения ультразвуковых импульсов от препятствий, возникающих на пути их распространения, строится работа таких приборов, как *эхолот, гидролокатор*. [ 4 ]

Ультразвук большой интенсивности (гл. обр. диапазон УНЧ) оказывает воздействие на протекание тех или иных технологий, процессов (см. *Ультразвуковая обработка*) посредством нелинейных эффектов — кавитации, акустических потоков и др. Так, при помощи мощного ультразвука ускоряется ряд процессов тепло- и массообмена в металлургии. Воздействие ультразвуковых колебаний непосредственно на расплавы позволяет получить более мелкокристаллическую и однородную структуру металла. Ультразвуковая кавитация широко используется для очистки от загрязнений как мелких (часовое производство, приборостроение, электронная техника), так и крупных производств, деталей (трансформаторное железо, прокат и др.). С помощью ультразвука удаётся осуществить пайку алюминиевых изделий. В микроэлектронике и полупроводниковой технике используется ультразвуковая приварка тонких проводников к напыленным металлическим плёнкам и непосредственно к

полупроводникам. С помощью *ультразвуковой сварки* соединяют пластмассовые детали, полимерные плёнки, синтетической ткани и др. Во всех этих случаях ту или иную роль играет процесс ультразвуковой очистки, локальное нагревание под действием ультразвука, ускорение процессов диффузии, изменение состояния полимера. Ультразвук позволяет обрабатывать хрупкие детали (напр., стекло, керамику), а также детали сложной конфигурации (рис 3.2).



Рис. 1.3.2 фасонные матрицы из твердого сплава, изготовленные ультразвуковым способом.

В этих процессах основную роль играют удары ультразвукового инструмента, по частицам абразивной суспензии.

#### **1.4 ПРОБИВКА И ВЫРУБКА УЛЬТРАЗВУКОМ.**

Современная промышленность предъявляет высокие требования к поверхности разделения деталей, получаемых вырубкой-пробивкой. Следует требованиям к качеству изделий и уменьшению усилия разделения, в последние годы появились работы, посвященные разделению материала с применением ультразвуковой энергии.

Японские исследователи опубликовали ряд патентов на пробивке отверстий с применением энергии ультразвука [6]. Авторы указывают на то, что при пробивке с подводом ультразвуковых колебаний к пуансону со скошенным торцом или к матрице, или к пуансону с диском диаметром равным  $1/3 \lambda$ , происходит увеличение зоны среза и снижение потребного усилия деформирования.

Смирнова [7] подтверждает выводы японских исследователей о том, что применение упругих колебаний звукового диапазона при резке металлов улучшает качество деталей, благодаря большой точности формы и значительному улучшению поверхности раздела.

Пробивка больших отверстий на стандартном прессе с подведением ультразвуковых колебаний к заготовке предлагается к работе [9]. Недостатком данного метода является невозможность получения стоячей волны в очаге деформации.

В работах авторы [16 - 18], говоря о снижении усилия деформирования и улучшения качества поверхности раздела при штамповке в ультразвуком, не объясняют получаемые эффекты. Во всех этих размерах не учитываются особенности проектирования установок для деформирования материалов в ультразвуковом поле, основные положения которых изложены в работах [10 - 12].

Исследования влияния вибрационного нагружения с амплитудой до  $5 \cdot 10^{-3}$  м и частотой колебаний до 50 Гц показало, что данный способ не оказывает влияния на качество поверхности среза, а только незначительно снижает усилие деформирования [13]. При увеличении частоты колебаний заметно снижается усилие разделения и улучшается частота поверхности среза. На наш взгляд применение колебаний ультразвукового диапазона позволит получить необходимое качество поверхности пробиваемых отверстий.

Улучшение качества поверхности среза, уменьшение усилия деформирования и повышение точности получаемых изделий в процессе упаковки можно получить если производить периодическое изменение зазора между режущими кромками [14]. Изменение зазора между режущими кромками получает путем придания матрице, трансону или обоим вместе радиальных колебаний. При уменьшении зазора в нижних слоях заготовки создается схема неравномерного всестороннего объемного сжатия вместо схемы с радиальными растягивающими напряжениями, возникающей при

увеличению зазора. Схема же объемного сжатия наиболее благоприятна для пластического течения. Однако данный метод затруднительно применять для пробивки больших групп относительно малых отверстий, так как невозможно получить радиальные колебания для всех одновременно пробиваемых отверстий.

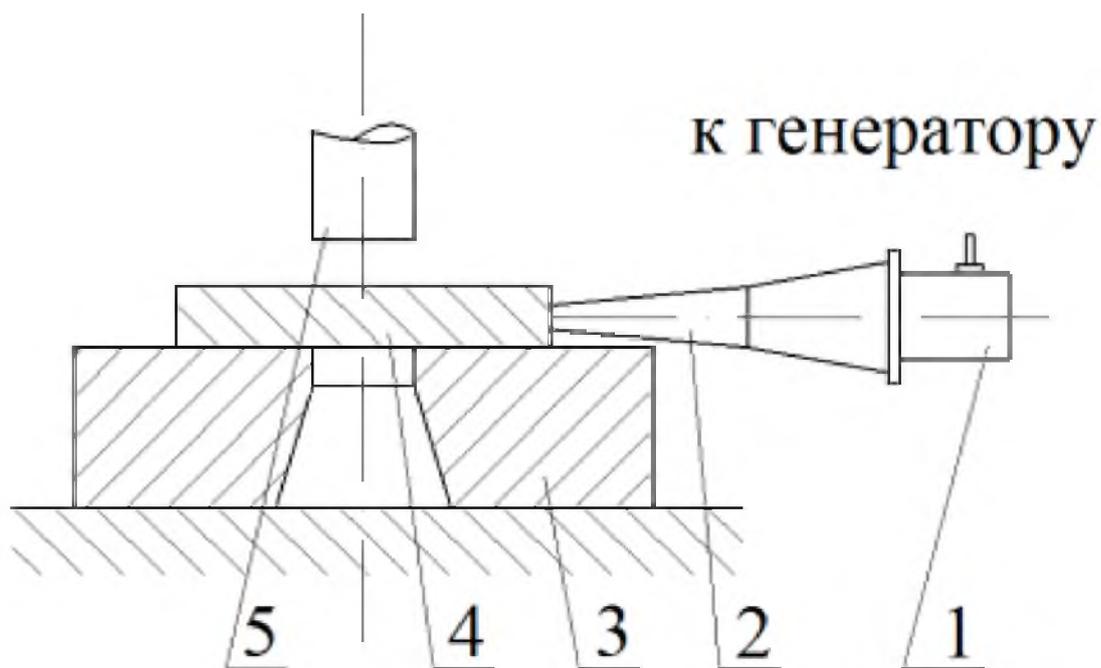


Рис. 1.4.1. Принципиальная схема подведения ультразвуковых колебаний к заготовке при вырубке: 1) магнестрикционный преобразователь; 2) волновод; 3) матрица; 4) заготовка; 5) пуансон.

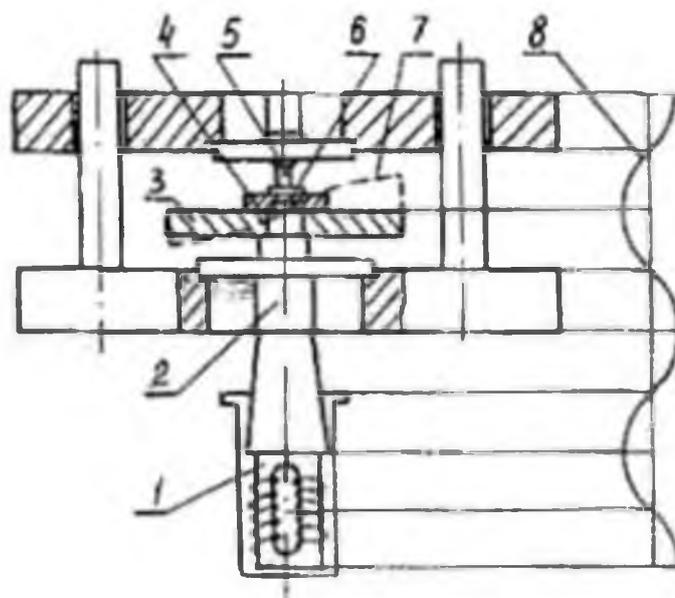


Рис.1.4.2. Принципиальная схема вырубki-пробивки с радиальными колебаниями: 1) преобразователь; 2) получатель; 3) диск; 4) матрица; 5) пуансон; 6) заготовка; 7) эпюра радиальных колебаний; 8) эпюра продольных колебаний

Для снижения усилия деформирования и получения чистоты среды выше, чем при обычной пробивке предлагается пробивка пуансоном, колеблющемся с ультразвуковой частотой. [15]

В работе [17] исследуется влияние подвода ультразвуковых колебаний при пробивке большого отверстия в слоистых пластиках как к пуансону, так и к матрице. В результате исследований установлено, что подвод вибраций как к матрице, так и к пуансону позволяет снизить статическое усилие пробивки. Однако в случае подвода ультразвуковых колебаний к матрице имеет место ряд недостатков:

- 1) Из-за меньшей концентрации ультразвука в очаге разделения невозможно получить колебания высокой интенсивности, по сравнению и подводом вибраций к пуансону;
- 2) Так как в волноводную систему входит значительная часть образца, то возрастают потери ультразвуковой энергии, что приводит к

разогреву всей заготовки лежащей на матрице, а при подводе колебаний к пуансону разогревается только часть заготовки. Если заготовка имеет большую площадь, чем матрица, то на образце остается след от внешнего контура матрицы. Отсюда следует, что подвод ультразвуковых колебаний к пуансону более предпочтителен, чем подвод их к матрице.

При пластическом формоизменении с использованием энергии ультразвука циклические напряжения ультразвуковой частоты от пуансона в матрицу переходят через узкий пояс деформируемого материала вблизи режущей кромки [19]. Энергия ультразвука поглощается в первую очередь элементами материала, с которых начинается пластическая деформация. В результате чего температура отдельных частиц материала за короткое время становится близкой температуре его плавления и тогда для скольжения слоев материала относительно друг друга нужны небольшие сдвиговые напряжения. За счет увеличения количества сдвигов зона пластической деформации при вырубке-пробивке с ультразвуком увеличивается, а зона скалывания уменьшается, что способствует улучшению качества получаемых отверстий. Таким образом использование ультразвука позволяет пробивать как пластичные, так и хрупкие материалы без подогрева.

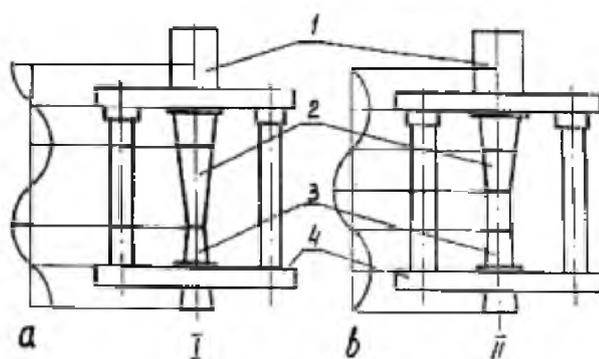


Рис.1.4.3. Схема подвода ультразвуковых колебаний к пуансону с расположением образца в пучности колебаний - I и в пучности напряжений - II

2: 1 – магнитостриктор, 2- волновод, 3-отражатель, 4-штамповый блок, а –  
эпюра колебаний, б-эпюра напряжений.

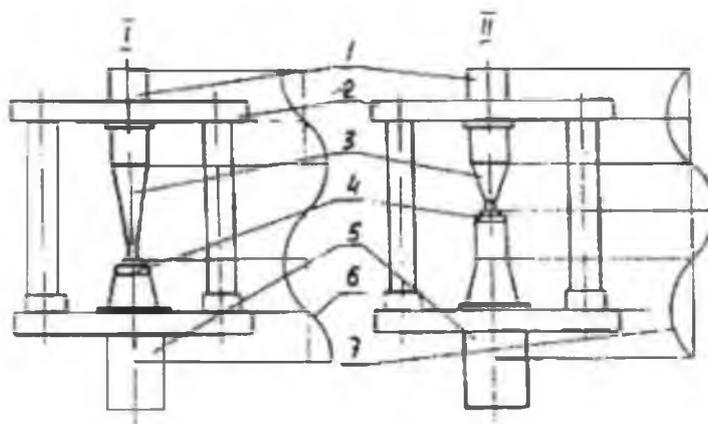


Рис.1.4.4. Принципиальная схема подвода ультразвуковой энергии к матрице с расположением образца в пучности колебаний -1, в пучности напряжений – 2: 1-отрезатель, 2-штамповый блок, 3-пуансон, 4-матрица, 5- магнитостриктор, 6-эпюра колебаний, 7-эпюра напряжений.

Исследование влияния ультразвуковых колебаний на усилие вырубki деталей из стали Х18Н10Т при расположении очага деформации в пучности напряжений [36] показывает, что статическое усилие разделения снижается на 70%. При этом снижение статического усилия деформирования приводит к улучшению поверхности среза, потому что зона пластической деформации увеличивается за счет уменьшения зоны скалывания.

Схемы подвода ультразвуковых колебаний к инструменту при пробирке большого отверстия в слоистых пластиках с расположением заготовки как в пучности, так и в узле колебаний исследуются в работе [20]. В результате экспериментов установлено, что оптимальной схемой является расположение образцов в пучности колебаний при подведении колебаний к пуансону.

Исследование влияния величины амплитуды на усилие разделения пуансоном диаметров  $10^{-2}$  м слоистых пластиковых толщиной (2,0, 2,7 и 3,15)  $\times 10^{-3}$  м в пучности колебаний показывает, что с увеличением амплитуды

резко снижается усилие деформирования. Другой спад кривых объясняется переходом статического нагружения к вибрационному. Последующее увеличение амплитуды отличается только количеством энергии, вводимой в очаг деформирования. Таким образом при определенной амплитуде колебаний происходит качественное изменение процесса деформирования.[18]

Снижение усилия разделения при наложении ультразвука увеличивает стойкость инструмента, позволяет применять для штамповки менее мощное оборудование.

При распространении ультразвуковых волн в инструменте возникают циклические напряжения

$$\sigma_{max} = \pm \frac{2\pi}{\lambda} Eak$$

Где  $E$  – модуль Юнга

$\lambda$  – длина ультразвуковой волны.

Циклические напряжения  $\sigma_{max}$  определяют стойкость инструмента и поэтому имеются ограничения в повышении вибрационной скорости. Известно, что инструментальные стали могут нормально работать при скоростях вибраций до 5 м/сек.[24]

При приложении вибраций к пуансону при вырубке-пробивке на заготовку будут действовать статическая составляющая усилия пресса –  $F_{ст}$  и вибрационная составляющая усилия  $F_6$ .

$$F = F_{ст} + F_6$$

Скорость деформирования в этом случае определяется:

$$\bar{V} = \bar{V}_k + \bar{V}_{ин}$$

В зависимости от соотношения колебательной скорости  $\bar{V}_k$  и скорости перемещения инструмента  $\bar{V}_{ин}$  возможны три режима деформации: статический – без разрыва контакта и без разгрузки от статического давления; вибростатический – без разрыва контакта, но с частичной разгрузкой от статической составляющей давления; вибрационный – с

разрывом контакта в каждом периоде и с периодической разгрузкой от усилия деформирования.[27] Экспериментально установлено, что вибрационный режим деформирования наступает в том случае, когда величина подачи за каждый период не будет превышать десятую часть амплитуды колебаний  $a_k$ .

Изменение контакта между инструментом и заготовкой в зависимости от режима деформирования вызывает повышение температуры в очаге разделения. В вибрационном режиме работы колебательной системы при вырубке-пробивке в очаге деформации температура достигает  $600^{\circ}\text{C}$ . Потому что время охлаждения микрообъемов металла в очаге деформации до следующего тепловыделения мало. Авторы считают, что высокая температура является одной из причин снижения статического усилия деформирования (до 50%) с ультразвуком.[48]

Для процесса вырубki и пробивке с ультразвуком характерным является то, что влияние как акустических, так и технологических параметров на снижение усилия деформирования зависит от хода пуансона.[25] Амплитуда смещений будет уменьшаться в процессе деформации и-за расстройки волноводной системы и возникающих при этом потерь колебательной энергии в пассивных элементах крепления разлучающей системы. В этом случае минимальное значение амплитуды является параметром, наиболее достоверно раскрывающим эффективность воздействия ультразвука на процесс пластической деформации по сравнению со значением исходной амплитуды. В результате экспериментов установлено, что резкое снижение амплитуды смещения наблюдается при усилки деформирования, большим  $1000-1500\text{ Н}$ , и сопровождается увеличением частоты колебаний на  $1,5-2\text{ кГц}$  больше резонансной.[26,28-29] Это явление обусловлено увеличением скорости распространения ультразвука в звеньях волноводной системы, подвергнутых статическому сжатию. При увеличении  $Q_{\min}$  уменьшается сопротивление срезу.

Исследование характера и величины изменения амплитуды смещения на режущих кромках вырубного пуансона, возбуждаемого продольными колебаниями, и статического усилия деформации проведено в работе. При пробивке материалов различной толщины и прочности установлено, что амплитуда смещения на режущих кромках пуансона тем меньше чем больше толщина заготовки и выше прочность материала. [21-22] Экспериментально установлено, что при пробивке-вырубке амплитуда колебательного смещения на рабочем торце вырубного пуансона уменьшается на 50-95% и зависит от типа волноводной системы и прочностных свойств деформируемого материала.

На наш взгляд, наименьшее значение амплитуды колебания инструмента в процессе разделения должно соответствовать максимальной усилию деформирования. На рис.1.4.5 кривая изменения амплитуды ( $a_0=25 \times 10^{-6}$  м) показана параллельной оси X начиная со значения  $X=0,2 \times 10^{-3}$  до  $X=10^{-3}$  м, хотя за это время усилие деформирования изменяется приблизительно в 3 раза.

С целью повышения эффективности воздействия ультразвука при вырубке-пробивке целесообразно применять мало – поглощающие, частотно-независимые волноводно-изучающие системы.

Конструкция штампа с акустической развязкой волноводной системы для вырезки-пробивки листовых материалов с ультразвуком, имеющего минимальные потери ультразвуковой энергии в пассивных элементах системы. Усилие, создаваемое прессом, передается через фланец волновода, расположенный в узле колебаний, на пуансон; при этом статическое усилие деформирования воздействует только на часть колебательной системы.

С нашей точки зрения, применение штампов с акустической развязкой колебательной системы позволит увеличить эффективность амплитуды колебаний в процессе пробивки.

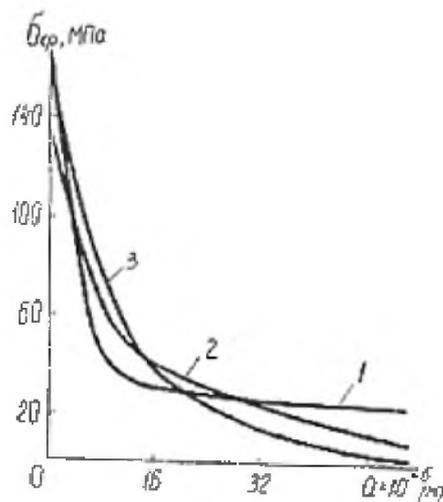


Рис.1.4.5. Изменение сопротивления среза от амплитуды ультразвуковых колебаний: 1-стеклотекстолит, 2-гетинакс тип-1, 3-гетинакс тип-4.

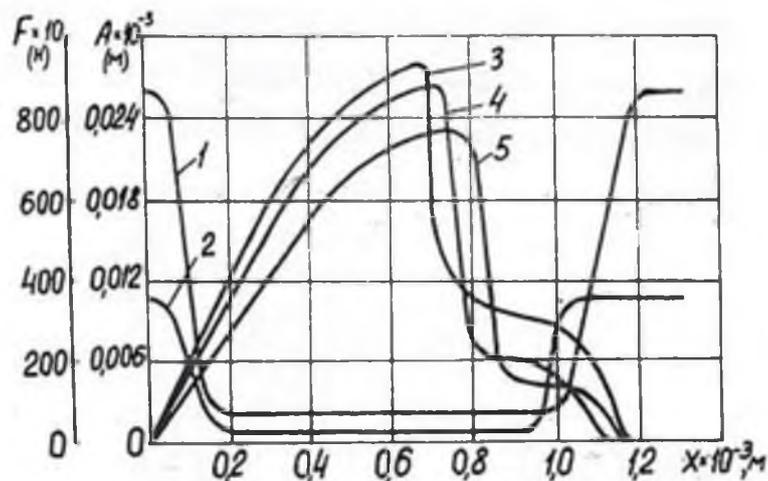


Рис.1.4.6. Осциллограмма изменения усилия деформации и амплитуды смещения от хода пуансона при пробивке заготовок из стали 20 КП: 1, 5 – кривые амплитуды смещений и усилия пробивки при начальной амплитуде  $25 \times 10^{-6}$  м; 2, 4-кривые амплитуды и усилия при начальной амплитуде  $10^{-5}$  м; 3-усилие пробивки без ультразвука.

Исследование коэффициента трения при разделении в ультразвуковом поле рассматривается в работе [23]. Экспериментами установлено, что с увеличением амплитуды продольных колебаний пуансона при пробивке

отверстий в пучности смещения коэффициент трения уменьшается (для А1 с 0,25 до 0,17 и с 0,18 до 0,13). Анализ полученных данных показывает, что эффект от воздействия ультразвука на контактное трение между инструментом и заготовкой при вырубке-пробивке с увеличением толщины материала уменьшается. Применение смазки существенного влияния на коэффициент трения при вырубке-пробивке не оказывает.

Процесс пробивки относительно больших отверстий в слоистых пластмассах как с наложением ультразвуковых колебаний, так и без ультразвука исследуется в работе с помощью скоростной съемки кинокамерой СКС-1. Эксперименты показывают [49-50], что при разделении с ультразвуком разрушение начинается при меньшем прогибе, чем при обычной штамповке. При пробивке без ультразвука трещина появляется от кромки пуансона в зоне, где имеются растягивающие напряжения, а с ультразвуком трещина начинает развиваться от кромки матрицы, то есть в зоне, где отсутствуют растягивающие напряжения.

Уменьшение точности диаметра отверстия при пробивке с ультразвуком объясняется появлением трещин разрушения при меньшем прогибе. При этом распространение трещины происходит с меньшей скоростью, чем при классической штамповке. При постепенном развитии трещины более вероятно разрушение сдвигом, а не отрывом, что способствует получению качественной поверхности раздела деталей из слоистых пластиков.

Авторами предлагается способ ультразвуковой перфорации плат печатного монтажа. [31] А в работе [39] исследуется перспективность применения этого метода в сравнении с обычной вырубкой-пробивкой.

Наиболее распространенным способом оценки поверхности раздела является метод, предложенный Бобрыниным, который заключается в рассмотрении полированного сечения образца в отраженном свете на большом проекторе с использованием специальных экранов. Однако малая отражательная способность стеклотекстолита затрудняет применение

приборов, изменяющих шероховатость поверхности методом светового сечения профиля.

Профилографы-профилометры не приспособлены для замера поверхности разделения слоистых пластмасс. В работе предлагается специальный датчик для измерения шероховатости поверхности отверстий в слоистых пластиках с помощью профилографа-профилометра.[51-52] Анализ профилограмм поверхности пробитых отверстий позволяет заключать, что при пробивке отверстий в обычных условиях на поверхности раздела наблюдается ярко выраженная зона взрыва, а в ультразвуковом поле – плавная поверхность, состоящая из двух, трех корпусов.

В статье [33] рассматривается связь между величиной максимального дефекта на поверхности среза слоистых пластиков (гетиникса) и диаметра полученных отверстий диаметру инструмента. На основе чего предлагается в производственных условиях оценивать качество пробитых отверстий по разности диаметральных размеров отверстия и инструментов. Чем больше прогиб заготовки во время вырубки-пробивки, тем значительное растягивающие напряжения в зоне разделения. Аналитически напряженное состояние заготовки из слоистого пластика в процессе вырубки определяется, если операцию вырубки-пробивки до появления первых скалывающихся трещин рассматривать как две последовательные стадии: прогиб заготовки – внедрение пуансона в материал заготовки. Компоненты тензора напряженного состояния определяются из теории упругости анизотропных сред для многослойных пластинок по формулам Лехницкого, а полный тензор напряженного состояния заготовки в точках, где наступила пластическая деформация, определяется как сумма этих компонентов с уравнением, описывающим условие текучести. Уравнения, определяющие упругую деформацию заготовки, являются функцией прогиба последней в процессе обработки. Уменьшение прогиба заготовки приближает напряженное состояние по всей поверхности раздела к напряженному состоянию – сдвигу.[53]

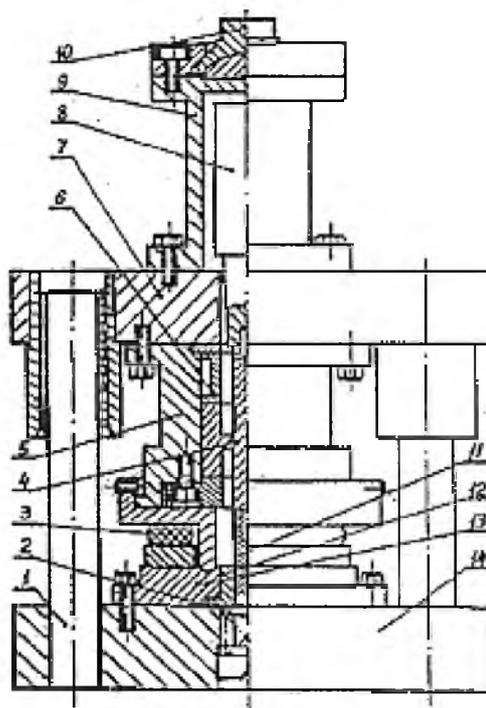


Рис.1.4.7. Штампы с акустической развязкой: 1-колонка, 2-выталкиватель, 3-резиновый буфер, 4-промежуточный волновод, 5-стакан, 6-месдоза, 7-верхняя плита, 8-магнитостриктор, 9-стакан, 10-плавающий хвостовик, 11-пуансон, 12-матрица, 13-прижим, 14-нижняя плита.

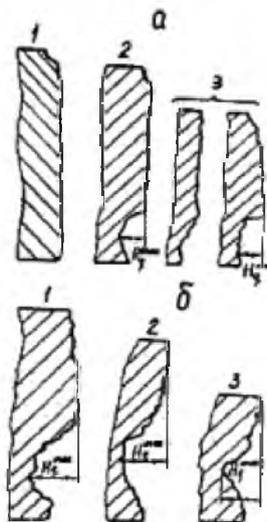


Рис.1.4.8. Типовые профилограммы поверхности отверстий пробитых с ультразвуком (а) и без ультразвука (б): 1-стеклотекстолит СТЭФ-1, 2-гетинакс тип-1, 3-гетинакс тип-4.

Влияние усилия прижима заготовки, величины зазора между режущими кромками инструмента при пробивке отверстий диаметром  $0,8 \times 10^{-3}$  м в стеклотекстолите той же толщины как в пучности колебаний, так и в пучности напряжений с подводом ультразвуковых колебаний рассматривается в работе.[54] Установлено, что увеличение давления прижима заготовки до 3 Мпа предотвращает изгиб волокон, образование расслоений, отслоение фольги и улучшает качество среза.[59] Исследование влияния зазора между пуансоном и матрицей показывает, что увеличение зазора приводит к снижению усилия деформирования, однако при больших зазорах увеличивается зона расслоения и качество поверхности среза ухудшается. Воздействие ультразвуковых колебаний инструмента на процесс вырубки приводит к тому, что в обеих схемах ультразвуковой штамповки значительно снижается расслоение материала и улучшается качество среза.

В результате экспериментов установлено, что при расположении очага деформации в пучности напряжений снижение усилия деформирования меньше, чем при расположении зоны деформации в пучности колебаний.

Проведенные авторами исследования показывают, что штамповка слоистых пластмасс с ультразвуком позволяет получать детали с отверстиями, имеющими повышенное качество поверхности разделения, в фольгированных заготовках.

В рассматриваемых работах по пробивке с ультразвуком можно выделить следующие основные моменты:

1. Увеличение частоты колебаний инструмента способствует снижению усилия разделения и улучшению качества пробиваемых отверстий.
2. Подведению продольных ультразвуковых колебаний к пуансону более предпочтительно, чем к матрице.
3. Снижение статического усилия деформирования увеличивает стойкость инструмента.

4. Вырубка-пробивка слоистых пластиков при расположении очага деформации в пучности колебаний позволяет получить максимальной эффект от применения ультразвука.

5. Циклические напряжения распространяются по контактному пояску вблизи режущих кромок.

6. Влияние ультразвука подобно воздействию температуры на материал заготовки.

7. При определенной амплитуде колебаний инструмента, характерной для каждого материала, происходит качественное изменение схемы деформирования.

8. Исходная амплитуда колебаний инструмента но совсем верно отражает эффективность воздействия на процесс разделения.

9. Вибрационный режим деформирования наступает в том случае, когда  $V_{ин} < 0.1 Q_x$ .

10. Увеличение зазора между режущими кромками при пробивке с ультразвуком способствует снижению усилия деформирования, но ухудшает качество поверхности среза.

## 1.5 ВЫВОДЫ ИЗ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Анализ литературных данных по пробивке относительно малых отверстий позволяет сделать следующие выводы:

1. Пробивка – вырубка отверстий, имеющих диаметр гораздо меньше , чем толщина заготовки ,относится к объемной задаче , решение которой представляет математические трудности.
2. Отсутствие фундаментальной теории процесса пробивки относительно малых отверстий приводит к тому, что исследователи, как правило, пользуются положениями теории листовой штамповки, которая в настоящее время наиболее разработана для металлов.
3. Процесс пробивки относительно малых отверстий усложняется спецификой механических свойств (хрупкость, анизотропия и т.д.).
4. Воздействие ультразвуковых колебаний на процесс пробивки оказывает значительное влияние на параметры процесса пробивки (уменьшение статического усилия деформирования, улучшения качества поверхности разделения).
5. Подведение продольных ультразвуковых волн к пуансону при пробивке с расположением очага деформации в пучности колебаний позволяет добиться максимального эффекта от воздействия ультразвука.

Из литературного обзора работ по пробивке-вырубке относительно малых отверстий с ультразвуком видно, что этот вопрос недостаточно изучен и в производных условиях часто отказываются от более производительных процессов и пользуются старыми способами (сверлением). Получение же отверстий в платах методами штамповки пригодных под металлизацию практически невозможно.

На наш взгляд, применение ультразвука в процессах пробивки-вырубке предпосылки к получению монтажных отверстий в платах методом штамповки.

Для достижения этой цели в настоящей работе поставлены следующие задачи исследования :

1. Анализ ультразвуковых колебаний на процесс пробивки-вырубки относительно малых отверстий при применении замкнутой и разомкнутой колебательных систем, в частности:
  - а) на статическое усилие деформирования;
  - б) на качество поверхности среза;
  - в) на точность получаемых отверстий.
2. Получение математической модели процесса пробивки-вырубки малых отверстий с использованием энергии ультразвука.
3. Определение влияния типа колебательной системы на снижение исходной амплитуды колебаний инструмента.
4. Оценка температуры, возникающей в очаге деформации при пробивке-вырубке отверстий с ультразвуком.
5. Создание оптимальных конструкций штампов для пробивки-вырубки больших групп отверстий малого диаметра с ультразвуком.
6. Создание специального оборудования для пробивки-вырубки с ультразвуком.

## ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.

### 2.1. Очаг деформации и усилие деформирования.

В разделительных операциях листовой штамповки отделение одной части заготовки от другой осуществляется относительным смещением этих частей в направлении, перпендикулярном к плоскости заготовки. Это смещение в начальных стадиях характеризуется пластическим деформированием, но завершается обязательно разрушением. [55]

Для уменьшения искажений заготовки, вызываемых пластическими деформациями, стремятся локализовать очаг пластической деформации, чему способствует уменьшение радиусов скругления рабочих кромок инструмента и уменьшение зазора между пуансоном и матрицей.

Наличие зазора приводит к тому, что силы, приложенные к заготовке со стороны матрицы и пуансона, образуют момент, равный произведению равнодействующих элементарных сил, действующих от пуансона и матрицы на плечо несколько большее, чем зазор  $z$ . Наличие момента вызывает поворот в пространстве отделяемых частей (при отрезке) или изгиб заготовки (при вырубке и пробивке). Это в свою очередь, приводит к резкой неравномерности распределения нормальных напряжений на контактных поверхностях. Нормальные напряжения увеличиваются от нуля по мере приближения к режущим кромкам до максимума вблизи последних. Неравномерность распределения напряжений на контактных поверхностях вызывает неравномерность распределения напряжений в слоях, параллельных плоскости листа, и в толщине заготовки.

Согласно принципу Сен-Венана о локальности эффекта самоуравновешивающихся внешних нагрузок, по которому неравномерность распределения напряжений, вызванная действием сосредоточенных сил, быстро убывает по мере удаления от точки приложения этих сил, в разделительных операциях по мере удаления от режущих кромок в толщину

заготовки неравномерность распределения напряжений уменьшается, а протяженность зоны пластических деформаций в направлениях, перпендикулярных к направлению внешних сил резания, увеличивается. [56] Отсюда следует, что очертания очага деформации в разделительных операциях, как это подтверждается опытом (рис.2.1.1), приближенно имеют вид, показанный на рис.2.1.2.

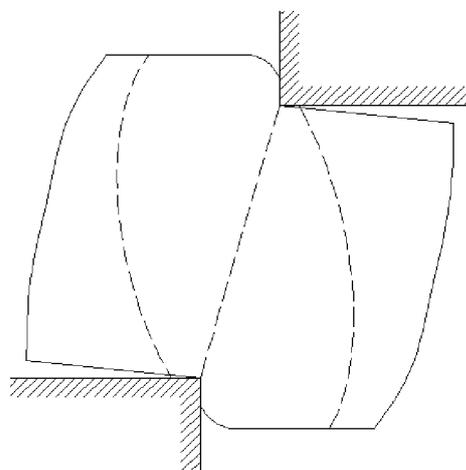


**Рис.2.1.1. Изменение макроструктуры при вырубке**

Неравномерности распределения напряжений в очаге деформации соответствует неравномерность распределения величин деформаций. Максимальная величина деформаций будет вблизи режущих кромок; по мере удаления от них в толщину заготовки и в направлениях, перпендикулярных к линии действия внешних сил, величина деформаций уменьшается. Можно полагать, что в слоях заготовки, первоначально параллельных плоскости листа, наибольшая величина меридиональной деформации  $\varepsilon_p$  будет в элементах, расположенных вблизи поверхности, соединяющей режущие кромки рабочего инструмента. Деформация  $\varepsilon_p$ , на этой поверхности переменна, минимальное значение соответствует середине толщины, а увеличивается она по мере приближения рассматриваемых слоев к режущим кромкам. Такому характеру распределения деформации способствует также и то обстоятельство, что очаг пластической деформации зарождается вблизи режущих кромок возникает на все большую глубину по мере внедрения

режущих кромок в заготовку. При определенном внедрении режущих кромок очаги пластической деформации, возникающие у режущих кромок, сольются, образуя единый очаг, пронизывающий всю толщину заготовки.

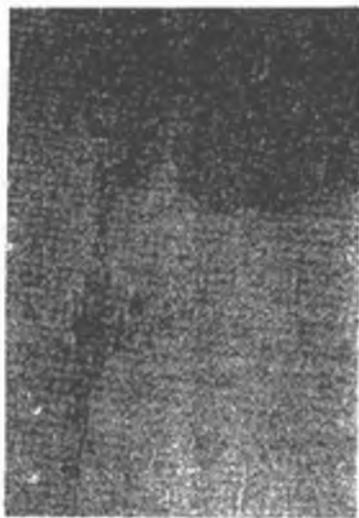
С момента образования единого очага деформации начинается остаточное смещение одной части заготовки относительно другой в направлении, перпендикулярном к плоскости заготовки. По мере увеличения смещения величины деформаций, возникающие в очаге деформации также увеличиваются, причем наиболее интенсивно вблизи поверхности, соединяющей режущие кромки инструмента.



**Рис.2.1.2. Схема очага деформации в разделительных операциях**

Каждый металл без разрушения способен воспринять пластическую деформацию определенной величины, которая зависит от свойств металла и схемы напряженного состояния. В соответствии с этим и в разделительных операциях без снятия стружки при достижении определенной величины пластической деформации может начаться разрушение. А так как максимальная деформация имеет место вблизи режущих кромок, то и разрушение может начаться в первую очередь в элементах, расположенных вблизи режущих кромок инструмента. При этом следует иметь в виду, что величина предельной (без разрушения) пластической деформации зависит от схемы напряженного состояния и величины действующих напряжений и увеличивается с увеличением шарового тензора сжатия. Именно поэтому разрушение должно начаться не в элементах, расположенных под (или над)

торцом рабочего инструмента, а в элементах, противостоящих свободным поверхностям (при положительном зазоре), где величина сжимающих напряжений меньше. Это обстоятельство наглядно подтверждается фотографией, показывающей макрошлиф участка заготовки у режущей кромки в момент начала образования трещины (рис. 2.1.3). Этим же объясняется появление торцового заусенца, особенно в случае притупления режущих кромок.



**Рис.2.1.3. Зарождение трещины режущей кромки.**

Приведенные соображения и данные позволяют воссоздать картину процесса деформирования в разделительных операциях без снятия стружки. В начальных стадиях пластическая деформация сосредоточивается у кромок, которые внедряются на некоторую глубину в металл. Очаги деформации от режущих кромок увеличиваются, продвигаясь в толщину заготовки, до смыкания. Дальнейшее внедрение режущих кромок вызывает пластическую деформацию по всей толщине заготовки, обуславливающую смещение одной части заготовки относительно другой. В этой стадии деформирования имеет место или только пластическая деформация [54], или уже начинается разрушение слоев заготовки, но только тех, которые приходят в непосредственное соприкосновение с режущей кромкой.

При смещении одной части заготовки относительно другой в результате действия момента, образованного вертикальными силами  $P$ , заготовка стре-

мится повернуться и на боковых поверхностях смещаемых частей возникают горизонтальные силы  $T$ , прижимающие заготовку к боковым поверхностям режущего инструмента. Эти силы при смещении режущего инструмента относительно заготовки сглаживают поверхность, образуя блестящий пояс на поверхности среза.

Как только будет достигнута предельная величина деформации в слоях заготовки, расположенных вблизи от режущих кромок, последние разрушаются, образуя трещины, быстро развивающиеся в толщину заготовки.

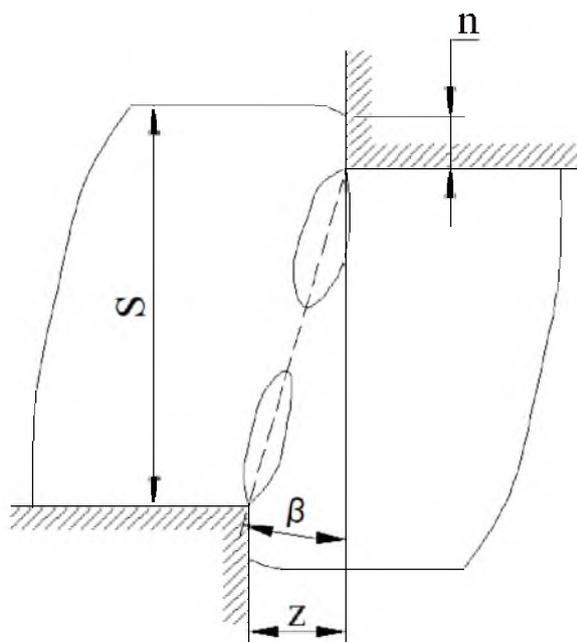
Благодаря расклинивающему действию сил  $P$  и  $T$  образующаяся трещина несколько разворачивается к свободной поверхности. Слияние этих трещин в разделительных операциях без снятия стружки завершает процесс отделения одной части заготовки от другой.

Однако слияние трещин может произойти не при всех условиях деформирования. Если принять (следуя методике В. П. Романовского [57]), что трещины имеют прямолинейную образующую, наклоненную под углом  $\beta$  к оси инструмента (рис.2.1.4), а глубину внедрения режущей кромки до появления трещины обозначить через  $A$ , то величина зазора между режущими инструментами  $z$ , обеспечивающего слияние трещин, идущих от режущих кромок, может быть найдена из простой геометрической зависимости

$$z = (s - h)tg\beta,$$

где  $s$  — толщина заготовки.

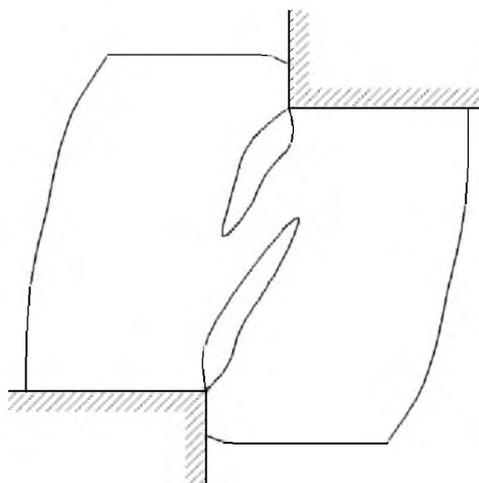
Как показали опыты [32], средняя величина угла  $\beta$  колеблется от 4 до 6°, уменьшаясь с увеличением прочностных характеристик материала заготовки. В то же время глубина внедрения  $h$  до появления трещин колеблется от 0,1 до 0,5 толщины заготовки, увеличиваясь с увеличением пластичности материала заготовки (с уменьшением прочностных характеристик).



**Рис.2.1.4. Схема определения величины оптимального зазора.**

С учетом приведенных данных можно сделать вывод, что минимальная величина зазора, обеспечивающая слияние трещин, развивающихся от режущих кромок, уменьшается с повышением пластичности штампуемого металла (с уменьшением прочностных характеристик).

Минимальный зазор, обеспечивающий совпадение трещин в разделительных операциях, называют оптимальным зазором. Уменьшение зазора по сравнению с оптимальным значением приводит к тому, что трещины, развивающиеся от режущих кромок не встречаются и поверхность среза получается рваной с поясками дополнительных срезов перемычек между трещинами (рис. 2.1.5).



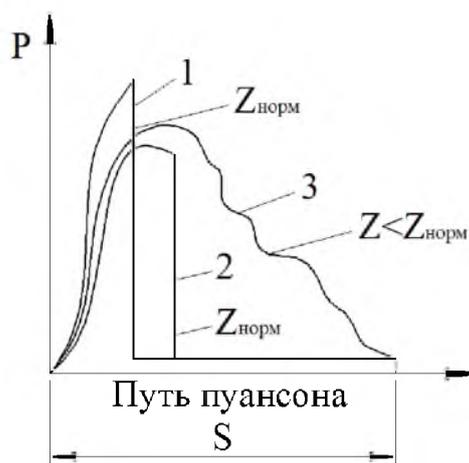
**Рис.2.1.5 Схема распространения трещин при малом зазоре.**

При увеличении зазора относительно оптимального трещины по-прежнему сливаются, однако при этом возрастает наклон поверхности «реза к оси (разница в поперечных размерах заготовки или отверстия), а также увеличиваются искажения, вызванные действием момента (так как плечо, на котором действуют силы, увеличивается с увеличением зазора).

Необходимо отметить, что при отрезке действие момента вызывает поворот отдельных частей заготовки относительно линии отрезки; величину поворота ограничена и должна определиться равенством момента сил резания  $P$  и реактивного момента, образованного давлением заготовки на боковые поверхности режущего инструмента  $T$ . При вырубке и пробивке момент сил резания вызывает прогибы в отделяемой и остающейся по матрице частях заготовки, величина которых также определяется равенством активного и реактивного моментов. Реактивный момент в данном случае будет образован не только моментом сил, вызванных давлением заготовки на боковые поверхности инструмента, но и моментами сил, возникающих в изгибаемых частях заготовки.

Изложенное относительно процесса деформирования заготовки в разделительных операциях без снятия стружки позволяет перейти к изучению силовых условий деформирования. Типовые графики изменения усилия по пути при вырубке с нормальным и уменьшенным зазорами, а также при пластичном и малопластичном материале приведены на [рис.2.1.6](#).

Из графиков видно, что в начальных стадиях деформирования усилие возрастает медленно (смятие и образование очага деформации с врезанием кромок), а затем быстро (процесс сдвига одной части относительно другой). При определенной глубине внедрения усилие резко падает для малопластичных материалов или плавно изменяется, имея максимум, для пластичных материалов. Однако и для пластичных металлов при определенной величине внедрения режущих кромок усилие резко падает до значения, соответствующего усилию проталкивания.



**Рис.2.1.6. Графики изменения усилия по пути в разделительных операциях: 1-малопластичный металл; 2 и 3 - пластичный металл.**

Это происходит при величине пути, значительно меньшем толщины заготовки. Однако такой характер изменения усилия по пути имеет место при оптимальном зазоре. Когда зазор меньше оптимального, то, во-первых, увеличивается максимальное значение усилия и, во-вторых, не наблюдается резкого уменьшения усилия после начала образования трещин. По мере дальнейшего внедрения режущих кромок уменьшение усилия происходит рывками, ступенчато.[34 – 35] Очевидно, резкое уменьшение усилия при нормальном зазоре объясняется слиянием трещин, идущих от режущих кромок, а ступенчатое уменьшение усилия при малом зазоре — несовпадением трещин и тем, что требуется определенное усилие для срезания и проталкивания поясков между трещинами. Таким образом, при величине зазора меньше оптимального усилие деформирования увеличивается незначительно, но существенно возрастает работа деформации.

Представляет интерес увеличение усилия деформирования в начальных стадиях разделения, когда площадь среза уже начинает уменьшаться. Одной из причин этого может быть упрочнение металла, которое наиболее интенсивно происходит в начальных стадиях деформирования.[30]

Примем, что кривая упрочнения второго рода описывается уравнением

$$\delta_s = \frac{\delta_B}{1 - \varphi_{ш}} \left( \frac{\varphi}{\varphi_{ш}} \right)^{\frac{\varphi_{ш}}{1 - \varphi_{ш}}}$$

где  $\delta_B$  — предел прочности;  $\varphi_{ш}$  — относительное уменьшение площади поперечного сечения образца при испытании на растяжение к моменту начала образования шейки.

Эквивалентной деформацией при вырубке может быть принята деформация уменьшения площади среза

$$\varphi = \frac{F_0 - F}{F_0}$$

где  $F_0 = sL$ ;  $F = (s - x)L$ ;  $s$  — толщина заготовки;  $L$  — длина линии резания;  $x$  — глубина внедрения режущей кромки.

В этих условиях  $\varphi = x/s$ .

При пластической деформации по гипотезе максимальных касательных напряжений

$$\tau_s = \frac{\delta_s}{2}$$

Примем, что имеет место чистый сдвиг, и по поверхности и, соединяющей режущие кромки, действует  $\tau$ , (главные оси наклонены под углом  $\sim 45^\circ$  к оси инструмента). Тогда усилие деформирования  $P$  равно

$$P \approx \frac{\delta_s}{2} L(s - x) = \frac{\delta_s}{2} F_0(1 - \varphi)$$

Подставляя  $\delta$ , из формулы (43), получаем

$$P \approx \frac{\delta_s F_0(1 - \varphi)}{2} \frac{1 - \varphi}{1 - \varphi_{ш}} \left( \frac{\varphi}{\varphi_{ш}} \right)^{\frac{\varphi_{ш}}{1 - \varphi_{ш}}}$$

Из полученной формулы видно, что  $P = 0$  при  $\varphi = 0$  и при  $\varphi = 1$ . Отсюда следует, что кривая  $P = f(\varphi)$  имеет максимум. Чтобы установить, какому значению  $\varphi = x/s$  соответствует максимум усилия, необходимо приравнять нулю первую производную усилия  $P$  по деформации  $\varphi$  ( $\frac{dP}{d\varphi} = 0$ ).

Нетрудно убедиться, что в этом случае максимум усилия должен соответствовать значению  $\varphi = \varphi_{ш}$ . Из формулы можно установить (после подстановки в нее значения  $\varphi = \varphi_{ш}$ ), что

$$P_{max} \approx \frac{\delta_b F_0}{2} = \frac{1}{2} L_s \delta_b$$

Проведенный анализ является приближенным; это подтверждается, в частности, тем, что действительное значение  $P_{max}$  несколько больше величины, полученной по формуле. Приближенность приведенного анализа обусловлена принятыми допущениями, основными из которых являются следующие: равномерность распределения деформаций (а следовательно, и упрочнения) по толщине; постоянство направления главных осей по толщине заготовки и в процессе деформирования; совпадение траекторий максимальных касательных напряжений с поверхностью, соединяющей режущие кромки верхнего и нижнего инструмента.[23]

Неточность полученной формулы подтверждает еще и тем, что при отсутствии упрочнения ( $\varphi_{ш} = 0$ ), т. е. при  $\tau_s = \delta_b/2 = \text{const}$ , она показывает уменьшение усилия с самого начала пластического деформирования

( $P_{max}$  при  $\varphi = x/s = 0$ ), что не соответствует действительности. Проведенные опыты по вырубке в свинце (который при комнатной температуре и малой скорости деформации почти не упрочняется) показали, что усилие вначале возрастает до максимума, а потом уменьшается, причем имеет место при  $x = \frac{1}{3}s$ , но так как свинец весьма пластичен, то усилие после  $P_{max}$  снижается плавно почти до  $\varphi = 1$  (трещины не образуются).

Можно полагать, что неточность полученной формулы связана главным образом с допущением о постоянстве направления главных осей в процессе деформирования. В действительности вследствие влияния недеформируемых участков по мере внедрения режущих кромок главные оси будут поворачиваться, и направление одной из них будет близко к направлению

касательных к изогнутым в процессе деформирования элементарным слоям заготовки.

На **рис. 2.1.7** дана макроструктура заготовки, получившей деформацию, соответствующую началу образования трещины. Благодаря наличию неметаллических включений в макроструктуре образовавшиеся трещины развивались по границам слоев и вызывали их отделение. [58]

Из рисунка видно, что в процессе деформирования смещение одной части заготовки относительно другой приводило к "растяжению слоев, а интенсивное их утонение — к разделению, при котором толщина трещины увеличивалась. Основываясь на этом, можно принять весьма приближенную схему деформирования, в которой в направлении касательной к изогнутым слоям будут действовать напряжения, равные напряжению текучести (схема напряженного состояния близка к линейной). Примем, что наклон этих



**Рис.2.1.7. Разрушение с расслоением.**

касательных к горизонтали постоянен на поверхности среза для всех слоев и возрастает от нуля до максимума в процессе деформирования; тогда (**рис.2.1.8**) усилие деформирования определится по формуле

$$P = \delta_s(s - x)L\sin\alpha,$$

где  $\alpha$  — угол между касательной, проведенной к слою в точке его пересечения с поверхностью, соединяющей режущие кромки, и горизонталью.

В процессе деформирования по мере увеличения  $x$  угол  $\alpha$  будет увеличиваться.

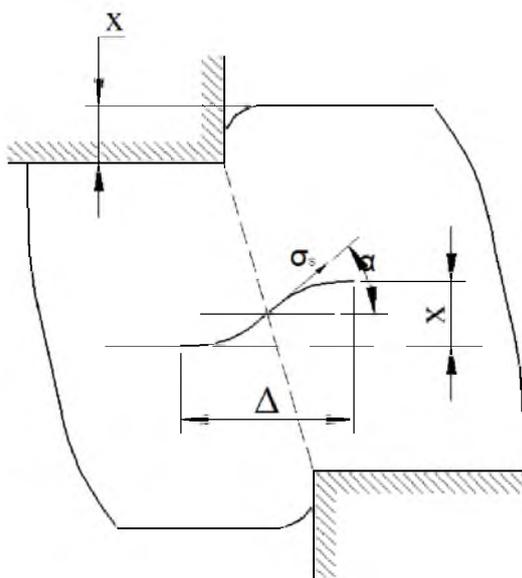
Если принять, что ширина зоны пластических деформаций равна  $\Delta$ , то

$$\sin\alpha \approx \frac{x}{\sqrt{\Delta^2 + x^2}}$$

С учетом этого формула для определения усилия деформирования будет иметь вид

$$P = \frac{\delta_s(s-x)xL}{\sqrt{\Delta^2 + x^2}}$$

Из этой формулы видно, что  $P=0$  при  $x = s$  и  $x = 0$ . Следовательно, кривая изменения усилия по пути должна иметь максимум (даже при постоянной величине напряжения текучести), который обусловлен поворотом главных осей в процессе деформирования.



**Рис.2.1.8. Схема к определению усилия деформирования.**

Любопытно отметить, что из формулы следует, что величина усилия зависит от ширины зоны пластической деформации  $\Delta$  и увеличивается с уменьшением последней.

Эти формулы являются приближенными, так как они выведены с использованием очень грубых допущений. Однако они вскрывают физическую сущность того, что максимальное усилие деформирования возникает при определенной глубине внедрения режущих кромок в заготовку, а не в начале деформирования, когда площадь среза максимальна. Как следует из приведенных формул, это явление объясняется большой интенсивностью упрочнения в начальных стадиях деформирования и поворотом главных осей в процессе деформирования заготовки.

Приведенный анализ позволяет также выяснить причину различия кривых усилие — путь для пластичного и хрупкого материала. Первую кривую характеризует резкое снижение усилия деформирования, наблюдаемое после достижения максимальной величины (после плавного снижения от  $P_{max}$ ), вторую — резкое снижение усилия от  $P_{max}$ . Очевидно, это объясняется различием в пластичности материала. В первом случае пластичность исчерпывается и образуются трещины при значительной деформации, - величина которой больше, чем та, которая соответствует возникновению  $P_{max}$ , определенному без учета возможного разрушения, а во втором случае разрушение начинается при меньшей деформации, чем деформация, соответствующая возникновению  $P_{max}$ . Заметим, что в данном случае допустима аналогия с испытанием на растяжение, когда пластичный металл образует шейку и разрушается после достижения максимального усилия, а хрупкий разрушается без образования шейки. Из сказанного, в частности, следует, что высота блестящего пояска для пластичных материалов может быть несколько больше глубины внедрения режущей кромки, соответствующей максимуму усилия деформирования.

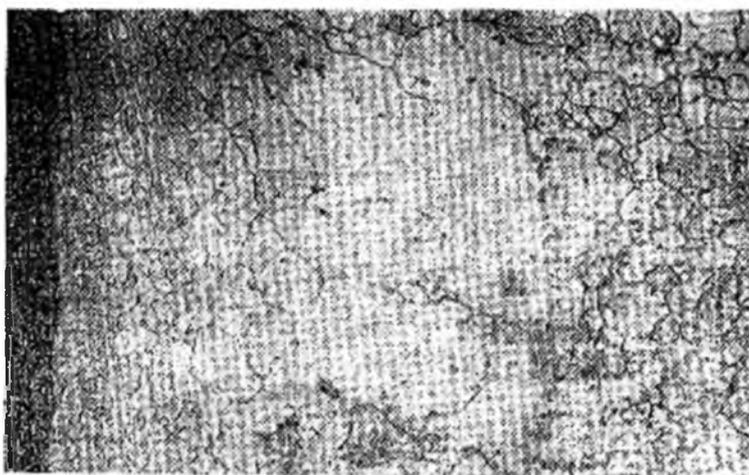
Рассмотрим теперь еще некоторые явления, связанные с изменением зазора между режущими кромками.

Ранее было показано, что слишком малый зазор приводит к образованию рваной поверхности среза. Однако в разделительных операциях величина зазора оказывает влияние и на некоторые показатели процесса деформирования. Увеличение зазора сверх оптимальных значений увеличивает вероятность образования торцового заусенца. Действительно, с увеличением зазора увеличивается изгибающий момент и его влияние на процесс деформирования, благодаря которому величина растягивающих напряжений у свободных поверхностей возрастает. При значительных растягивающих напряжениях трещина образуется не от режущих кромок, а от свободной поверхности создавая торцовый заусенец. Образованию торцового заусенца способствует также притупление режущих кромок, которое, уменьшая концентрацию напряжений (сжимающих) у режущих кромок, увеличивает растягивающие напряжения вблизи свободных поверхностей. Кроме того, зазор оказывает влияние на величину максимального усилия деформирования и на распределение нормальных напряжений на контактных поверхностях.

С уменьшением зазора уменьшается плечо, а следовательно, и величина изгибающего момента, благодаря чему уменьшается изгиб (или поворот) заготовки в процессе деформирования. Как следствие этого, уменьшается влияние растягивающих напряжений, растет шаровой тензор сжатия, уменьшается ширина зоны пластической деформации и возрастает концентрация нормальных напряжений у режущей кромки. Благодаря росту концентрации напряжений, уменьшению растягивающих напряжений и ширины зоны пластических деформаций, увеличивается усилие деформирования. Таким образом, для уменьшения усилия деформирования желательно увеличение зазора; однако пределы его допустимого увеличения ограничиваются опасностью появления торцового заусенца, а также увеличением искажений (изгиба) заготовки вследствие возрастания момента.

Увеличение нормального контактного напряжения у режущих кромок с уменьшением зазора приводит к более быстрому их смятию (притуплению), а следовательно, к ускоренному выходу из строя режущего инструмента. Нужно отметить, что с уменьшением зазора по сравнению с его оптимальным значением увеличивается износ боковых поверхностей режущего инструмента. Это объясняется увеличением поверхности трения при появлении поясков вторичного среза, увеличением сил трения вследствие заклинивания срезанных перемычек между трещинами и роста нормальных напряжений на боковых поверхностях.

При рассмотрении механизма процесса резания без снятия стружки необходимо обратить внимание и на то, что вблизи поверхности среза образуется участок, в котором при резании имели место пластические деформации и в котором при холодной деформации имело место упрочнение. Наличие упрочненной зоны у поверхности среза может быть нежелательным, если при последующем деформировании периметр заготовки увеличивается (отбортовка), если наклепанные участки в условиях эксплуатации детали получают переменные (циклические) нагрузки или если деталь работает в агрессивной среде. В первом случае вследствие снижения пластичности при упрочнении наклепанный участок при деформировании растяжением быстрее разрушается; во втором случае вследствие значительных остаточных напряжений может уменьшиться усталостная прочность и снижается сопротивление коррозии, что приводит к разрушению детали. Размеры наклепанной зоны в разделительных операциях могут быть установлены экспериментально в результате исследования микроструктур (по вытянутости зерен), измерением твердости (которая увеличивается с упрочнением), по глубине стравливания (наклепанный металл стравливается интенсивнее) и размерам зерен после рекристаллизации (участки с критической степенью деформации, разной 5—7%, дадут резкое увеличение размеров зерен; [рис. 2.1.9](#)).



**Рис.2.1.9. Укрупненные после рекристаллизации зерна по границе очага деформации.**

Опытами установлено, что протяженность зоны пластических деформаций увеличивается с увеличением зазора, с ростом притупления режущих кромок обычно ширина этой зоны больше для мягких металлов, чем для твердых.[37] Объясняется это тем, что с уменьшением зазора и притупления кромок растет концентрация напряжений у режущих кромок, а следовательно, уменьшается ширина наклепанной зоны вследствие большей локальности распределения деформаций. Более мягкие металлы дают большее смятие металла под инструментом, что увеличивает ширину контактного участка, а это одновременно с ростом глубины внедрения до появления трещин приводит к увеличению ширины наклепанного слоя. Как показали опыты, ширина наклепанного слоя от поверхности раздела колеблется от 0,3 до 0,5 толщины заготовки.

Величины деформаций в зоне пластических деформаций изменяются от нуля на границе зоны до максимума вблизи поверхности раздела, причем интенсивность увеличения деформаций по мере приближения к поверхности раздела возрастает по закону, близкому к степенному. Распределение прочностных свойств, измененных в результате упрочнения, аналогично распределению деформаций в указанной зоне. Последнее обстоятельство весьма важно при назначении величины припуска под зачистку или механическую обработку.[40] Припуск, назначаемый для удаления

наклепанного слоя, будет определяться условиями последующей штамповки или работы детали; величина его может составлять определенную долю ширины наклепанного слоя (удаление половины наклепанного слоя в ряде случаев может быть вполне достаточным).

В заключении раздела, посвященного рассмотрению процесса деформирования заготовки в разделительных операциях, остановимся кратко на полуэмпирическом способе определения максимального усилия деформирования.[44]

На практике, учитывая сложность процесса деформирования в этих операциях, принят способ определения  $P_{max}$  с использованием экспериментальных значений сопротивления срезу  $\delta_{cp}$  как частного от деления  $P_{max}$ , полученного в опытах (обычно в статических условиях), на площадь среза, определяемую как произведение длины линии резания на толщину заготовки (при параллельных режущих кромках). Найденные в опытах значения приводятся в справочниках, нормалях и монографиях в виде таблиц и служат исходными данными для определения усилия деформирования. При расчетах усилия деформирования считается (в достаточном соответствии с практикой), что сопротивление срезу для любого металла не зависит от площади среза при оптимальных зазорах, при отсутствии притупления режущих кромок и при одинаковой скорости деформации. В этих условиях значение усилия деформирования определится по формуле

$$P = Ls\delta_{cp}k.$$

В этой формуле кроме известных уже обозначений введен коэффициент  $k = 1,1 \div 1,3$ , учитывающий возможные отклонения реальных условий деформирования от тех, при которых было найдено значение  $\delta_{cp}$  (возможность притупления режущих кромок, изменения толщины заготовки, механических свойств материала заготовки).

В некоторых случаях кроме максимального усилия деформирования необходимо определить работу деформирования. Последняя при параллельных режущих кромках и оптимальном зазоре может быть приближенно определена по формуле

$$A = \lambda Ph = \lambda L sh \sigma_{cp} k,$$

где  $\lambda$  — коэффициент полноты диаграммы усилие — путь в разделительных операциях без снятия стружки;  $P$  — максимальное усилие деформирования;  $h$  — высота блестящего пояска;  $L$  — длина линии реза.

Значение коэффициента  $\lambda$  при нормальном зазоре колеблется в сравнительно узких пределах  $\lambda = 0,7 \div 0,8$ . [43]

## 2.2. Деформирование при вырубке и пробивке.

Перемычки. Операции вырубki и пробивки обеспечивают отделение части заготовки по замкнутому контуру в штампе. Рабочими инструментами являются пуансон и матрица. Обычная конструкция пуансона и матрицы характеризуется тем, что их режущие кромки расположены в параллельных плоскостях. При таком расположении режущих кромок процесс разделения заготовки происходит одновременно по всей замкнутой линии раздела. Деформирование заготовки и условия работы инструмента при этом имеют некоторые особенности, которые будут рассмотрены ниже. [38]

Прежде всего необходимо отметить, что при одновременном резании по замкнутому контуру величина нормальных напряжений, действующих на боковые поверхности инструмента, будет при прочих равных условиях несколько меньше, чем при отрезке. [46]

Объясняется это тем, что при деформировании по замкнутому контуру момент, создаваемый усилием деформирования, уравнивается не только моментом, образованным силами, действующими на боковые поверхности инструмента (как при отрезке), но и моментом изгиба отделяемых частей

заготовки. Последний возникает вследствие того, что поворот заготовки вокруг кривой линии неизбежно сопровождается появлением напряжений, препятствующих этому повороту и создающих реактивный момент, который до некоторой степени уравнивает момент внешних сил. Действие реактивных моментов приводит также к тому, что при резании по замкнутому контуру угол поворота заготовки в пространстве значительно меньше угла при отрезке по прямой линии.

При изготовлении деталей небольших и средних размеров вырубка осуществляется из полосы или ленты, причем между контурами двух смежных вырубаемых заготовок, контуром заготовки и краями полосы обычно остается перемычка. С целью экономии металла следует стремиться к сближению контуров смежных заготовок и уменьшению ширины полосы, т. е. уменьшению минимальных значений перемычек, остающихся между контурами заготовок и краями полосы.[47]

Однако уменьшение перемычек сверх определенных пределов может отрицательно сказаться на стойкости инструмента и качестве поверхности среза. Объясняется это тем, что при излишне малых значениях перемычек нормальные напряжения, действующие на боковую поверхность пуансона, будут неравномерно распределены по периметру вырубаемой заготовки.

Ранее было показано, что вблизи поверхности разделения возникает зона пластических деформаций, ширина которой переменна по толщине и в среднем равна  $\sim 0,5s$ .

Давление, оказываемое разрезаемой заготовкой на боковые поверхности режущего инструмента, до некоторой степени определяется сопротивлением деформированию пластически- и упруго- деформированных частей заготовки. Изменение граничных условий в очаге пластических деформаций неизбежно вызовет изменение величин действующих в нем напряжений. Отсюда следует, что если границы заготовки будут приближаться к границам очага пластических деформаций (упругодеформированная зона уменьшается), то в этом очаге будут изменяться напряжения, а следовательно,

будут изменяться и напряжения, действующие на боковых поверхностях инструмента.

Можно полагать, что для того чтобы напряжения, действующие на боковые поверхности заготовки, имели незначительное изменение по Периметр у отделяемой заготовки, необходимо минимальную ширину перемычки принимать больше ширины зоны пластических деформаций. Отсюда следует практическая рекомендация о том, что минимальную ширину перемычки следует принимать примерно равной толщине заготовки.

При ширине перемычек меньшей толщины заготовки возрастает вероятность затягивания металла в зазор между пуансоном и матрицей с образованием торцового заусенца. Для увеличения жесткости высечки (отхода) и уменьшения опасности затягивания металла в зазор при штамповке заготовок толщиной менее 1 мм ширину перемычки рекомендуется принимать большей, чем толщина металла.

Рекомендуемые значения ширины перемычки зависят также от точности и типа подачи полосы. С уменьшением точности подачи ширину перемычки следует увеличивать, чтобы колебания шага подачи не приводили к уменьшению ширины перемычки сверх допустимых минимальных значений. Если же используется крючковая подача, при которой перемещение полосы на шаг подачи осуществляется приложением усилия к перемычке, ширину последней (для обеспечения ее достаточной жесткости) приходится увеличивать в 2—3 раза.[41]

**Способы уменьшения усилия.** При вырубке и пробивке с достаточно большой протяженностью линии реза усилие деформирования становится настолько большим, что вопрос о его уменьшении приобретает особую актуальность. Как и при отрезке, уменьшения усилия деформирования можно добиться применением скосов на пуансоне или матрице.

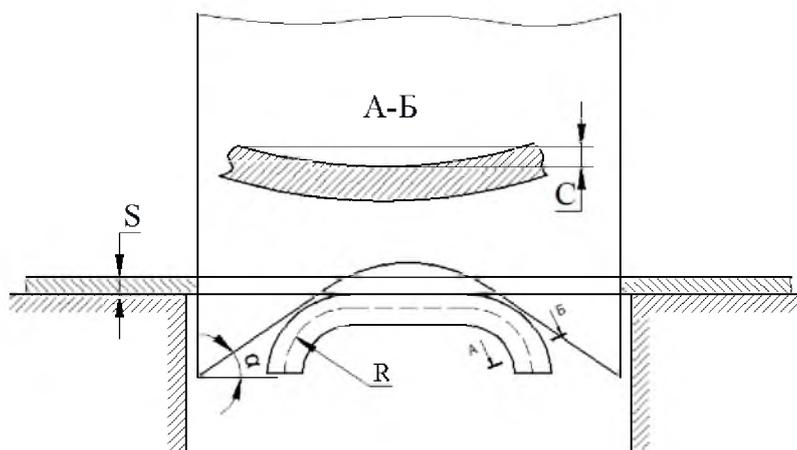
Возможность применения симметричных скосов, при которых горизонтальные проекции усилий резания, действующих на наклонно расположенных рабочих кромках инструмента, взаимно уравниваются,

позволяет немного увеличить углы скоса по сравнению с углами, используемыми при отрезке.

Применение симметричных скосов благоприятно сказывается на условиях работы инструмента из-за отсутствия боковых усилий, действующих на инструмент, а также на качестве штампуемых деталей благодаря большей возможности поддерживать постоянный по периметру кромок зазор между пуансоном и матрицей. [60]

Применение скосов неизбежно вызывает появление деформации изгиба в той части заготовки, которая контактирует с инструментом, имеющим скосы. Для того чтобы нарушения плоскостности при резании наклонными режущими кромками возникали в отходе, следует при вырубке делать скосы на матрице (уходящая в матрицу часть заготовки опирается на плоский торец пуансона), а при пробивке — на пуансоне (деталь, в которой пробивается отверстие, опирается на плоский рабочий торец матрицы, а уходящая в матрицу часть заготовки, являющаяся отходом, получает искажения вследствие резания наклонными режущими кромками пуансона).

Исключением из этого правила является процесс штамповки деталей типа втулок или хомутиков, в котором гибка совмещается с вырубкой. В этом случае скосы на пуансоне обеспечивают не только уменьшение усилия резания, но и заданное изменение кривизны срединной поверхности части заготовки, уходящей в матрицу (рис. 2.2.1).



### Рис.2.2.1. Схема вырубki с гибкой.

Процесс деформирования заготовки, отделяемой пуансоном со значительными углами скоса, весьма сложен. Отделяемая часть заготовки испытывает воздействие моментов, расположенных в плоскости, перпендикулярной к линии реза, благодаря наличию зазора между режущими кромками и тому, что нормальные напряжения на контактных поверхностях распределены по некоторой площади, граничащей с режущими кромками. Под действием этих моментов заготовка получает поперечный прогиб (нарушение прямолинейности образующей).

Кроме того, при значительных углах скоса неизбежно должен появиться участок вне контактного изгиба, который и приводит к изменению кривизны срединной поверхности отделяемой части заготовки. Действительно, в процессе вырубki пуансоном с наклонными режущими кромками срединная поверхность должна повернуться на угол  $\alpha$  — наклона режущей кромки (в недеформированной части срединная поверхность параллельна кромке матрицы, в конце зоны резания касательная к срединной поверхности параллельна режущей кромке пуансона). Этот поворот срединной поверхности не может в силу сплошности заготовки произойти в одной точке, следовательно, появляется зона с плавным изменением кривизны срединной поверхности.[45]

Задача по определению изменения кривизны срединной поверхности в зоне резания наклонными режущими кромками весьма сложна и пока не имеет решения.

Приближенно радиус кривизны срединной поверхности при резании наклонными режущими кромками может быть определен при следующих допущениях: кривизна срединной поверхности в зоне изгиба постоянна; участок свободного изгиба ограничен с одной стороны границей очага деформации в зоне резания и с другой стороны точкой сопряжения дуги постоянного радиуса срединной поверхности со срединной поверхностью

недеформируемой части заготовки. При этих условиях можно записать следующее:

$$h = R(1 - \cos\alpha)$$

где  $h$  - высота блестящего пояска, возникающего в зоне резания (внедрение режущей кромки, соответствующее разделению заготовки);  $R$  - средний радиус кривизны срединной поверхности;  $\alpha$  - угол наклона режущей кромки.

Формула (63) может быть преобразована к виду

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \sqrt{\frac{h}{2R}}$$

В МВТУ им. Баумана И. И. Казакевичем была проведена работа по исследованию вырубке пуансонами со значительными углами скоса. На основании проведенных работ И. И. Казакевичем была предложена следующая формула:

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \sqrt{\frac{h_\alpha + c}{2R}}$$

где  $h_\alpha = h (s - h) \sin a$  — глубина внедрения режущей кромки до появления трещин при угле  $\alpha$ ;  $c$  — величина поперечного прогиба.

#### Значения прогиба $c$ , мм

Материал	s, мм	$\alpha, ^\circ$				
		20	25	28	31	35
Сталь	1,5	1,0	0,90	0,77	0,70	0,65
Сталь	3	1,1	1,20	1,30	1,30	1,10
Медь	1	1,0	0,77	0,68	0,62	0,60
Медь	3	1,15	1,25	1,32	1,32	1,20

Выражение, для определения  $h_\alpha$  было найдено после обработки экспериментальных данных. Опыты проводились с мягкой сталью, медью и алюминием при ширине вырубаемой заготовки 30—60 мм при  $\alpha = \text{var}$ . Найденные в опытах значения прогиба  $s$  приведены в таблице.

Другим встречающимся в практике способом уменьшения усилия деформирования, применимым при одновременной пробивке нескольких отверстий или вырубке нескольких деталей, является расположение режущих кромок па разных уровнях. Последнее проще всего достигнуть изготовлением пуансонов разной длины. Так как максимум усилия соответствует внедрению режущей кромки примерно на высоту блестящего пояска, то для существенного уменьшения усилия достаточно, чтобы разница в уровнях режущих кромок составляла примерно  $0,5s$  [на практике берут  $(0,5—1,0) s$ ].

Заметим, что расположение режущих кромок на разных уровнях применяют и в том случае, когда в плане контуры режущих кромок расположены на небольшом расстоянии друг от друга. При близком расположении контуров одновременная пробивка (вследствие возникновения зоны пластической деформации вблизи поверхности раздела) может вызвать появление боковых усилий, действующих на пуансоны, что способствует уменьшению их стойкости, особенно при малых диаметрах пуансонов. Если соседние пуансоны имеют разный диаметр, то рекомендуется изготавливать более коротким тот пуансон, который имеет меньший диаметр.[42]

**Минимальные размеры отверстий.** Из практики известно, что стойкость пуансонов существенно снижается с уменьшением их диаметра.

Объясняется это увеличением осевых сжимающих напряжений, возникающих в пуансонах при вырубке и пробивке, а также уменьшением сопротивления продольному изгибу. Средние по сечению осевые сжимающие напряжения  $\sigma_{сж}$ , возникающие пуансоне при вырубке или пробивке, могут быть найдены (для цилиндрических пуансонов) из равенства

$$\sigma_{сж} \frac{\pi d^2}{4} = \pi ds \sigma_{ср}.$$

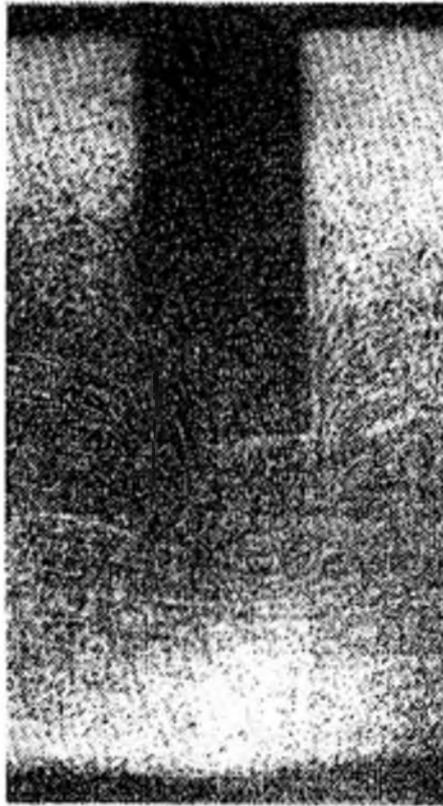
Из этого равенства получаем формулу

$$\sigma_{сж} = \sigma_{ср} \frac{4s}{d},$$

Из формулы (66) следует, что сжимающие напряжения, возникающие в пуансоне, с уменьшением его диаметра возрастают в гиперболической зависимости. Соответственно возрастает и влияние продольного изгиба. Это приводит к тому, что при обычных способах крепления пуансонов минимальный диаметр отверстий, которые удается пробить, с достаточной стойкостью пуансонов, равен примерно толщине заготовки и изменяется в незначительных пределах в зависимости от прочностных характеристик штампуемого материала.

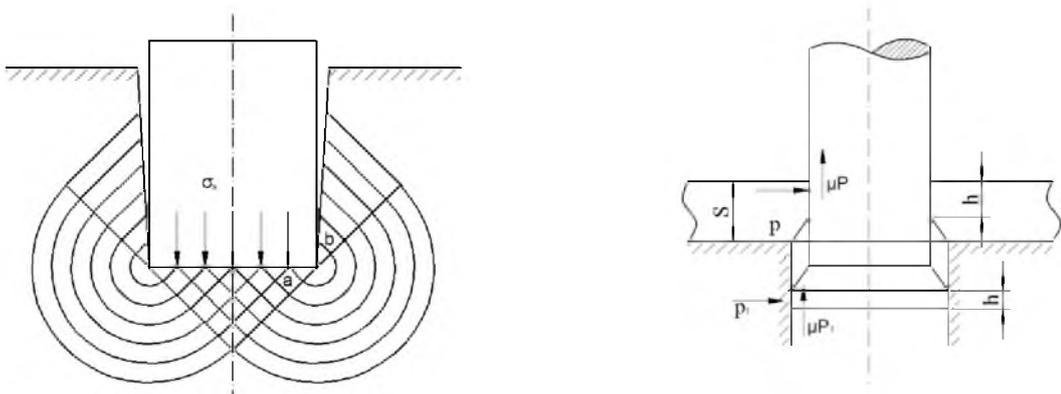
Известно также [50], что при исключении возможности продольного изгиба пуансонов (применение телескопического направления) удается пробивать отверстия диаметром, равным  $(1/3 - 1/4) s$ .

На **рис. 2.2.2** показан макрошлиф в осевом сечении заготовки при внедрении пуансона с телескопическим направлением на глубину, превышающую половину толщины заготовки. Представляет интерес и то обстоятельство, что полученное при этом отверстие имеет гладкую поверхность на большей части толщины заготовки. Это объясняется тем, что в начальной стадии деформирования идет как бы прошивка с вытеснением металла из-под торна пуансона, и лишь в конце деформирования, когда толщина перемычки становится несколько меньше диаметра пробиваемого отверстия, процесс деформирования становится аналогичным процессу, рассмотренному ранее, т. е. от режущих кромок образуются трещины, поверхность же раздела становится рваной, шероховатой. [63]



**Рис.2.2.2. Макрошлиф заготовки при пробивке отверстий малого диаметра.**

Смещение одной части заготовки относительно другой, начинающееся при таком внедрении пуансона, когда остающаяся несрезанная часть будет иметь толщину, примерно равную диаметру отверстия, можно подтвердить следующим приближенным расчетом. Если принять [27], что в зоне пластической деформации характеристики выглядят так, как это представлено на [рис. 2.2.3](#), то угол поворота характеристик будет равен  $\pi$ . Для случая, когда трение под торцом пуансона отсутствует, можно получить из интеграла Генки  $\sigma_a - \sigma_b = \sigma_s \alpha_{ab}$ , значение  $\sigma_n \approx 4\sigma_s$ .



**Рис.2.2.3. Линии скольжения при пробивке отверстий малого диаметра**

**Рис.2.2.4. Схема к определению усилий съема и проталкивания.**

Приравняв усилие со стороны торца пуансона усилию пробивки перемычки, получим

$$\frac{\pi d^2}{4} 4\sigma_s \approx \pi d h_1 \sigma_s,$$

откуда находим, что  $h_1 \approx d$ , т.е. сдвиг начнется, когда толщина перемычки уменьшится до значения, приблизительно равного диаметру пуансона.

**Усилие съема и усилие проталкивания.** В отдельных случаях при проектировании технологических процессов вырубки и пробивки требуется оценить величину усилия проталкивания отделенной заготовки в матрицу и усилие съема высебки с пуансона. Это, в частности, нужно для более точного определения работы деформации, для расчета прочности крепления пуансона и т. д. Приближенное некоторым преувеличением усилие съема и усилие проталкивания могут быть определены исходя из следующего.

1. Контакт пуансона с высежкой и отделяемой части заготовки с матрицей осуществляется по блестящему пояску, а участок с шероховатой поверхностью (разрушение по трещинам скалывания) не имеет контакта с боковыми поверхностями инструмента.

2. Максимальные значения нормальных напряжений  $p$  и  $p_2$ , действующих на контактной поверхности, могут быть равны пределу текучести  $a$ , материала заготовки.

В этих условиях (рис. 2.2.4) наибольшее усилие съема может быть определено из выражения

$$P_c = Lh\mu\sigma_s,$$

где  $L$  - длина периметра вырубаемой детали или пробиваемого отверстия;  
 $h$  - высота блестящего пояска;  $\mu$  - коэффициент трения.

Если принять для обычно штампуемых материалов  $h = 0,3s$ ,  $\mu = 0,2$ , а  $\sigma_{cp} \approx \sigma_s$ , то

$$P_c \approx L \cdot 0,3s \cdot 0,2\sigma_{cp} = 0,06Ls\sigma_{cp} = 0,06P,$$

т. е. усилие съема в данном случае составляет 6% усилия вырубки. Усилие съема и усилие проталкивания обычно выражают в долях или в процентах от усилия вырубки (пробивки).[65]

Формула для определения усилия съема является весьма приближенной, поэтому нельзя считать, что найденное осредненное соотношение между усилием съема и усилием вырубки справедливо для всех случаев штамповки. Действительно, величина коэффициента трения существенно зависит от условий смазки, рода трущихся материалов и чистоты поверхности инструмента, а нормальное напряжение на блестящем пояске при съеме - от величины перемычек при вырубке и от конфигурации детали. При штамповке с рассечкой перемычки усилие съема близко к нулю, при штамповке с перемычками оно возрастает с увеличением ширины перемычки. Кроме того, усилие съема зависит от характера изменения перемычки вдоль периметра детали (усилие меньше при прямолинейной перемычке постоянной ширины, чем при перемычке, ограниченной криволинейными контурами и имеющей минимальную ширину лишь в одной или нескольких точках).

При проталкивании силы трения действуют по блестящему пояску в высечке и по блестящему пояску в отделенной части (рис. 2.2.4). Поэтому можно было бы считать, что усилие проталкивания должно быть вдвое больше усилия съема. Однако результаты экспериментальных работ и практические данные показывают, что усилие проталкивания обычно незначительно больше усилия съема. Это можно объяснить тем, что при штамповке поперечные размеры отделяемой части обычно значительно больше ее толщины, и нормальные напряжения, действующие на поiske матрицы, уменьшаются за счет прогиба заготовки. В то же время при съеме небольшие перекосы отхода относительно пуансона резко увеличивают

контактную поверхность и нормальные напряжения, действующие на поверхности пуансона, что способствует увеличению усилия съема. Усилия съема и проталкивания зависят еще и от величины зазора между пуансоном и матрицей. Действительно, было показано [22], что величина зазора влияет на величину и характер упругого изменения размеров детали и отверстия, а следовательно, и на величину нормальных напряжений, возникающих на контактных поверхностях, определяющих величину усилий съема и проталкивания.

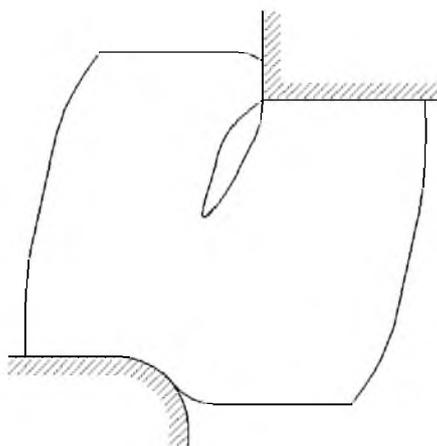
**Повышение качества поверхности среза.** В плоских деталях, получаемых из листового металла, часто требуется хорошая чистота боковой поверхности и повышенная точность поперечных размеров. Указанное может быть достигнуто увеличением высоты блестящего пояска до толщины заготовки или применением отделочных операций после вырубке, которые улучшают качество поверхности среза и обеспечивают перпендикулярность боковой поверхности к плоскостям вырубленной детали.

Увеличение высоты блестящего пояска может быть осуществлено в случае, если трещины опережающего разрушения возникнут при большей, чем в обычных условиях, глубине внедрения режущих кромок.

Увеличение глубины внедрения режущих кромок до начала образования трещин может быть достигнуто или уменьшением деформаций вблизи режущей кромки, или увеличением пластичности металла. И то и другое используется в листовой штамповке для улучшения качества поверхности среза. Первое осуществляется уменьшением концентрации напряжений и неравномерности деформаций за счет притупления одной из режущих кромок. Притупляется кромка рабочего инструмента, образующего у детали на поверхности среза блестящий поясок, высоту которого желательно увеличить (пуансона при пробивке или матрицы при вырубке). Притупление кромки уменьшает концентрацию напряжений вблизи нее и значение наибольших деформаций, возникающих около режущей кромки, что

приводит к образованию трещины при несколько большей глубине внедрения, чем при острой режущей кромке.

Отсюда следует, что трещина в этом случае зарождается у острой режущей кромки и, пронизывая толщину заготовки, выходит на притуплённую режущую кромку. Образующийся при этом избыток металла (рис. 2.2.5) наволакивается на боковую поверхность при дальнейшем продвижении инструмента и тем самым увеличивает высоту блестящего пояска.



**Рис. 2.2.5** Схема образования трещины при вырубке в матрице со скругленной кромкой.

Следует еще раз подчеркнуть, что притупляется только одна из режущих кромок; вторая должна оставаться острой во избежание образования торцового заусенца у деталей.

Второе направление, связанное с увеличением пластичности, при холодной листовой штамповке (без нагрева) — это уменьшение влияния растягивающих напряжений на процесс деформирования, или (что то же самое) увеличение шарового тензора сжатия, действующего в очаге деформации.

В настоящее время есть два способа существенного уменьшения влияния растягивающих напряжений: вырубка с отрицательным зазором и вырубка со сжатием.

Вырубка с отрицательным зазором, или, как ее еще называют, «вырубка пуансоном полнее матрицы», характеризуется тем, что часть заготовки вблизи поверхности раздела заключена между торцами пуансона и матрицы и деформируется под действием нормальных напряжений сжатия, приложенных по обеим поверхностям заготовки и противостоящих друг другу. Эта часть заготовки по существу находится в условиях сжатия или осадки между параллельными плоскостями. Деформация сжатия в направлении, перпендикулярном к срединной поверхности заготовки, вызывает появление деформаций удлинения в направлениях, параллельных срединной поверхности заготовки.

Чем больше величина перекрытия торцом пуансона отверстия матрицы или чем больше ширина осаживаемой части заготовки, тем (при той же величине осадки) больше удлинение волокон, находящихся в этой части заготовки, и поперечном направлении. Можно полагать, что если удлинение волокон в зоне сжатия будет превышать удлинение, испытываемое волокнами при обычных условиях вырубки или пробивки, то в очаге деформации по всей толщине заготовки схема напряженного состояния будет схемой неравномерного всестороннего сжатия.

На основании сказанного можно попытаться весьма приближенно оцепить величину перекрытия, необходимого для получения схемы всестороннего сжатия по всей толщине заготовки.

Если ширину осаживаемой зоны обозначить через  $\alpha$  (рис. 25), то из условия постоянства объема (деформация вдоль режущей кромки равна нулю) можно записать выражение, определяющее абсолютное удлинение волокон  $\Delta\alpha$  в зоне сжатия:

$$\Delta\alpha = \frac{\alpha x}{s - x},$$

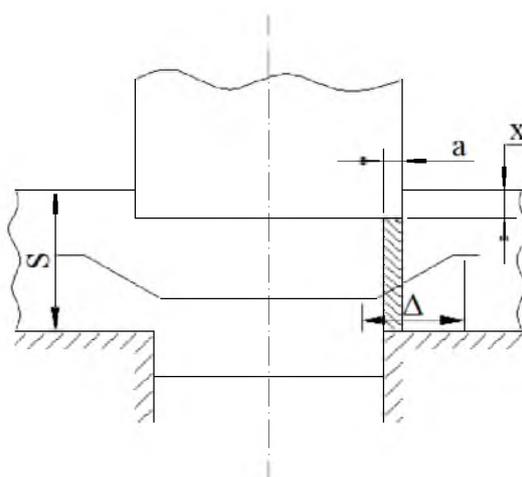
где  $x$  — глубина внедрения пуансона в заготовку

Среднее абсолютное удлинение волокон в обычном процессе вырубке можно весьма приближенно определить из выражения, полученного при допущении о прямолинейности волокон в очаге деформации:

$$\Delta l = \sqrt{\Delta^2 + x^2} - \Delta \approx \frac{x^2}{2\Delta},$$

где  $\Delta$  – ширина очага деформации при вырубке.

Заметим, что в действительности волокна получают форму, близкую к синусоиде, и, следовательно, выражение (68) дает преуменьшенную (заниженную) величину удлинения.



**Рис.2.2.6** Схема вырубке пуансоном “полнее” матрицы

Из условия равенства  $\Delta a = \Delta l$  после некоторых преобразований получаем выражение, позволяющее приближенно определить величину перекрытия, обеспечивающего переход схемы напряженного состояния в очаге деформации при вырубке в схему трехосного сжатия:

$$a = \frac{x(s - x)}{2\Delta},$$

Наибольшая величина перекрытия будет необходима, как это следует из формулы (69), при  $x = s/2$ :

$$a_{max} \approx \frac{s^2}{8\Delta}.$$

Если принять приближенно, что  $\Delta = s$ , то величина перекрытия необходимого для получения схемы всестороннего сжатия, будет приблизительно равна  $a_{max} \approx 0,12s$ . Примерно такие же значения перекрытия для чистовой вырубке рекомендуются в работе [61].

Отсутствие растягивающих напряжений в очаге, деформации при вырубке с отрицательным зазором резко повышает пластичность материала и позволяет, как показывает практика, получать гладкую блестящую боковую поверхность у вырубленной детали практически по всей толщине заготовки.

Изменение схемы напряженного состояния, естественно, сказывается на усилии деформирования, которое при вырубке с отрицательным зазором в 2—2,5 раза больше, чем при вырубке с нормальными зазорами. Заметим, что усилие интенсивно возрастает с увеличением ширины осаживаемой зоны. Одновременно с увеличением усилия возрастают и сжимающие напряжения, действующие вдоль срединной поверхности заготовки, что может привести к увеличению искажений вырубленной детали.

Все это делает нерациональным увеличение ширины осаживаемой зоны сверх минимальных значений, необходимых для получения достаточно чистой боковой поверхности.

Естественно, что при вырубке с отрицательным зазором пуансон не может проходить в отверстие матрицы, и торец пуансона в процессе вырубке не должен доходить до торца матрицы на некоторую величину. Чем меньше расстояние (неход), на которое торец пуансона не дойдет до торца матрицы (конечное значение высоты осаживаемой части заготовки), тем больше усилие деформирования (аналогично тому, как это бывает при обычной осадке); по одновременно чем меньше указанная величина нехода, тем больше высота гладкой блестящей поверхности.

Эти соображения принимаются во внимание при определении рациональной величины нехода  $h_n$ . При этом следует учитывать также возможность отделения вырубленной детали от полосы. Отделение вырубленной детали от полосы может быть осуществлено, если усилие съема

будет больше усилия среза перемычки, связывающей деталь с полосой и имеющей толщину  $h_n$ . Действительно, при обратном ходе ползуна высечка (полоса), удерживаемая на пуансоне, начинает подниматься, в то время как вырубленная деталь будет удерживаться в матрице силами трения. Указанное условие может быть математически записано (для круглой детали диаметром  $d$ ) в виде

$$\mu\sigma_n\pi d(s - h_n) \geq \sigma_{ср}\pi dh_n,$$

где  $\mu$  — коэффициент трения;  $s$  - толщина заготовки;  $\sigma_n$  - нормальное напряжение, действующее на боковой поверхности пуансона;  $h_n$  — величина недохода (толщина перемычки);  $\sigma_{ср}$  - сопротивление срезу.

После несложных преобразований получаем формулу, определяющую величину недохода, которая обеспечивает разрушение перемычки, связывающей деталь с полосой:

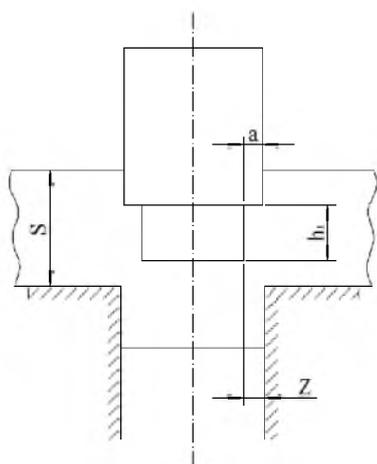
$$h_n \leq \frac{\mu\sigma_n s}{\sigma_{ср} + \mu\sigma_n}.$$

Если принять, что  $\sigma_n \approx \sigma_s$ ,  $\sigma_{ср} \approx \sigma_s$ , и  $\mu = 0,15$ , то из формулы получим, что  $h_n \leq 0,1s$ . В реальных условиях величина недохода пуансона до матрицы должна быть примерно равна  $0,1 - 0,2s$ , и, следовательно, такой же будет высота шероховатой поверхности у вырубленной детали.

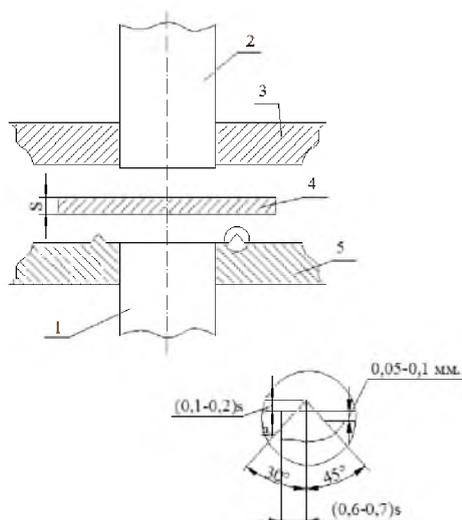
Разновидностью вырубки с отрицательным зазором является вырубка ступенчатым пуансоном (рис. 2.2.7), у которого диаметр цилиндрической части у торца несколько меньше диаметра отверстия матрицы. Половина разницы диаметров ступеней примерно равна определенному ранее отрицательному зазору  $a$ . Высота  $h_1$  цилиндрической части меньшего диаметра несколько меньше высоты блестящего пояса при обычной вырубке. В этих условиях вначале внедряется торцовая часть пуансона, как при обычной вырубке, но чуть раньше чем может появиться трещина, вступает в действие ступенька на пуансоне, которая сжимает заготовку так же, как при вырубке с отрицательным зазором, исключая возможность

появления трещины. В конце деформирования торцовая часть пуансона заходит в отверстие матрицы, окончательно отделяя вырубаемую часть от полосы [62].

Рассмотрим теперь вырубку со сжатием [66].



**Рис.2.2.7. Схема вырубki ступенчатым пуансоном.**



**Рис.2.2.8. Схема вырубki со сжатием:**

**1-пуансон; 2- выталкиватель; 3 – матрица; 4 – заготовка; 5- сьемник**

На **рис. 2.2.8** приведена схема штампа для вырубki со сжатием. Как видно из схемы, в этом штампе обеспечивается зажатие заготовки в зоне очага деформации по обеим поверхностям — между торцом матрицы и прижимом и между торцом пуансона и выталкивателем. Зажатие заготовки исключает ее изгиб в процессе вырубki, что способствует уменьшению угла наклона трещин опережающего разрушения к боковой поверхности пуансона. Следовательно, поверхность раздела становится почти перпендикулярной к плоскости заготовки. Уменьшение изгибающих моментов и воздействие сжимающих напряжений, приложенных к тем поверхностям, которые являются свободными в обычных условиях вырубki, приводит к увеличению сжимающих напряжений, действующих в направлении, перпендикулярном к срединной поверхности. Если эти напряжения будут больше напряжения текучести, то по условию

пластичности напряжения, действующие вдоль срединной поверхности, также станут сжимающими. Это приводит к увеличению пластичности, а следовательно, к увеличению высоты блестящего пояска и к более позднему образованию трещин опережающего разрушения.

Отметим, что, по имеющимся данным [66], усилие вырубки со сжатием примерно в 1,5 - 2 раза больше, чем усилие деформирования при обычной вырубке.

Для большей локализации сжимающих напряжений вблизи поверхности раздела рабочий торец прижима делают ступенчатым; для локализации очага пластических деформаций и уменьшения смещения заготовки в процессе вырубки па прижиме предусматривают зуб, врезающийся в заготовку и препятствующий течению металла от поверхности раздела.

### 2.3 Выводы

1. Экспериментально установлено, что очаг деформации состоит из четырех характерных зон. Границы очага деформации, распространение отдельных его зон в теле заготовки, степень упрочнения металла в этих зонах и величины основных параметров их зависят от величины зазора. С увеличением зазора ( $Z = 10-30\%$ ), интенсивность напряжений и деформаций в отдельных зонах очага деформации изменяется неоднозначно, минимальные значения имеют место при 15%-ном зазоре. При грамотном выборе величины и места очага деформации можно сэкономить около 1.2% металла от общего объема, сохранив прочность, изготавливаемой продукции.
2. Установлено, что при пробивке-вырубке сталей толщиной  $S = 0.5$  мм заготовка со стороны пуансона и матрицы находится одинаковом напряженно-деформированном состоянии. Наибольшая интенсивность напряжений и деформаций наблюдается около вершин режущих кромок пуансона и матрицы.
3. Установлены закономерности распределения интенсивности напряжений и деформаций по контактным поясам пуансона и матрицы, при различной величине технологического зазора.
4. Технико-экономическое обоснование, выполненное по результатам внедрения научно-обоснованных технологических условий повышения стойкости разделительных штампов, предназначенных для штамповки листов из высоколегированной стали в условиях массового производства, подтверждает эффективность выполненного исследования.

## **Глава-3. Технологическая часть.**

### **3.1. Исследование технологических факторов.**

Анализ литературных источников показывает, что при деформировании с использованием энергии ультразвука в очаге деформации возникает температура, величина которой может достигать 600 С, а по техническим требованиям на изготовление плат печатного монтажа не допускаются прижоги поверхности монтажных отверстий. В связи с этим возникает необходимость оценить температуру, возникающую при пробивке относительно малых отверстий в слоистых пластиках. [63]

Нагрев заготовок перед пробивкой несколько повышает пластичность слоистых пластмасс, вследствие наличия в материале остатков неполимеризовавшейся смолы и термопластичных примесей. Однако нагревание всего образца способствует увеличению зоны деформирования, что отрицательно сказывается на качестве поверхности среза. Узкий температурный интервал штамповки пластмасс приводит к получению некачественных отверстий, потому что превышение температурного интервала приводит после охлаждения к значительному короблению листовой заготовки, а при меньших температурах теряется эффект нагрева. Кроме этого, подогрев листовых слоистых пластиков приводит к повышению прочности и росту хрупкости связующего при повторном нагреве перед штамповкой, потому что в материале происходят процессы поликонденсации, устраняющие остатки непролимеризовавшейся смолы. [64]

В ряде случаев применение нагрева при штамповке плат печатного монтажа, подложка которых изготовлена из гетинакса, позволяет получить удовлетворительное качество монтажных отверстий, но для металлизации они, как правило, не пригодны. В платах, изготовленных из

стеклотекстолита, использование нагрева перед пробивкой не позволяет получить необходимое качество поверхности среза отверстий методом штамповки.

При пробивке группы малых отверстий с использованием энергии ультразвука в слоистых пластиках ( $a_x \geq 2 \times 10^{-5}$  м) и при скоростях движения инструмента ( $v_{ин} \leq 0,3 \times 10^{-3}$  м) на поверхности раздела отверстий наблюдаются сильные прижоги, обугливание смолы и вспучивание поверхностных слоев материала. Большая энергия ультразвука вызывает размягчение смолы, а в некоторых случаях разложение связующего, в результате чего начинают выделяться газообразные составляющие смолы. Все это приводит печатные платы к браку.

Для определения влияния различных технологических факторов на величину температуры сопутствующей ультразвуковым колебаниям в зоне деформирования были проделаны дополнительные эксперименты на стеклотекстолите марки СФ-1-35-1,5.

Анализ результатов эксперимента показывает, что температура возрастает по мере внедрения пуансона в материал образца и достигает максимального значения при прохождении пуансоном всей толщины заготовки. Наибольшей величины температура достигает в конце процесса пробивки, когда амплитуда восстанавливается до исходного значения. Эта тенденция имеет место при больших амплитудах ультразвуковых колебаний, как для замкнутой (рис 3.1), так и разомкнутой (рис 3.1) колебательных систем.

Температура в зоне деформирования возрастает с увеличением амплитуды колебаний волновода как для стержневого штампа (рис 3.2) так для и плоского штампа (рис 3.2). С повышением амплитуды возрастает энергия, подводимая в зону разделения образца. Увеличение энергии

ультразвука при одной и той же скорости перемещения инструмента способствует повышению температуры в очаге деформирования.

Следует отметить тот факт, что температура, сопутствующая ультразвуковым колебаниям, зависит от вида колебательной системы (рис 3.3). В связи с тем, что в разомкнутой колебательной системе потери энергии ультразвука больше, чем в замкнутой, то температура в зоне деформирования на плоском штампе несколько выше, чем на стержневом. Отсюда можно сделать вывод о том, что потери энергии механических ультразвуковых колебаний, превращаясь в тепло, способствуют нагреву деформируемого материала и инструмента.

С увеличением скорости движения инструмента наблюдается уменьшение температуры в зоне деформирования, что характерно для обоих штампов (рис.3.3). Объясняется это тем, что с возрастанием скорости перемещения инструмента уменьшается время процесса пробивки, в результате чего убывает время воздействия ультразвуковых колебаний на материал заготовки в очаге деформации. Данная зависимость справедлива для всех значений амплитуд инструмента в исследуемом диапазоне.

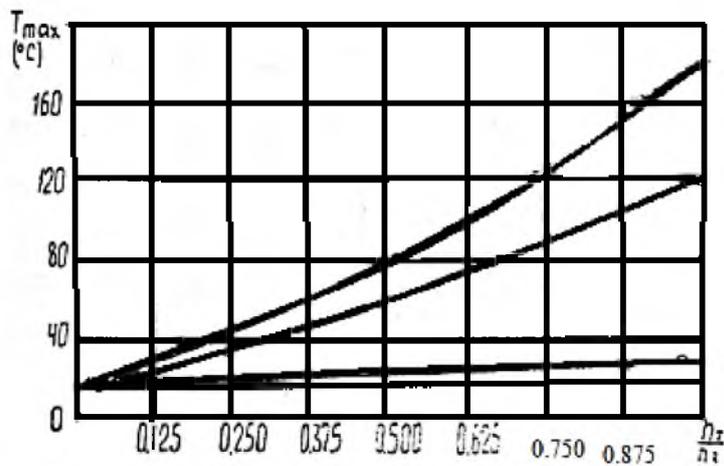
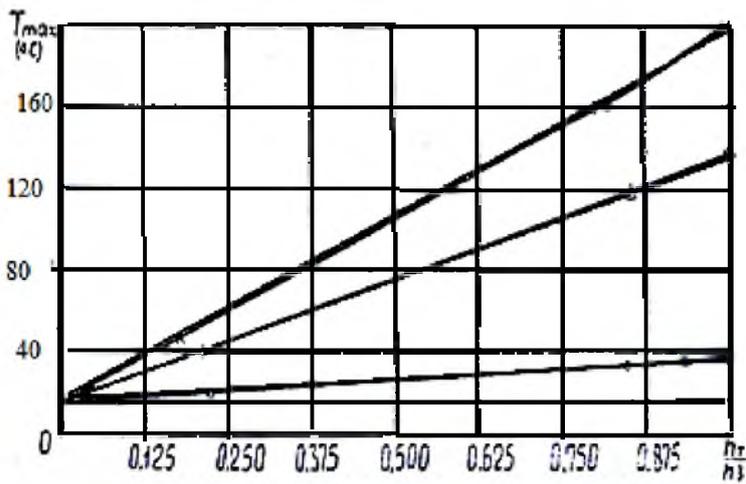


Рис 3.1. Зависимость изменения температуры в зоне деформирования от относительного погружения пуансона в материал заготовки при штамповке

1. На стержневом штампе
2. На плоском штампе

○ исходная амплитуда колебаний инструмента ( $a_x = 10^{-5} \text{ м}$ );

△ то же, ( $a_x = 10^{-5} \text{ м}$ );

\* то же, ( $a_x = 10^{-5} \text{ м}$ ).

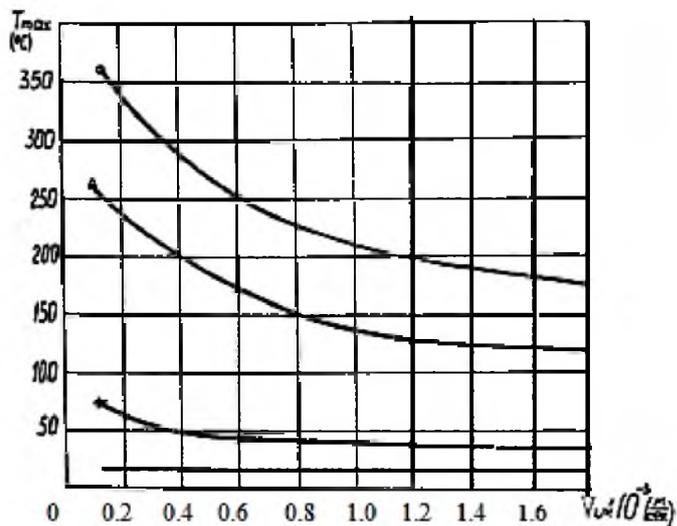
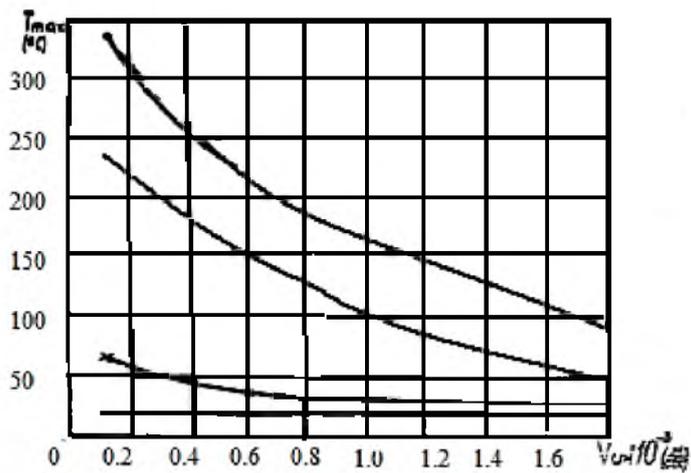


Рис.3.2 Зависимость температуры в зоне разделения от скорости деформирования при пробивке:

1. На стержневом штампе
2. На плоском штампе

— комнатная температура

\*исходная амплитуда колебаний инструмента ( $a_x = 10^{-5}$  м);

$\Delta$  то же, ( $a_x = 10^{-5}$  м);

$\ominus$  то же, ( $a_x = 10^{-5}$  м).

При повышении давления прижима заготовки наблюдается уменьшение температуры в зоне разделения. Тенденция снижения

характерна как для стержневого (рис.3.4), так для и плоского (рис.3.4) штампов, что объясняется более лучшим контактом поверхности заготовки с прижимом штампа, в результате чего улучшается теплопередача от образца к деталям штампа. [67]

Температура, сопутствующая ультразвуковым колебаниям, в очаге деформирования снижается при уменьшении величины зазора между режущими кромками инструмента, что характерно для стержневого (рис) и для плоского (рис) штампов. Это явление объясняется тем, что с уменьшением зазора кромки матрицы, приближаясь к очагу деформации, увеличивают кольцевую площадку на матрице, по которой часть тепла отводится из зоны деформирования.

Наличие медного покрытия на поверхности пластмассы способствует уменьшению температуры (рис) при удалении от зоны деформирования практически с постоянным градиентом, что определяется теплопроводностью медной фольги.

При отсутствии медной фольги на поверхности диэлектрика при пробивке малых отверстий с ультразвуком (рис) наблюдается уменьшение температуры при удалении от зоны разделения с более резким градиентом. Данная зависимость объясняется малой теплопроводностью пластмасс. При пробивке отверстий в слоистых пластмассах без фольги в зоне разделения наблюдается повышенная температура, по сравнению с заготовкой имеющей фольгу. Отсюда следует вывод о локализации температуры в очаге деформации при отсутствии медной фольги. [69]

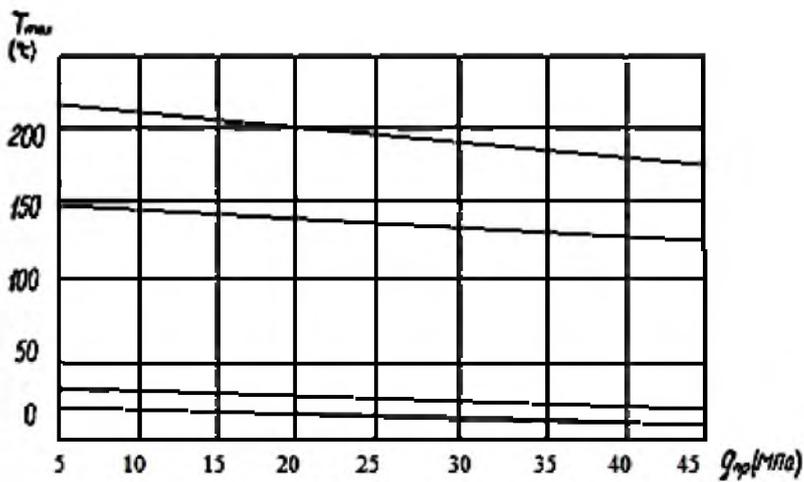
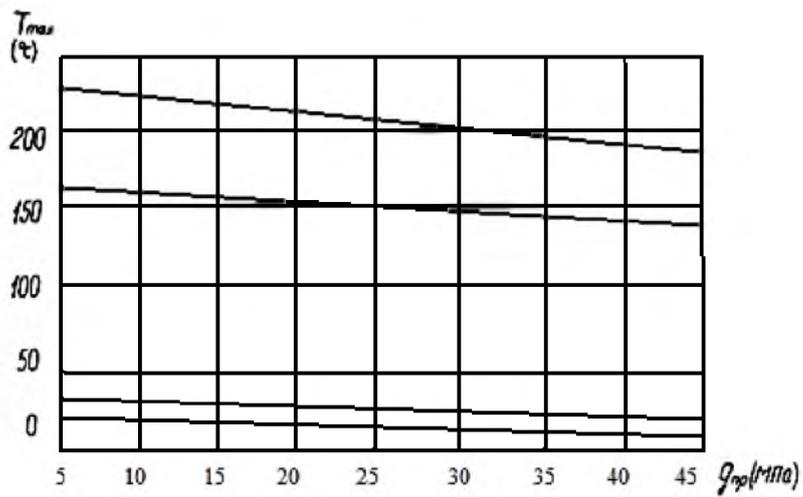


Рис.3.3 Зависимость изменения температуры в очаге деформирования от давления прижима заготовки при штамповке:

1. На стержневом штампе;
2. На плоском штампе;

– Комнатная температура

\* исходная амплитуда колебаний инструмента ( $a_x = 10^{-5}$ м);

$\Delta$  то же, ( $a_x = 10^{-5}$ м);

$\ominus$  то же, ( $a_x = 10^{-5}$ м).

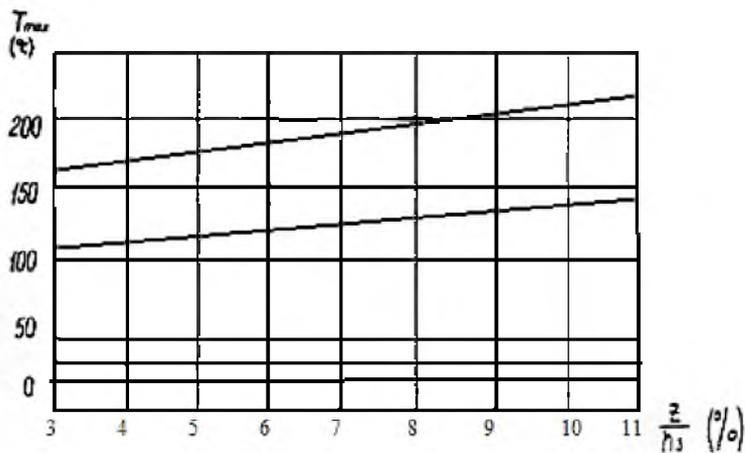
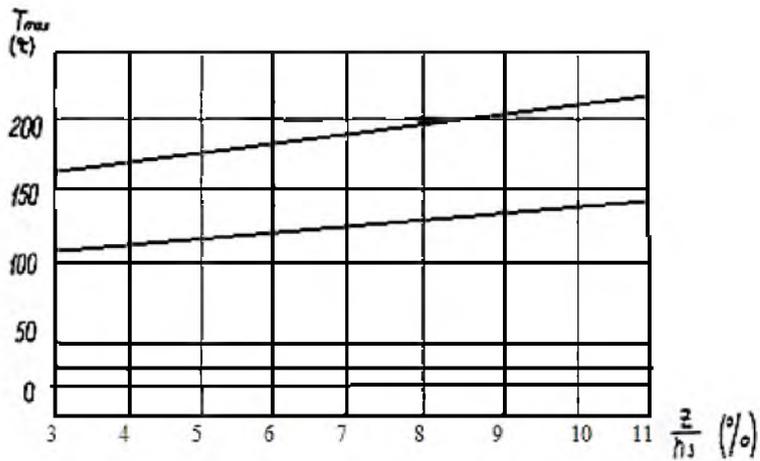


Рис.3.4. Влияние относительного зазора на температуру в зоне деформирования при штамповке :

1. На стержневом штампе ;
2. На плоском штампе;
3. – Комнатная температура;

– Комнатная температура

\* исходная амплитуда колебаний инструмента ( $a_x = 10^{-5} \text{ м}$ );

$\Delta$  то же , ( $a_x = 10^{-5} \text{ м}$ );

$\ominus$  то же , ( $a_x = 10^{-5} \text{ м}$ ).

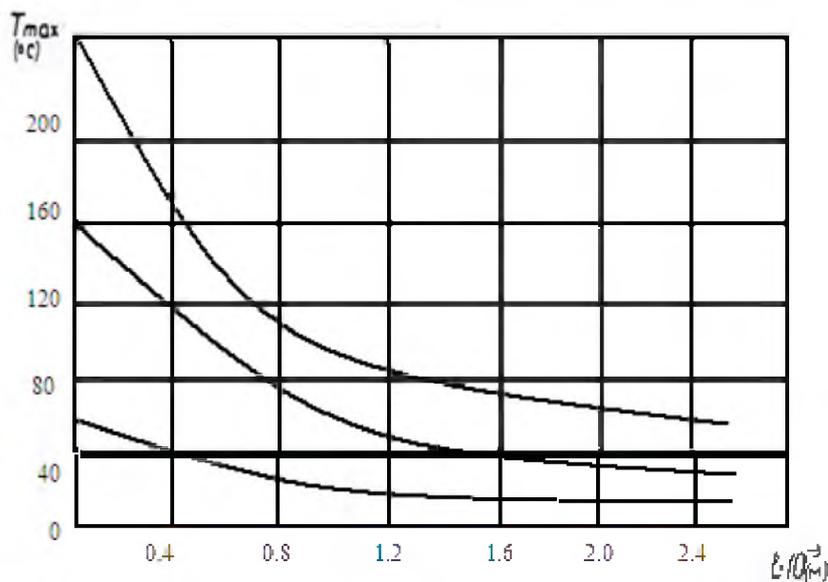
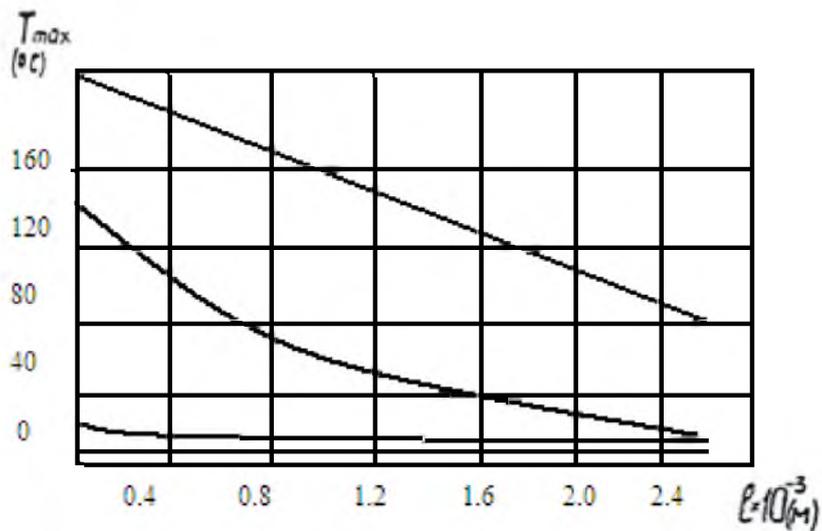


Рис.3.5 Снижение температуры в зависимости от расстояния до зоны разделения на поверхности заготовки с фольгой при пробивке на стержневом штампе.

– Комнатная температура

\* исходная амплитуда колебаний инструмента ( $a_x = 10^{-5}$  м);

$\Delta$  то же , ( $a_x = 10^{-5}$  м);

$\ominus$  то же , ( $a_x = 10^{-5}$  м).

При перфорировании реальных плат медное покрытие печатного монтажа не сплошное в отличие от экспериментальных заготовок, а имеет определенный рисунок узких полосок – проводников, имеющих площадь в сотни или даже тысячи раз меньше площади платы.

А это значит, что при пробивке реальных плат можно говорить о локализации температуры в зоне разделения . [68]

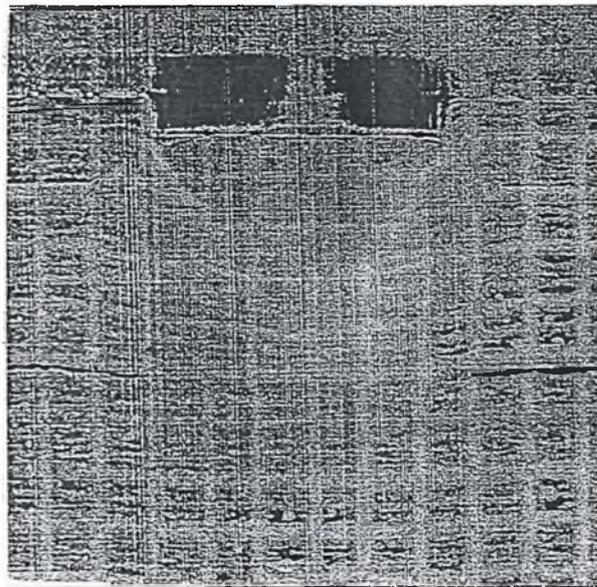
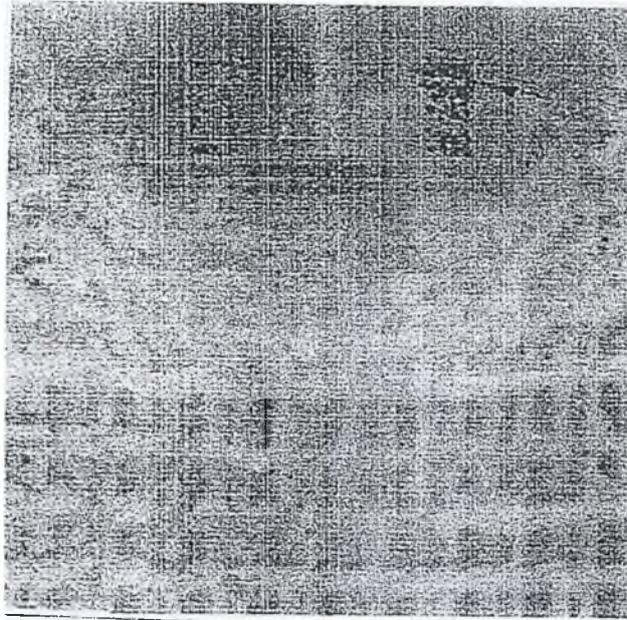


Рис.3.6 Деформированное состояние при пробивке:

А) без ультразвука

Б) с ультразвуком

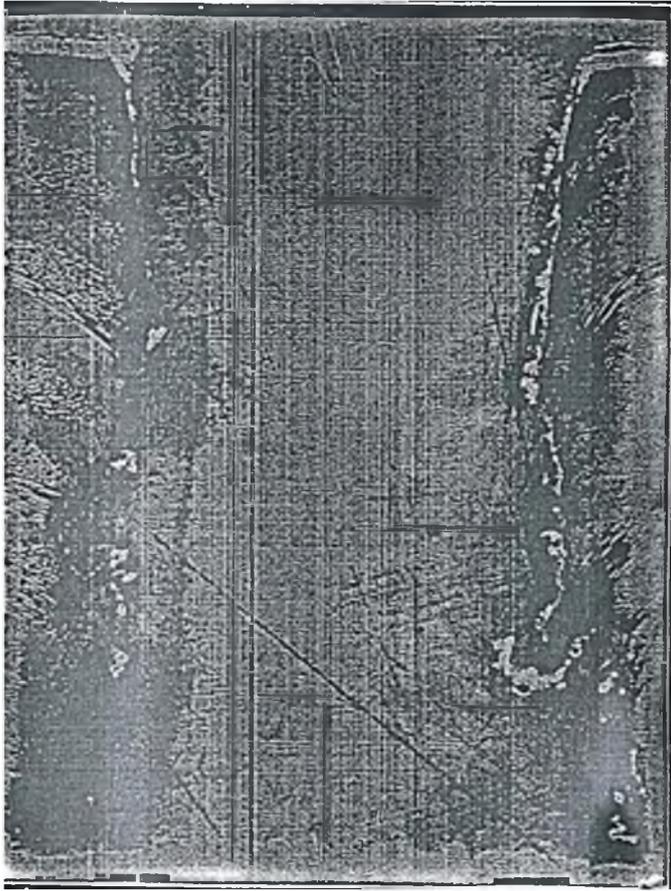


Рис.3.7. Поверхность разделения.

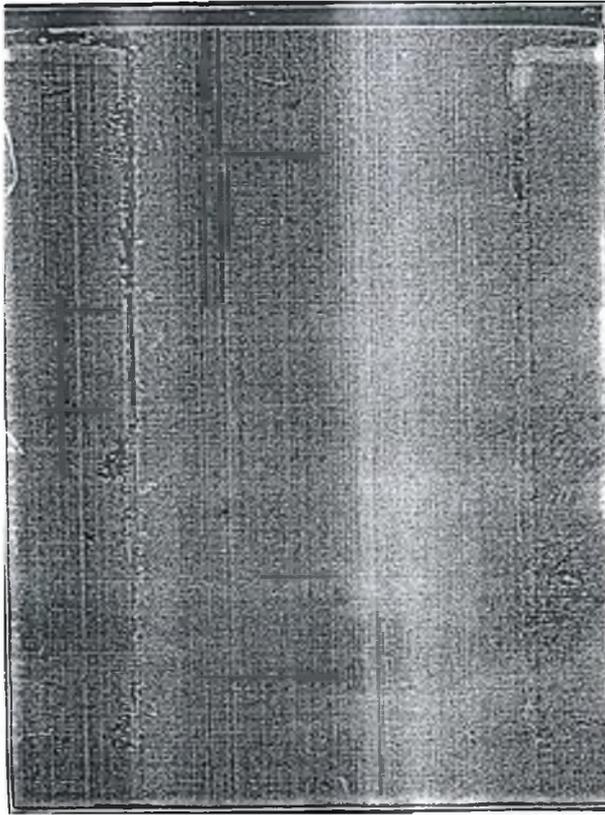


Рис.3.8. Поверхность разделения отверстия с ультразвуком .

## 3.2. ВЫВОДЫ

Анализ экспериментальных данных по температуре, возникающей в зоне деформирования при пробивке относительно малых отверстий ультразвуком в слоистых пластмассах позволяет сделать следующие выводы:

1. Температура, сопутствующая ультразвуковым колебаниям возрастает в конце процесса пробивки тем больше, чем раньше амплитуда колебаний инструмента восстановится до исходного значения .
2. При увеличении амплитуды колебаний возрастает температура в очаге деформации при пробивке образцов на обоих штампах.
3. С увеличением скорости движения инструмента уменьшается влияние температуры на процесс деформирования, что справедливо для обоих типов штампов .
4. Величина температуры, сопутствующей ультразвуковым колебаниям , в случае замкнутой колебательной системы меньше , чем в разомкнутой.
5. При снижении давления прижима заготовки наблюдается увеличение температуры в зоне деформирования как на стержневом , так и на плоском штампах.
6. Увеличение зазора между режущими кромками пуансона и матрицы приводит к возрастанию температуры в зоне разделения , что справедливо для обоих типов колебательных систем .
7. Очаг действия температуры сопутствующей ультразвуковым колебаниям , локализован вокруг пробиваемого пуансона , что характерно для обоих типов штампов.
8. Температура в зоне разделения устраняет хрупкое разрушение смолы , тем самым увеличивает пластичность материала при штамповке с ультразвуком.

9. Очаг деформирования увеличивается с возрастанием температуры в зоне деформирования.

## ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.

### 4.1. ШТАМПЫ И УСТАНОВКА.

При пробивке с ультразвуком инструмент совершает возвратно - поступательное движение , в результате чего возможна заполировка поверхности получаемых отверстий , что не допускается по техническим условиям на изготовление плат печатного монтажа. В связи с этим пуансоны не будут крошиться к активному волноводу.[70]

С точки зрения технологии и эксплуатации этот вариант имеет ряд преимуществ , к которым можно отнести :

1. Относительную простоту изготовления инструмента ;
2. Легкость и быстроту замены сломанного пуансона ;
3. Высокую универсальность , позволяющую обслуживать поочередно одним волноводом несколько групп пуансона в одном штампе.

При пробивке относительно малых отверстий в пуансонах возникают значительные напряжения сжатия (1200 - 1500) МПа , которые способствуют быстрому выходу пуансонов из строя. Кроме того , у пуансонов малого диаметра возникает опасность продольного изгиба , приводящего к поломке пуансона. Поэтому появляется необходимость проверять размеры пуансона на устойчивость.

$$F_{кр} = \frac{\pi^2 EJ}{l_n^2} ,$$

Где J – момент инерции сечения пуансона;

$l_n$  – длина пуансона.

Длина пуансона складывается из толщины заготовки, прижима, съемника (рис 4.1) и ограничена максимально возможной высотой пассивной насадки , присоединяемой , которая не должна превышать 10% длины звуковой волны.

Материалам для изготовления пуансонов выбираем быстрорежущую сталь Р6М5. Предпочтение стали Р6М5 отдаем потому, что она после термообработки имеет высокую точность , твердость и износостойкость, и сохраняет свои режущие свойства при нагревании во время работы до температуры 600 ° С.

Особую сложность при штамповке плат представляют получение относительно малых отверстий, расположенных на расстоянии одного шага координатной сетки, равной  $2,5 \times 10^{-3}$  м.

Очень часто в платах печатного монтажа встречаются группа из 12 – 16 близко расположенных друг от друга отверстий диаметрами  $(0,8 - 0,95) \times 10^{-3}$  м, предназначенная под установку модулей или других навесных радиоэлементов.

Учитывая данное обстоятельство, исследования процесса пробивки относительно малых отверстий диаметром  $0,9 \times 10^{-3}$  м производим на группе, состоящей из 16 отверстий, расположенных квадратом  $4 \times 4$  с шагом  $2,5 \times 10^{-3}$  м между осями отверстий .

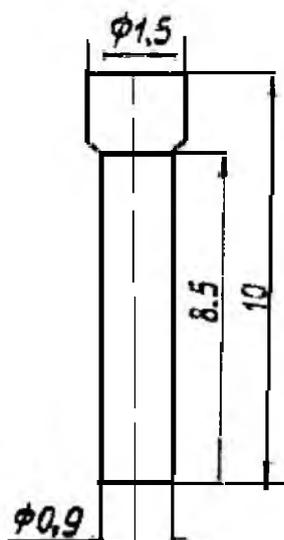
Для исследования влияния акустических замкнутой и разомкнутой колебательных систем на процесс пробивки группы отверстий малого диаметра (при  $d < h_3$ ) в слоистых пластиках были спроектированы и изготовлены два различных штампа с расположением очага деформации в пучности колебаний. Конструкция одного штампа выполнена по стержневой схеме из условий требований акустики и представляет замкнутую колебательную систему (рис 4.2) . Другой штамп изготовлен по плоской схеме из условия конструктивных требований, представляющий разомкнутую систему (рис 4.3) .

Конструкция штампа стержневого типа показана на рис.4.2. Три съемные матрицы (3) с различными зазорами поочередно устанавливаются на пассивный волновод (отражатель) (13). Направление пуансонов (11) осуществляется по посадке скольжения в прижиме (4) , который закреплен на средней плите штампа (5) . Величина усилия прижима заготовки создается при помощи стяжных болтов (14). Усилие съема создают пружины (7). Съём пуансонов после пробивки осуществляется при зажатой заготовке. Для уменьшения величины прогиба прижима съемник подводится к прижиму до полного смыкания.

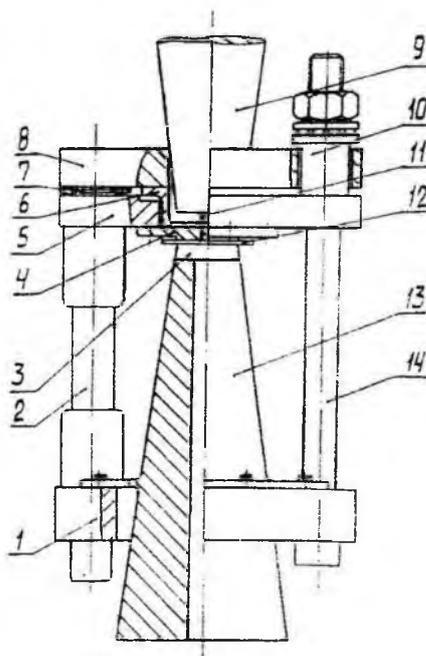
Конструкция плоского штампа (рис 4.3) выполнена аналогично штампу стержневого типа, только в ней отсутствует отражатель.

Зазоры между режущими кромками матрицы и пуансона, следуя рекомендациям, выбираем в диапазоне 3 – 12 % от толщины материала заготовки (зазоры двухсторонние).

Давление прижима заготовки при пробивке отверстий без ультразвука в неметаллических материалах рекомендуют в литературных источниках брать равными (10 - 30) Мпа, а при пробивке с ультразвуком рекомендации отсутствуют. В связи с этим исследование влияния удельного усилия прижима заготовки будем проводить в диапазоне (5 - 50) Мпа.



**Рис. 4.1.** Конструкция пуансонов для пробивки группы малых отверстий на экспериментальном штампе.



**Рис.4.2.** Конструкция экспериментального штампа, выполненного по стержневой схеме: 1 – нижняя плита, 2 – направляющая колонка, 3 – матрица, 4 – прижим, 5 – средняя плита, 6 – съемник, 7 – пружины съемника, 8 – верхняя плита, 9 – концентратор ультразвуковых колебаний, 10 – месдоза, 11 – пуансоны, 12 – заготовка, 13 – отражатель звуковых волн, 14 – стяжной болт.

Одним из главных требований, предъявляемых к прижиму, является его жесткость. Величина прогиба пружина определяется :

$$W_m = \frac{3(1-\mu^2)(5 + \mu g R^4)}{3(1-\mu^2)(16\mu E h^3)}$$

Где  $W_m$  - наибольший прогиб пластины в центре в случае закрепления сторон пластины;

$\mu$  – коэффициент Пуансона;

$g$  – давление прижима заготовки;

$R$  – радиус пластины;

$h$  – толщина пластины.

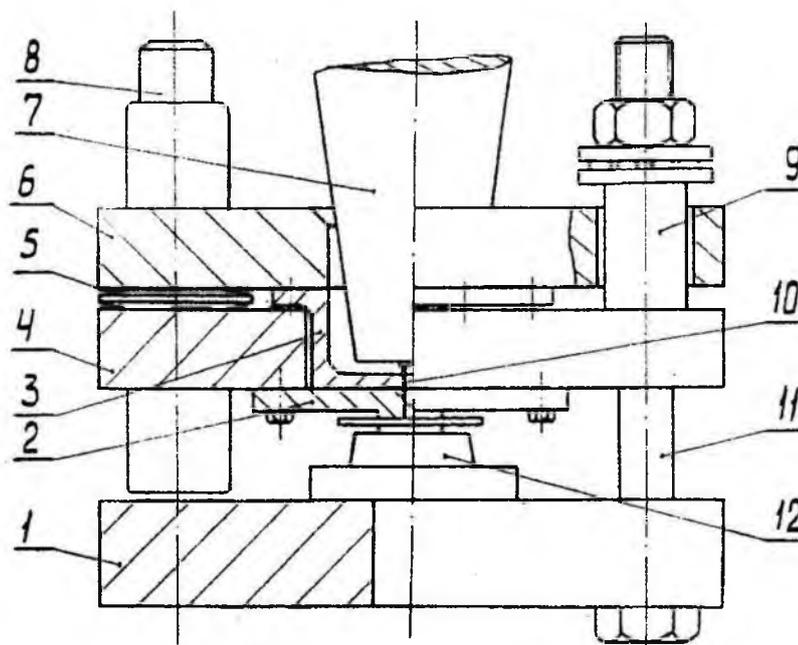
Для выбранных размеров плиты прижима величина прогиба составляет  $10^{-7}$  м, что удовлетворяет требованиям жесткости.

При штамповке с малой скоростью перемещения инструмента деформирование материалов, имеющих незначительную вязкость и склонность к надразам, возникают благоприятные условия для релаксации возникающих напряжений. Это обстоятельство положено в основу выбора скорости перемещения инструмента при проведении эксперимента, которая берется в диапазоне  $(0,12 - 1,6) \times 10^{-3}$  м / сек.

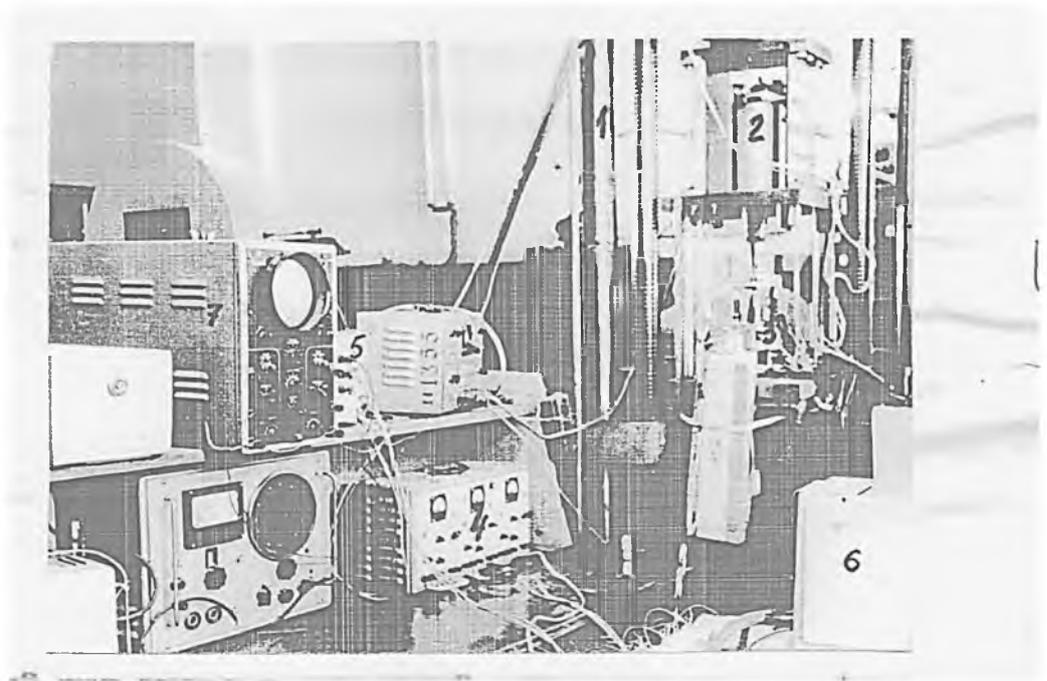
Включения ультразвуковых колебаний до начала процесса деформирования, а также выключения вибраций и остановка гидравлического привода машины с целью предотвращения поломки инструмента. Система состоит из:

1. Двух нажимных штоков, закрепленных на неподвижной траверсе и имеющих возможность регулировки в вертикальном направлении. Оба прижима штока подпружинены;
2. Двух пар микропереключателей, жестко закрепленных на подвижной траверсе ;
3. Двух реле, закрепленных в ультразвуковом генераторе.

Настройка уровней нажимных штоков осуществляется по специальным калибрам таким образом, чтобы ультразвуковые колебания включались за 1,0 – 1,5 сек до начала пробивки, а отключались они и останавливался привод гидравлической машины по прохождению инструментом  $0,3 \times 10^{-3}$  м после окончания процесса деформирования.



**Рис.4.3.** Конструкция экспериментального штампа, выполненного по плоской схеме: 1 – нижняя плита, 2 – прижим, 3 – съемник пуансонов, 4 – средняя плита, 5 – пружины съемника, 6 – верхняя плита, 7 – концентратор ультразвуковых колебаний, 8 – направляющая колонка, 9 – месдоза, 10 – пуансоны, 11 – стяжной болт, 12 – матрица.



**Рис. 4.4** Общий вид экспериментальной установки для пробивки группы малых отверстий с ультразвуком: 1 – испытательная машина ГРМ – 50, 2 – магнитострикционный преобразователь ПМС – 15А – 18, 3 – экспериментальный штамп, 4 – тензометрическая станция, 5 – блок модуляции амплитудно – частотных параметров, 6 – шлейфовый осциллограф К – П5, 7 – электронный осциллограф.

Источником ультразвуковых колебаний является система, состоящая из электрического генератора и преобразователя электрических колебаний в упругие механические колебания . [71]

Наша промышленность выпускает различные по конструктивному исполнению и мощности магнитострикционные преобразователи. Наибольшее применение при обработке давлением получили серийные преобразователи продольных колебаний типа ПМС – 15А – 18.

Техническая характеристика излучателя ПМС – 15А – 18 :

1. Мощность потерь не более 5 кВт;
2. Направление питания 440 В;
3. Направление датчика обратной связи не менее 400 В;
4. Диаметр выходного торца трансформатора упругих колебаний 0,065 м;
5. Резонансная частота 17,5 – 19,3 кГц;

6. Амплитуда механических колебаний торца трансформатора упругих колебаний до  $12 \times 10^{-6}$  м;
7. Ток подмагничивания 20 – 5 А.

Магнитострикционный преобразователь закрепляется в специальном блоке, установленном на испытательной машине, и записывается от ультразвукового генератора УЗГ2 – 10 по смешанной схеме с обратной акустической связью, которая обеспечивает стабильность работы магнитострикционного преобразователя при нагрузке его статическими силами.

Техническая характеристика генератора УЗГ2 – 10 :

1. Выходная мощность 10 кВт;
2. Потребляемая мощность 18 кВт;
3. Выходное напряжение (регулируемое) 220 – 440 В;
4. Питающее напряжение трехфазное 380 В;
5. Частота электрического тока (регулируется в пределах) 17,5 – 23,5 кГц;
6. Ток подмагничивания (регулируемый) 0 – 30 А.

Работа установки для исследования процесса пробивки осуществляется следующим образом. В исходном состоянии штамп разомкнут, заготовку укладывают на матрицу и с помощью стяжных болтов создается необходимое усилие прижима заготовки.

При включении испытательной машины ГРМ – 50 начинает перемещаться с установленной скоростью инструмент и панель с закрепленными на ней микропереключателями (1КУ, 2КУ, 3КУ, 4КУ) (рис. 4.5). Первыми срабатывают микропереключатели 1КУ и 3КУ, вызывая срабатывания контактов реле 2РП в цепи управления ультразвукового генератора, в результате чего происходит включение ультразвуковых колебаний. При дальнейшем движении траверса микропереключатели 1КУ и 3КУ постоянно находятся в нажатом положении. После пробивки заготовки происходит нажатие 2КУ и 4КУ, вызывая срабатывание реле 1РП, которое включает ультразвуковые колебания. В это же время контакты 2КУ в цепи управления испытательной машины замыкаются, выключая гидропривод машины.

## 4.2. Тензометрирование и тарировочные графики.

Исследование процесса пробивки относительно малых отверстий в слоистых пластмассах будем проводить с использованием тензометрического комплекса, позволяющего измерять следующие величины:

- Перемещение инструмента;
- Усилие деформирования;
- Усилие прижима заготовки;
- Температуру в зоне деформирования;
- Амплитуду механических колебаний активного волновода.

Все выше перечисленные параметры записываются одновременно на осциллографическую бумагу на осциллографе К – 115, предназначенном для регистрации 12 изменяющихся во времени электрических величин. Комплексная осциллограмма позволяет более объективно оценить эффективность ультразвукового воздействия на процесс деформирования, сделать выводы о конструкциях штампов и установок для ультразвукового деформирования, а также экспериментально определить оптимальные условия штамповки с применением энергии ультразвука.

Для измерения и записи характеристик процесса пробивки применяется стандартная усилительная аппаратура ТА – 5 и ТДЗ – 1 – 1.[73]

Усилие деформирования слоистых пластмасс воспринимается специальной месдозой, на которую устанавливаются и закрепляются поочередно штампы. На месдозу, представляющую собой кольцо диаметром 0,07 м с толщиной стенки  $1,5 \times 10^{-3}$  м, наклеены 4 рабочих и 4 компенсационных тензодатчика типа 2ПКБ – 10 – 100 ГБ. Тарировка месдозы осуществляется на испытательной машине с помощью динамометра ДОСМ – 3 – 1 . Тарировочный график показан на рис. 4.6.

Для получения необходимого давления прижима заготовки используются месдозы, которые располагаются на стяжных болтах. Для устранения влияния скручивающего момента на показания

месдоз между гайками и месдозами устанавливаются упорные шарикоподшипники (типа 8100).

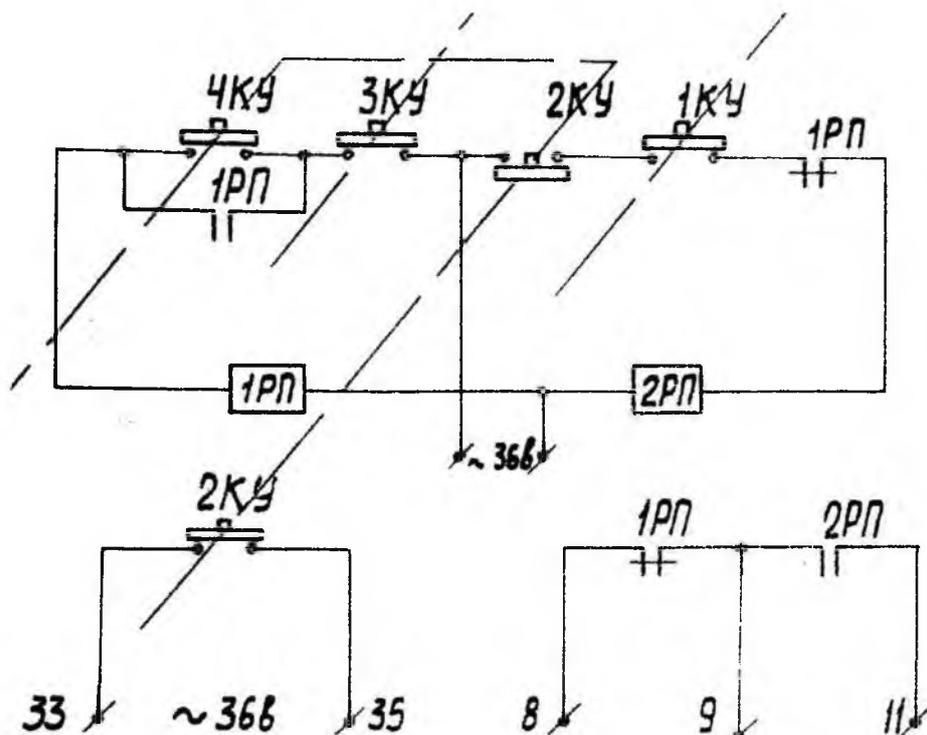
Тарировка месдоз осуществляется на испытательной машине с помощью образцового динамометра ДОСМ – 1 – 1. Тарировочный график показан на рис. 4.7.

При создании давления прижима заготовки усилие на стяжных болтах контролируется визуально по отклонениям светового луча на экране шлейфового осциллографа К – 115.

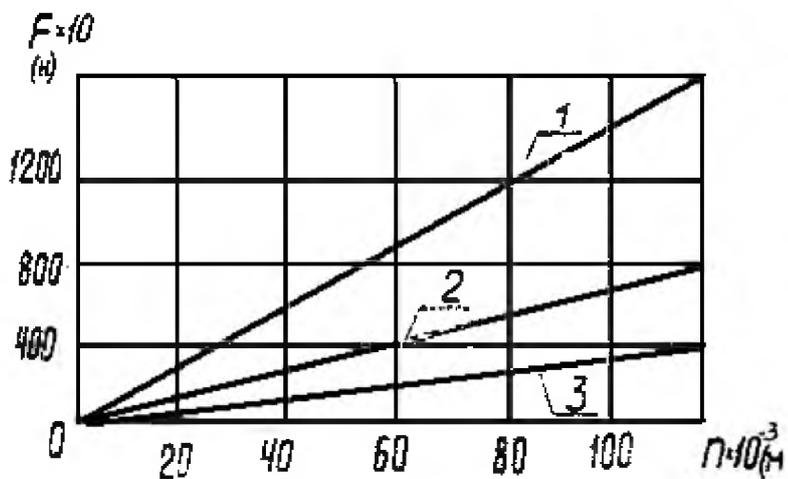
Для записи перемещения инструмента (пуансона) использована одноопорная балочка, представляющая собой пластину из пружинной стали 60С2, на противоположные стороны которой наклеиваются 2 тензодатчика типа 2ПКБ – 10 – 100 ГБ. Тарировка балочки перемещения осуществляется на испытательном прессе с помощью рычажно – зубчатой головки, рассчитанной для измерений от 0 до 0,01 м с ценой деления  $10^{-5}$  м. тарировочный график показан на рис. 4.8.

Принципиальная схема замера усилия пробивки, перемещения пуансонов, давления прижима заготовки и усилия съема пуансонов показана на рис. 4.9.

В работах[72,74-75], рассматривающих вырубку с применением ультразвука, указывается, что процесс штамповки сопровождается выделением в очаге деформации значительного количества тепла.



**Рис. 4.5.** Принципиальная схема выключения и включения ультразвукового генератора и остановки испытательной машины.



**Рис. 4.6.** График тарировки усилия пробивки : 1 – усиление  $1 \times 10^{-3}$ , 2 – усиление  $0,5 \times 10^{-3}$ , 3 – усиление  $0,25 \times 10^{-3}$ .

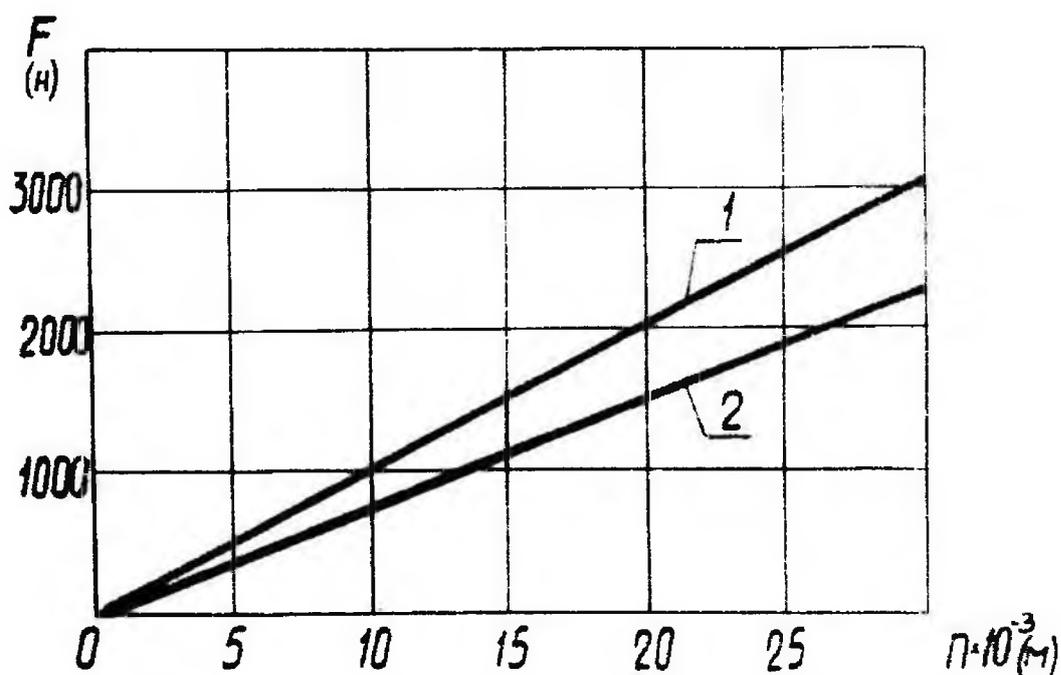


Рис. 4.7. График тарировки усилия прижима заготовки:

- 1 – Первая месдоза (усиление  $0,5 \times 10^{-3}$ ),
- 2 – Вторая месдоза (усиление  $0,5 \times 10^{-3}$ ).

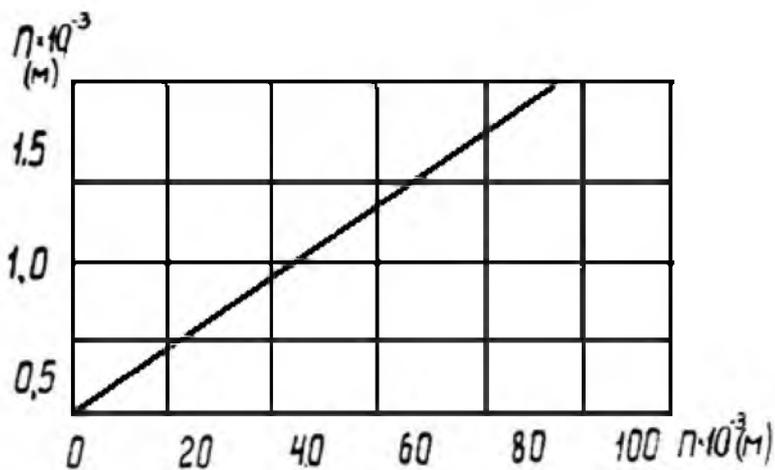


Рис. 4.8. График тарировки перемещения инструмента.

Для оценки температуры, возникающей в зоне разделения, произведем ее измерение. [76]

Измерение температуры на поверхности заготовки в зоне разделения материала и вблизи зоны разделения на расстоянии  $(1,25 \text{ и } 2,5) \times 10^{-3} \text{ м}$  осуществляется термопарами медь – констант, которые изготовлены из проволоки диаметром  $10^{-4} \text{ м}$  (рис.4.10). Горячий конец термопар закрепляется на прижиме в специально

изготовленных канавках и закрепляется с помощью эпоксидной смолы ЭД – 6. Холодный конец термопары погружается в сосуд Дюара, в котором поддерживается температура, равная 0°. Тарировка термопар медь – констант осуществлялась с помощью потенциометра постоянного тока ПП – 63. График тарировки показан на рис. 4.11.

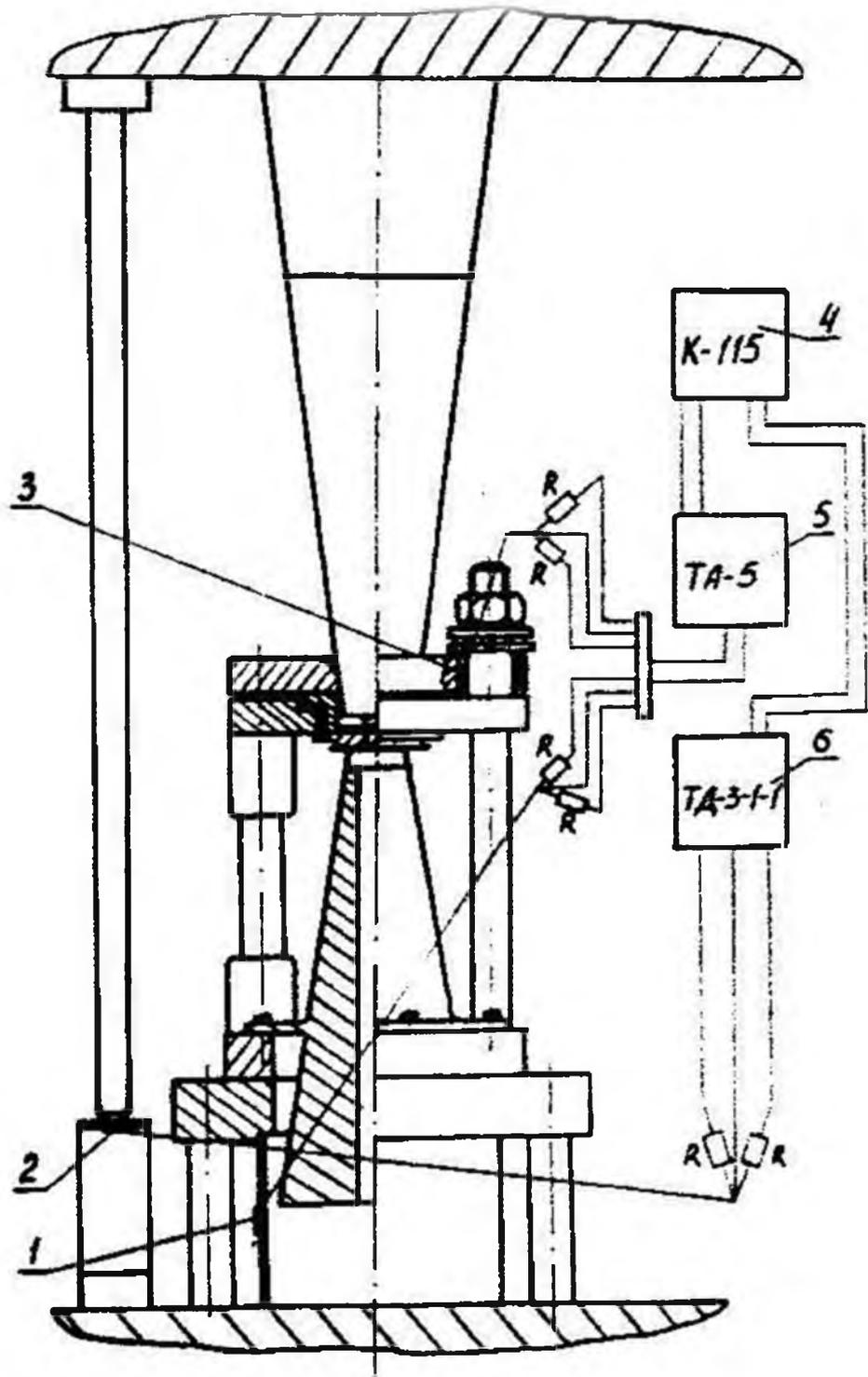
С целью определения параметров ультразвука в процессе пробивки регистрируется амплитуда ультразвуковых колебаний активного волновода.

Для записи амплитуды колебаний инструмента в процессе пробивки отверстий в печатных платах на осциллограмму была разработана схема регистрации амплитуды колебаний волновода с использованием тензодатчика, которая показана на рис. 4.12.

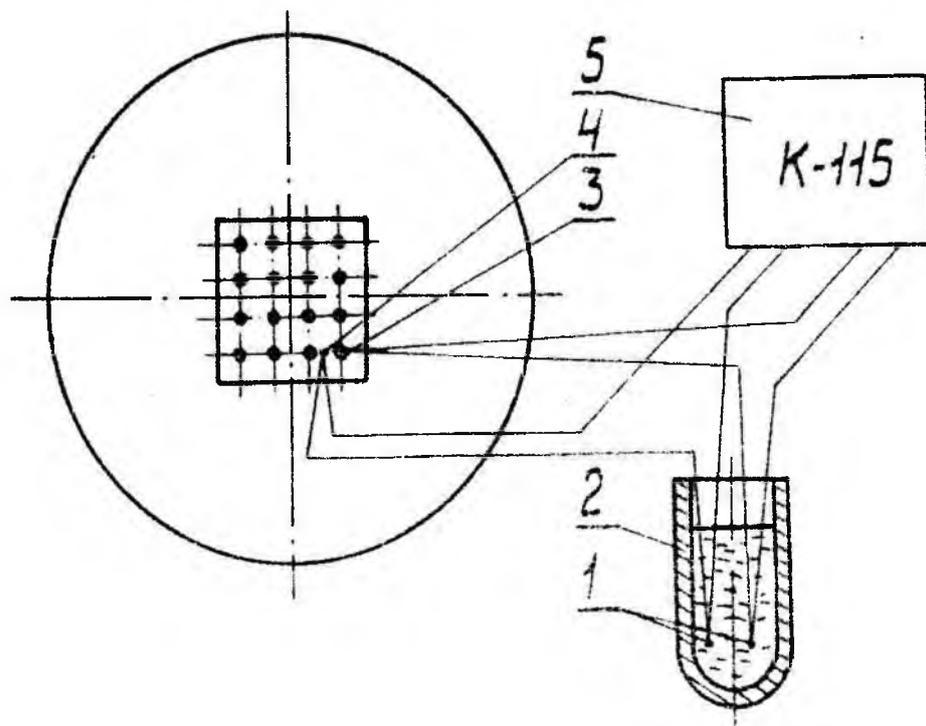
Использование тензодатчиков позволяет контактным способом замерять амплитуду механических колебаний волновода практически без внесения изменений в волноводную систему.

Сравнительная простота крепления тензодатчика – приклеивание клеем – БФ – 2, стабильность показаний, отсутствие влияния на работу колебательной системы – все это говорит за применение тензодатчика при измерении и записи вибраций инструмента.

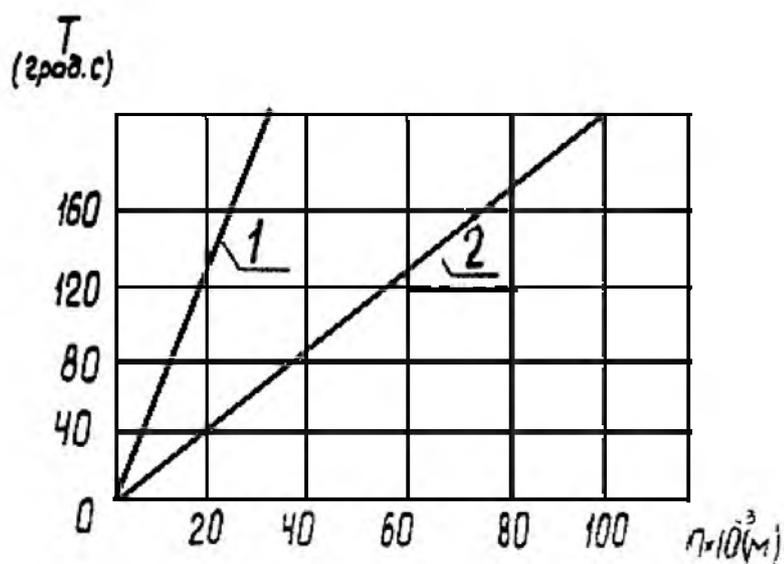
Тензодатчик ВПКБ – 5 – 10 – ХБ наклеивается на активный волновод на расстоянии 0,03 м от исходного сечения.



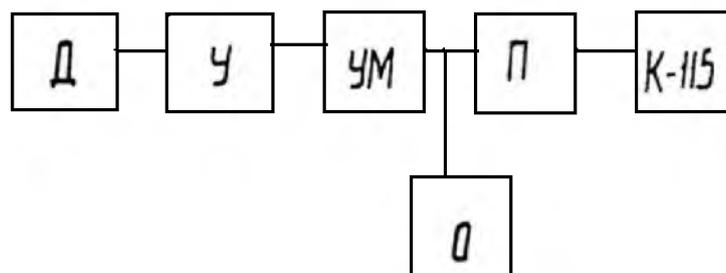
**Рис.4.9.** Схема тензометрических измерений параметров усилия пробивки: 1 – датчик статического усилия пробивки; 2 – датчик перемещения инструмента; 3 – датчик давления прижима заготовки; 4 – шлейфовый осциллограф; 5,6 – тензоусилители.



**Рис.4.10.** Схема замера температуры при пробивке: 1 – горячий спай между отверстиями; 2 – холодный спай; 3 – сосуд Дюара; 4 – горячий спай на границе раздела отверстий; 5 – шлейфовый осциллограф.



**Рис. 4.11.** График тарировки температур : 1 – температура в зоне раздела, 2 – температура между отверстиями.

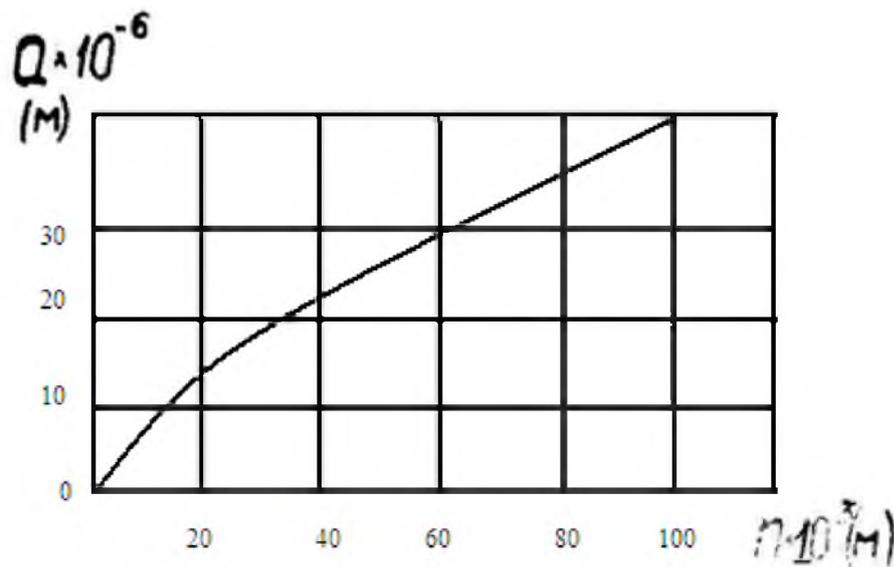


**Рис.4.12.** Схема записи амплитуды колебаний инструмента на комплексную осциллограмму: Д – тензометрический датчик; У – тензометрический усилитель ТУТ – 4 – 1; УМ – усилитель мощности; П – преобразователь; О – электронный осциллограф; К – 115 – шлейфовый осциллограф.

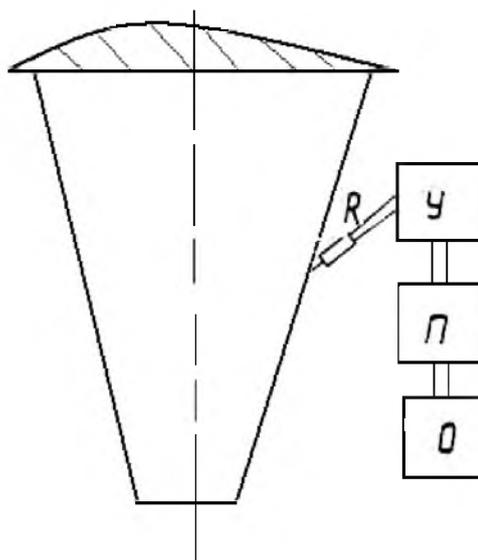
Переменный сигнал, снимаемый с тензодатчика, возникающий от механических колебаний волновода, подается на сетку лампы стандартного тензометрического усилителя ТУТ – 4, где модулируется и усиливается.

Для согласования высокоомного выхода тензоусилителя с низкоомным входом шлейфового осциллографа (гальванометра) в схему включен усилитель мощности, выполненный по стандартной схеме. В связи с тем, что гальванометры имеют низкую собственную частоту ( $\gamma = 600 - 700$  Гц), после усилителя мощности располагается преобразователь, который преобразует переменный сигнал в постоянный и подает этот сигнал пропорционально величине амплитуды ультразвуковых колебаний на вход шлейфового осциллографа К – 115. Для визуального контроля сигнала датчика после усилителя мощности в схему включен осциллограф С1 – 1. Тарировка амплитуды ультразвуковых колебаний волновода осуществляется с помощью рычажно – зубчатой головки с ценой деления  $10^{-6}$  м. График тарировки амплитуды показан на рис. 4.13.

Принципиальная схема записи амплитуды механических колебаний ультразвуковой частоты на осциллограмму с помощью шлейфового осциллографа показана на рис. 4.14.



**Рис. 4. 13.** График тарировки амплитуды механических колебаний инструмента с ультразвуковой частотой.



**Рис. 4.14.** Схема замера амплитуды колебаний волновода в процессе пробивки:  $R$  – тензодатчик,  $У$  – тензоусилитель ТУТ – 4 – 1,  $П$  – усилитель мощности и преобразователь,  $О$  – шлейфовый осциллограф К – 115.

### **4.3. ВЫВОДЫ**

Перед проведением и входе экспериментов проводится настройка режимов работы установки, которые заключаются в следующем:

1. Устанавливается необходимый режим работы генератора ультразвуковых колебаний;
2. Устанавливается заданная скорость перемещения инструмента;
3. Осуществляется настройка системы автоматки.

## Основные выводы.

Исследование процесса пробивки-вырубки относительно малых отверстий с применением продольных ультразвуковых волн с подведением их к пуансонам, расположенным в пучности колебаний, показывает:

1. Наиболее значимым фактором, оказывающим влияние на процесс пробивки-вырубки по сравнению с другими технологическими факторами, являются ультразвуковые колебания инструмента.
2. В процессе пробивки-вырубки происходит падение амплитуды колебаний волновода, причем это падение на разомкнутой колебательной системе больше, чем на замкнутой. Установлено, что с увеличением исходной амплитуды вибраций инструмента уменьшается относительная величина падения амплитуды колебаний волновода, что характерно для обоих типов колебательной системы.
3. При пробивке-вырубке относительно малых отверстий величина средней амплитуды колебаний волновода пропорциональна исходной амплитуде вибраций инструмента.
4. Увеличение исходной величины колебаний волновода способствует значительному снижению статического усилия деформирования, причем на стержневом штампе снижение усилия больше, чем на плоском.
5. Эффективность применения ультразвуковых колебаний волновода при пробивке группы отверстий с относительно малыми размерами на стержневом штампе выше, чем на плоском.
6. При амплитудах колебаний волновода  $18 \times 10^{-5}$  м и выше наступает вибрационный режим деформирования.
7. Математическая модель процесса пробивки относительно малых отверстий позволяет определить статическое усилие деформирования, точность и качество пробиваемых отверстий в зависимости от выбранных технологических параметров процесса пробивки.
8. При пробивке-вырубке с ультразвуком в очаге деформации возникает температура, величина которой возрастает с увеличением исходной величины амплитуды колебаний волновода. Максимальной величины температура достигает в конце пробивки-вырубки.
9. Очаг действия температуры, сопутствующей ультразвуковым колебаниям, локализован вокруг пробиваемого пуансона.
10. Уменьшение статического усилия деформирования способствует увеличению точности соответствия диаметров пробиваемых отверстий для обоих типов колебательных систем.

11. Точность пробиваемых отверстий на стержневом штампе выше, чем на плоском.
12. Применение ультразвука при пробивке отверстий позволяет получить качественную поверхность среза без вырывов с чистой поверхности по 6-7 классу на обоих типах колебательных систем.
13. Величина максимального дефекта на поверхности разделения уменьшается при снижении статического усилия деформирования, причем качество, получаемое на стержневом штампе выше, чем на плоском.
14. С уменьшением статического усилия пробивки уменьшается величина ширины пояса ореола вокруг пробиваемых отверстий.
15. О величине максимального дефекта на поверхности среза можно судить по точности получаемого отверстия, потому что между ними существует пропорциональная зависимость.
16. Применение ультразвука при пробивке малых отверстий позволяет устранить растрескивание перемычек между пробиваемыми отверстиями.

Исследования влияния типа колебательной системы показывают, что различие между ними незначительно при амплитудах  $18 \times 10^{-6}$  м. Следовательно, пробивка малых отверстий на плоском штампе с ультразвуком позволяет получить удовлетворенное качество поверхности среза и тем самым заменить малопродуктивную операцию сверления групповой штамповкой.

Металлизация отверстий показывает, что на поверхности среза отверстий, пробитых с ультразвуком, медное покрытие более равномерно распределено на поверхности разделения, чем у отверстий, пробитых без ультразвука.

Штамповка отверстий малого диаметра с использованием разомкнутой колебательной системы позволит пробивать отверстия в платах печатного монтажа размерами  $(300 \times 400) \times 10^{-6}$  м<sup>2</sup> на специализированной ультразвуковой установке.

## Литература.

1. Хмелев, В.Н. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 203с
2. Хмелев, В.Н. Ультразвуковое распыление жидкостей: монография / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, А.В. Шалунова; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 272 с.
3. ОСТ ГО.054.041. Платы печатные. Типовые технологические процессы обработки ( Редакция 1-71), 1982.
4. НГО.077.000. Платы печатные. Общие технические условия ( Редакция 2-69), 1999.
5. Справочник по печатным схемам, под ред. Кумбза К. Ф. ,перевод с англ. Под ред. Файзулаева Б.И. , Квасницкого В.Н. –М. , 1982. -21 стр.
6. Барановский В.В. , Дулицкая Г.М. Слоистые пластики электротехнического назначения. – М.: Энергия, 1986. – 288 стр.
7. Смирнова Н.А. Особенности низкотемпературной рекристаллизации никеля и меди / Левит В.И., Пилюгин В.П., и др. //ФММ. 1986. - Т.62. - вып. 3. - С. 566-570.
8. Архангельский Б.А. Пластические массы. – Л.: Судпромгиз, 1987. -718 стр.
9. Белянкин Ф.П., Яценко В.Ф., Дыбенко Г.И. Прочность и деформативность слоистых пластиков. – Киев: Наука, 1984. – 219 стр.
10. Ашкенази Е.К., Ганов Э.В. Анизотропия конструкторных материалов. – Л.: Машиностроение , 1992. – 216 стр.
11. Бажанов В.Л., Гольденблат И.И., Копов В.А. и др. Сопротивление стеклопластиков. – М.: Машиностроение, 1998. – 304 стр.

12. Ашкенази Е.К., Пеккер Ф.П. Прочность стеклопластиков при сложных напряженных состояниях. – Л.: Машиностроение, 1998. – 8 стр.
13. Коновалова Т.К. Исследование анизотропии механических свойств композиционных пластических масс. Дис... канд.т.н. – Свердловск, 1954. – 192 стр.
14. Вандебург А.К. Пластические массы в электротехнической промышленности. – М.- Л.:Госэнергоиздат, 1983. – 283 стр.
15. Александров А.П., Журков С.П. Явление хрупкого разрыва. – М.: Гостехиздат, 1983. – 52 стр.
16. Журков С.Н. Эффект повышенной прочности тонких нитей. – Журнал технической физики. 1999.№ 6 . с. 682 – 690.
17. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. Издат. иностр. лит., т.1. -648 стр.
18. Davis E.A. Applied Mechanics , 1998 , p. 216 – 221.
19. Рагель В.Р. О механизме хрупкого разрушения пластмасс. - Журнал технической физики. 1991. т. XXI, вып.3, стр. 287- 303.
20. Ребиндер Н.А. Значение физико-химических процессов при механическом разрушении и обработке. –Вестник АН , 1990, №8 , стр. 947-951.
21. Френкель Я.И. Теория обрабатываемых и необрабатываемых трещин в твердых телах. – Журнал технической физики, 1982, т.22. вып.2.
22. Степанов А.В. О механизме разрушения анизотропных пластмасс. – ЖЭТФ. 1989, 19. Вып.2, стр. 1692 – 1709.
23. Пинес Б.Я. О росте «зародышевых» трещин, обуславливающих хрупкую прочность тел. – ЖТФ. 1995, т. 25, вып. 8, стр. 1399 – 1404.
24. Смотрин Н.Т. Сопротивление винилпласта длительному действию растягивающих и сжимающих напряжений. – Химическая промышленность. 1983, №10 ,стр. 383 – 386.
25. Шилькрут Д.К. К теории развития реальных микротрещин в твердых телах в процессе деформации. – докл . АН, 1988, т.122,№1, стр. 69 – 72.

26. Schneider W. Mikromechanische Grundlagen kohäsiver und adhäsiiver Versagenskriterien von unidirektionalen Schichten. – Fortschr. – Ber. VDJ Z. 1993, Reihe 5, №16, 9-26.
27. Schädigungsgrenzen bei glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) - Fortschr. – Ber. VDJ Z. 1993, Reihe 5, №16, 1 – 115.
28. Grunert Siegfried, Grunert Brigitte, Schneider Hartmut. Mikroskopische Untersuchungen an geschädigten GUP – Laminaten. Plast und Kautsch, 1985, 22, №8, 646-653.
29. Armenakes A.E. Sciammarella C.A. Response of glass – fiberreinforced epoxy specimen to high rates of tensile loading. – Exp. Mech, 1983, 13, №10, 433 – 440.
30. Alf E. Verhalten von ungesättigten UP – Harz unter Schwingbeanspruchung – Kunststofftechnik, 1984, t.13, №5, 101 – 105, A6.
31. Бобрынин Б.Н. Исследование процесса штамповки вырубки – пробивки листовых сложных и волокнистых пластмасс. – Дис... канд.т.н. – Горький, 1980, - 204 с.
32. Бобрынин Б.Н. Технология штамповки неметаллических материалов. – М.: - Машгиз, 1982, - 240 с.
33. Бобрынин Б.Н. Штамповка листовых пластмасс. – М. – Л.: Машгиз, 1982, - 204 с.
34. Бобрынин Б.Н. Экспериментальное исследование некоторых вопросов вырубки – пробивки сложных пластмасс. – Вопросы радиоэлектроники. Технология производства радиоаппаратуры. 1989, вып. 1, с.18 – 22.
35. Бобрынин Б.Н. О величине минимально допустимых перемычек при штамповке слоистых пластмасс. 1988, № 3, с. 33- 34.
36. Бобрынин Б.Н. Неметаллические материалы и их обработка давлением. – М.: Машгиз, 1990, 66 с.
37. Бобрынин Б.Н. Оптические измерения чистоты поверхности деталей. – Стандартизация. 1989, № 9, с. 22 – 23.

38. Губарев В.В. Экспериментальное исследование механизма деформации при резке листового металла в штампах. Дис... канд. т.н. – М., 1984. - 196с.
39. Горнов Ю.Н., Ляпин Ю.И. Влияние быстроходности прессы и величины зазора на качество деталей из дюралюминия и гетинакса при вырубке – пробивке. 1989 , № 12, с. 48 - 50.
40. Ходзе Хидэцуне. Исследование процесса штампами. – «Сэймицу Кикай». J. Soc. Precis Mech Japan, 1983, 29, №5.
41. Ходзе Хидэцуне. Резка сложных листов из бумаги, пропитанной фенольными смолами. – «Сэймицу Кикай». J. Soc. Precis Mech Japan, 1983, 29, №5.
42. Лисин А.Г., Смирнова Л.Р. Штамповка плат из стеклотекстолита. 1990, вып.1, с. 32.
43. Комяков А.П. Штамп для беззазорной штамповки слюды. – Кузнечно – штамповочное производство, 1986 , № 12, с 45.
44. Королев В.П. Штамп для изготовления деталей из слюды. – Кузнечно – штамповочное производство, 1996 , № 1, с 47 – 48.
45. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов. – М. – Л.:Металлургиздат, 1991, 532 с.
46. Лисин А.Г., Смирнова Л.Р. Определение напряжений при резке неметаллических материалов штампом. Челябинск, 1984, № 143, с 30 – 35.
47. Ходзе Х., Киносита К. Вырубка бумажно – слоистого фенольного материала. – М.:ВИНИТИ, 1990, - 75 с.
48. Лермонс Г.С., Ватсон Н.Л. Штамповка слоистых пластиков на основе фенольных смол. – М.:ВИНИТИ, 1990,- 13с.
49. Лисин А.Г., Смирнова Л.Р. Теоретические исследования влияния зазора на напряженное состояние при резке. Челябинск, 1984, № 143, с. 26 – 29.

50. Михайленко Ф.П., Горнов Ю.И. Воздействие технологических факторов на качество деталей, получаемых штамповкой гетинакса. 1991, вып.1, с. 39 – 41.
51. Михайленко Ф.П., Грикке А.К. Автоматическая холодная штамповка мелких деталей на быстроходных прессах. – М.: Машиностроение, 1995, - 243 с.
52. Бобрынин Б.П. Исследование процесса штамповки вырубки – пробивки листовых слоистых и волокнистых пластмасс. – Горький, 1990, - 28 с.
53. Северденко В.П., Овчинников П.С., Пащенко В.С. Исследование стойкости штампов при вырубке – пробивке стеклотекстолита и ликвидации дефектов штамповки. Кишинев, 1983, с. 41 – 43.
54. Кольчак В.В. Разработка технологии получения в печатных платах монтажных отверстий с частичной металлизацией. – Тез. Докл.: Пути повышения качества и снижения стоимости соединений в приборостроении. Рига, Лат. НИИРТИ, 1988, с. 101 – 104.
55. Кольчак В.В. Разработка методик исследования монтажных отверстий с частичной металлизацией. Тез. докл.: Пути повышения качества и снижения стоимости соединений в приборостроении. Рига, Лат. НИИРТИ, 1988, с. 105 – 108.
56. Кольчак В.В. Результаты сравнительных испытаний монтажных отверстий в печатных платах РЭА. Тез. докл.: Пути повышения качества и снижения стоимости соединений в приборостроении. Рига, Лат. НИИРТИ, 1988, с. 109 – 114.
57. Кособульский Б.С., Свирновский Д.Г. Пробивка в печатных платах отверстий с частичной металлизированной фольгой. Тез. докл.: Пути повышения качества и снижения стоимости соединений в приборостроении. Рига, Лат. НИИРТИ, 1988, с. 115 – 116.
58. Овчинников П.С. Особенности штамповки стеклотекстолита. – В сб. Металлургия: Машины и теория обработки металлов давлением. Минск, 1987. Вып.10, с. 24 – 26.

- 59.Клинцов Ю.М. Штамповка гетинакса. – Бюллетень по обмену техническим опытом. НИИ Автоприборов,1996, № 8 – 9.
- 60.Зубцов М.Е. Листовая штамповка. – М.: Машиностроение, 1987, - 504 с.
- 61.Залесский В.И., Губарев В.В. Механизмы деформации при резке листового металла в штампах. – в сб.: Технологические процессы обработки стали и сплавов. – М.: МИСиС, 1985, № 33, с. 409 – 452.
- 62.Кухтаров В.И. Холодная штамповка. – М.: Машгиз, 1992, - 403 с.
- 63.Шенкар В.С., Шустицкий Ф.М. Исследование очага деформации разделительных операций листовой штамповки. – Кузнечно – штамповочное производство, 1993, № 2, с. 19 – 23.
- 64.Тимошенко В.А. Виды очага пластической деформации в разделительных процессах. – в сб.: Разделительные процессы обработки металлов давлением. Кишинев. 1985,с. 8 – 11.
- 65.Смирнов – Аляев Г.А., Вайнтрауб Д.А. Холодная штамповка в приборостроении. – М. – Л.: Машгиз. – 435с.
- 66.Романовский В.П. Технологическая стойкость пуансонов пробивных штампов. – Вестник машиностроения, 1991, № 7, с. 62 – 65.
- 67.Лисин А.Г. Напряжения и деформации по пояску смятия и влияние их на стойкость штампов разделительных операций. – В науч. сб. тр. Челябинского политехнического института. 1999, № 51, с. 39- 53.
- 68.Любшин В.Б. Распределение нормальных напряжений по пояску смятия при штамповке – вырезке деталей сложного контура. – в сб.: Новое в машиностроении , Саратов , 1998 , вып.2 , с. 83 – 89.
- 69.Аверкиев Ю.А. Технология холодной штамповки. (1989), с. 45.
- 70.Dieter George E., Kuhn Howard A., Semiatin S. Lee. Handbook of Workability and Process Design ASM International, 2003. — 414 p.
- 71.Fu M.W. Design and Development of Metal-Forming Processes and Products Aided by Finite Element Simulation Springer International Publishing AG, 2017. — 258 p. — (Engineering Materials and Processes).

72. Guo Z.X. (Ed.) The Deformation and Processing of Structural Materials  
Cambridge: Woodhead Publishing Limited; Boca Raton: CRC Press, 2005. -  
331 p.
73. Hosford W.F., Caddell R.M. Metal Forming: Mechanics and Metallurgy 4th  
edition. — Cambridge University Press, 2011. XII, 331 p.
74. Стойкость штампов. Зубцов М. В., Корсаков В. Д., Л.:  
«Машиностроение», 1991г., 200 стр.
75. Справочник конструктора штампов: Листовая штамповка/Под общ. ред.  
Л. И. Рудмана. — М.: Машиностроение, 1988. — 496 с.
76. Ковка и штамповка. Справочник (том 1)"(Семенов Е.И.) 1985 .
77. И.А. Каримов «Узбекистан: национальная независимость, экономика,  
политика, идеология». 1996г.
78. Ш.М. Мирзияев «Критический анализ, жестокая дисциплина и  
персональная ответственность каждого руководителя ». 2017г.