Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
Факультет «Механико-технологический»
Кафедра «Технология автоматизированного машиностроения»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА
Рецензент
_____
_____ 2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
_____ В.И. Гузеев
30.05 2017 г.

Формообразование отверстий в тонколистовых заготовках термическим сверлением
ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ.150405.1375.2017.ПЗ.ВКР

Руководитель, к.т.н., доцент
_____ П.В. Шаламов
29.05.2017 2017 г.

Автор работы,
студент группы П-261
_____Р.М. Валеева
29.05.17 2017 г.

Челябинск 2017

АННОТАЦИЯ

Валеева Р.М., Формообразование отверстий в тонколистовых заготовках термическим сверлением. – Челябинск: ЮУрГУ, Политехнический институт; 2017. – 73 с., 55 илл., библиогр. список – 23 наим.

Целью данной работы является исследование процесса формообразования отверстий под резьбу в тонколистовых заготовках термическим сверлением. Была установлена возможность формообразования отверстий под резьбу М8…М9 в заготовках толщиной 2 мм термическим сверлением, определена оптимальная форма инструмента, рассмотрено влияние частоты вращения инструмента на осевую силу, основное время обработки и температуру, выявлены оптимальные режимы обработки, исследованы геометрические параметры отбортовки, исследована расчетная и фактическая прочность резьбового соединения на срез. Также был проведен регрессионный анализ, получена модель зависимости времени обработки от частоты вращения инструмента и осевой силы.

					ЮУрГУ.150405.1375.2017.ПЗ.ВКР		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.		Валеева Р.М.			Формообразование отверстий под резьбу в тонколистовых заготовках вращающимся пуансоном	Лит. Д	Лист 5 / Листов 73
Проверил		Шаламов П.В.					
Н.контр.						ЮУрГУ Кафедра ТАМ	
Утвердил		Гузеев В.И.					

ОГЛАВЛЕНИЕ 1

ВВЕДЕНИЕ 8

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ 9

1.1 Формообразование отверстий в тонколистовых заготовках 9

1.2 Формообразование отверстий с отбортовками вращающимся пуансоном .. 20

1.3 Цель и задачи исследования 27

2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ С ОТБОРТОВКАМИ ВРАЩАЮЩИМСЯ ПУАНСОНОМ В ТОНКОЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВКАХ 29

2.1 Методика изготовления инструментов и заготовок 29

2.2 Описание экспериментальной установки 33

2.3 Формообразование отверстий под резьбу в тонколистовых заготовках конусным инструментом 42

2.4 Применение комбинированного инструмента 43

2.5 Формообразование отверстий под резьбу в тонколистовых заготовках комбинированным инструментом 44

2.6 Измерение геометрических параметров отверстий с отбортовками 49

2.7 Выбор математической модели, независимых переменных и результаты эксперимента 53

2.7.1 Оценка уравнения регрессии 55

2.7.2 Проверка математической модели на адекватность 57

2.8 Выводы по главе 60

3 ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ С ОТБОРТОВКАМИ ВРАЩАЮЩИМСЯ ПУАНСОНОМ 61

3.1 Расчет прочности резьбового соединения на срез 61

3.2 Определение фактической прочности резьбового соединения 64

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 71

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 72

ВВЕДЕНИЕ

Первым направлением развития технологии машиностроения является совершенствование и оптимизация существующих материалосберегающих технологических процессов и разработка новых энергосберегающих технологических процессов изготовления изделий. Если рассматривать изделия из листовых заготовок толщиной менее 2,0 мм (кожухи, задвижки, емкости, кузова и т.д.), где предполагается резьбовое крепление к ним комплектующих деталей, то метод термического сверления под резьбу является актуальным, так как обеспечивает факторы энергоэффективности и ресурсосбережения. В других случаях формообразование отверстий в данных заготовках имеет ряд сложностей из-за недостаточной прочности получаемого резьбового соединения. Такие параметры как длина свинчивания, шаг и диаметр резьбового соединения, а также соотношение механических характеристик материала болта определяют прочность резьбы. Чтобы увеличить длину свинчивания, применяется гибка листов, приварка втулок, предварительная пробивка отверстий и другие методы. Однако существующие способы не обладают достаточной технологичностью. В тонколистовых заготовках целесообразно применять формообразование отверстий под резьбу вращающимся пуансоном или метод термического сверления, который обеспечивает безотходность материала и исключает применение дополнительных элементов для увеличения длины свинчивания.

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для правильной формулировки цели, задачи исследования, анализирования всех методов получения резьбовых отверстий в тонколистовых заготовках и выбора наиболее эффективного, необходимо познакомиться с уровнем изучения данной тематики другими исследователями. Это станет началом для всестороннего исследования процесса термического сверления с целью определить возможные области его применения в машиностроении.

1.1 Формообразование отверстий в тонколистовых заготовках

Резьбовое крепление в тонколистовых заготовках находит широкое применение в области машиностроения (кузова, крышки, задвижки и т. д.). На практике в тонкостенных материалах часто приходиться сталкиваться с получением лишь 1-2 витков резьбы, что является недостаточным для того, чтобы соединение было прочным и выдерживало требуемую нагрузку.

Для оценки нагруженных резьбовых соединений применяется такой параметр, как распределение нагрузки между витками резьбы. Причиной неравномерного распределения нагрузки являются упругие деформации разных знаков винта и гайки: винт растягивается, а гайка сжимается. Это различие в характере деформаций особенно большое в области первого витка резьбы, считая от опорной поверхности гайки, где винт и гайка нагружены полной осевой силой. В области верхних витков винт растягивается меньшей силой, так как часть осевой нагрузки передана нижерасположенными витками резьбы на гайку. Осевая нагрузка винта передается через резьбу гайке. Каждый виток резьбы нагружается силами F1, F2… Fz , где z – число витков резьбы гайки. Соответствующий характер распределения нагрузки между витками резьбы приведен на рисунке 1.1.

Распределение нагрузки по виткам резьбы впервые было изучено Н.Е. Жуковским, который установил, что если гайка имеет 10 витков, то на первый виток резьбы, ближайший к соединяемым деталям, приходится 34% всей силы,

растягивающей винт, а на последний – менее 1%. Таким образом, все витки резьбы гайки после десятого практически никакой нагрузки не воспринимают [1].

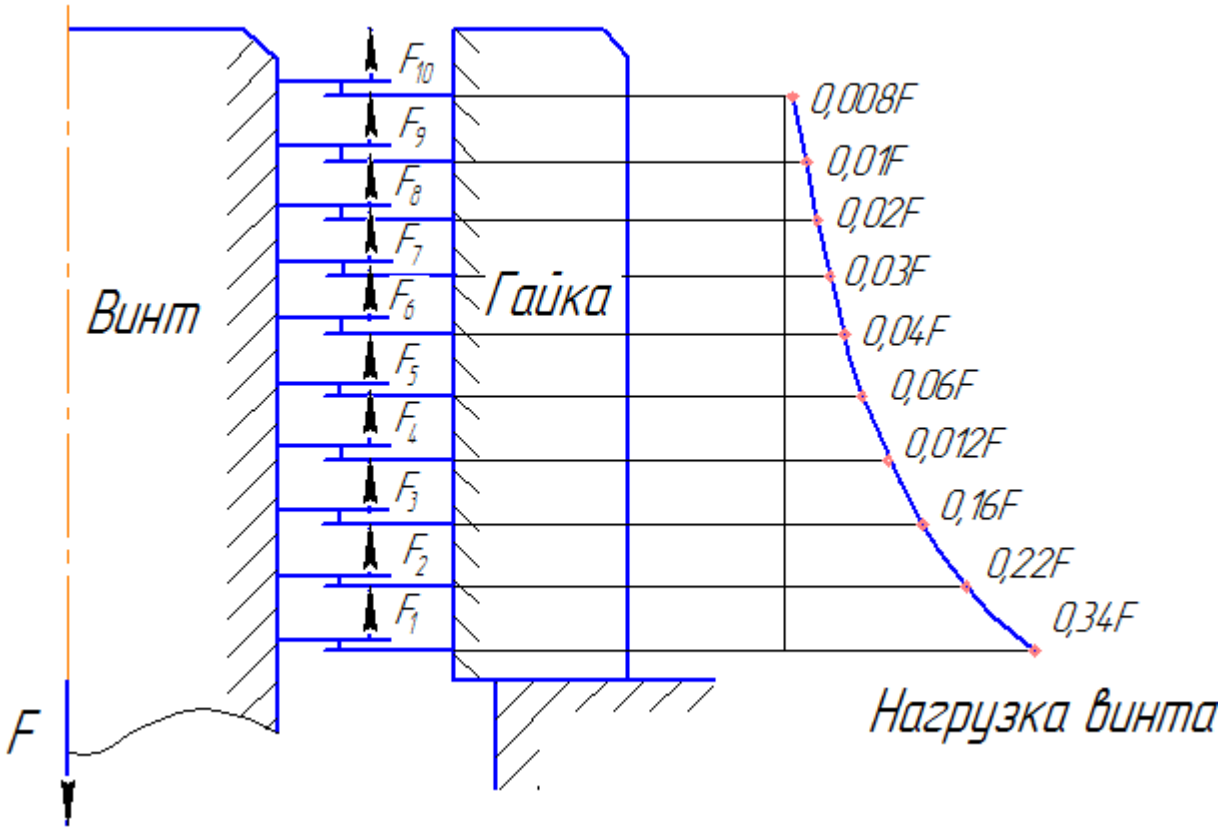


Рисунок 1.1 – График распределения нагрузки по виткам резьбы [1]

Чтобы обеспечить конструктивную прочность резьбового соединения в тонколистовых заготовках, достаточно лишь 3-4 витков резьбы, на которые приходится до 70% нагрузки. При обработке тонкостенных заготовок (до 2,0 мм), их толщина не позволяет нарезать необходимое количество витков резьбы, что приводит к недостаточной прочности резьбового соединения. В таких случаях применяют несколько способов повышения длины свинчивания. В основном это методы пластического деформирования: штамповка в закрытых штампах, пробивка, механическое воздействие специальным инструментом.

Для повышения прочности резьбового соединения в тонколистовых заготовках применяют следующие меры:

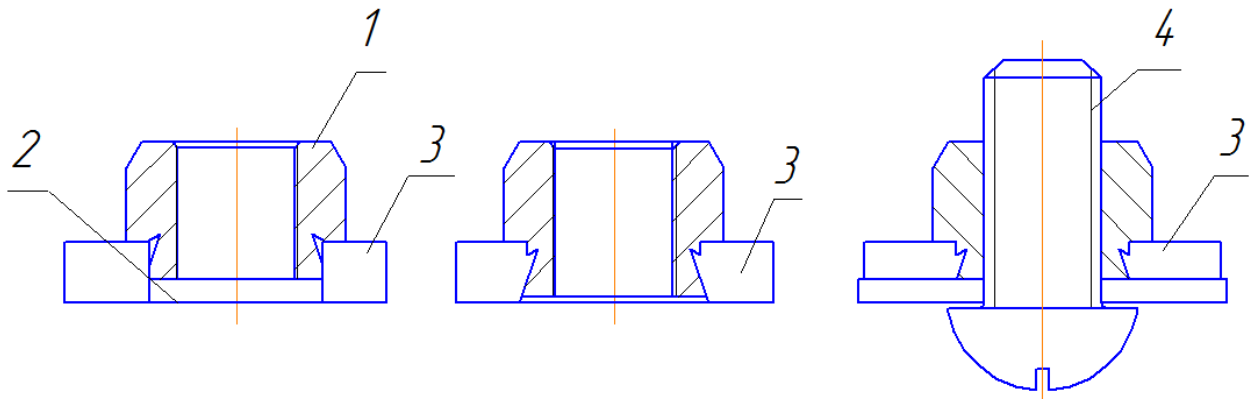
1. Увеличение длины свинчивания за счет запрессовочного крепежа.

Крепёж для тонколистовых материалов позволяет образовать на тонком листе соединение с внутренней или наружной резьбой. Создаётся надёжное соединение с основным материалом.

Запрессовочный крепёж обеспечивает соединение конструкции гайками и винтами, которые можно заменять в процессе эксплуатации. Это свойство позволяет повысить эффективность производства, а также использовать сложные конструкции из тонких листов, в том числе и закрытые детали. Существует несколько основных видов рассматриваемого крепежа – с помощью запрессовываемых втулок, шпилек, гаек:

а) запрессовываемая резьбовая втулка представляет собой соединительный элемент с внутренней резьбой, устанавливаемый в тонком листе прессованием.

В начале направляющий конец втулки 1 вставляется в предварительно пробитое отверстие 2 (рисунок 1.2, а), затем запрессовывается до тех пор, пока головка втулки не коснется листа 3 (рисунок 1.2, б) и после этого устанавливается винт 4 с противоположной стороны запрессовываемого изделия (рисунок 1.2, в) [2].



а) б) в)

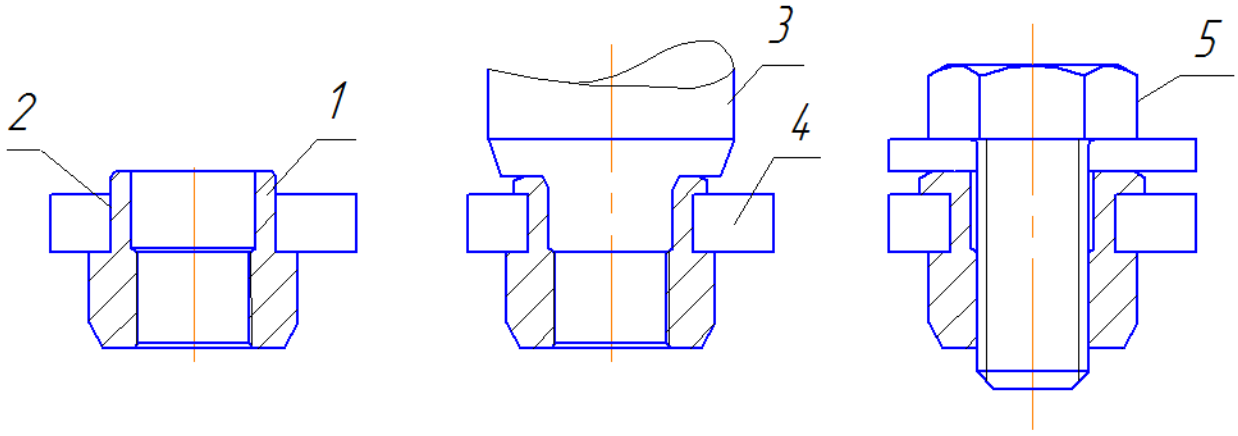
Рисунок 1.2 – Установка запрессовываемых втулок: 1 – втулка, 2 – пробитое отверстие, 3 – лист, 4 - винт [2]

Такие запрессовываемые изделия легко устанавливаются без специального инструмента, метод применим как для тонких твердых материалов, так и для алюминия, магния и пр. Но запрессовочный крепеж обладает и рядом

недостатков: снижается производительность за счет предварительной пробивки отверстия, которое должно быть без заусениц (шероховатостей), требуются сложное оборудование и оснастка для прессования втулки и не всегда имеется достаточно места для такого процесса;

б) гайки заклепочного типа с внутренней резьбой и фланцем с зубчатой накаткой также позволяют увеличить длину свинчивания за счет запрессовочного крепежа. Суть заключается в том, что при установке фланец заклепывается вокруг отверстия и нарезка зубьев впрессовывается в основной материал, гарантируя высокопрочное соединение.

Гайка 1 вставляется в предварительно пробитое отверстие 2 (рисунок 1.3, а), затем плавно впрессовывается в лист 4 правильно подобранным инструментом 3 (рисунок 1.3, б) и после этого с противоположной стороны устанавливается крепеж 5 (рисунок 1.2, в) [2].



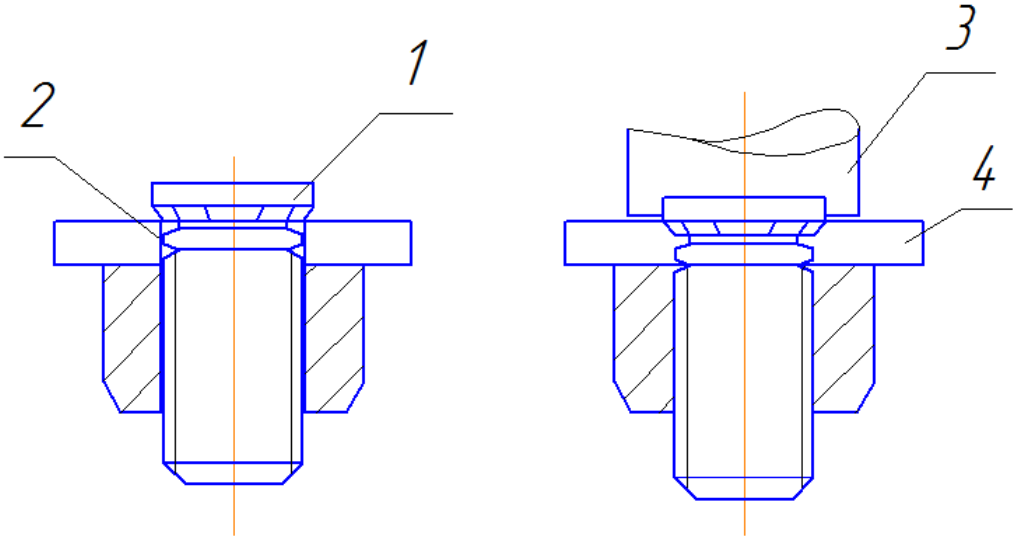
а) б) в)

Рисунок 1.3 – Установка запрессовываемых гаек: 1 – гайка, 2 – пробитое отверстие, 3 – лист, 4 – пуансон, 5 – болт [2]

Применение такого крепежа для тонких (с толщиной до 6 мм) и твердых материалов, а также для алюминия, легкого металла, магния и т. д. является важным преимуществом, но дополнительная пробивка отверстия, выбор заклепочного инструмента и использование пресса делает данный метод дорогостоящим и часто не целесообразным;

в) запрессовываемые шпильки представляют собой соединительные элементы с наружной резьбой, устанавливаемые в тонком листе прессованием. При установке паз и нарезка головки запрессовываемого крепежа деформируют материал тонкого листа, получая прочное соединение. Запрессовывание осуществляется с нагрузкой, при которой головка плавно вдавливается в отверстие. Она регулируется в зависимости от материала листа и размеров втулок.

Шпилька 1 вставляется в предварительно пробитое отверстие 2 (рисунок 1.4, а), затем плавно впрессовывается в лист 4 правильно подобранным инструментом 3 (рисунок 1.3, б).



а) б)

Рисунок 1.4 – Установка запрессовываемых шпилек: 1 – шпилька, 2 – пробитое отверстие, 3 – пуансон, 4 – лист [2]

Такие шпильки имеют ряд преимуществ: легкая установка прессованием, высокий крутящий момент, аккуратное соединение, ровная поверхность противоположной стороны соединения. Но при некоторых вариантах установки, в зависимости от размера запрессовываемого крепежа и толщины тонкого листа, необходимо выполнить зенкование. Зенкование необходимо для запрессовываемых шпилек с размерами меньше М5, при установке в тонком листе менее 1,5 мм. Запрессовываемым шпилькам больше М6 требуется зенкование, если толщина тонкого листа менее 2,5 мм. Также недостатками являются

необходимость пробивки отверстия, выбор специального инструмента и использование пресса.

2. Увеличение длины свинчивания за счёт приваривания втулки.

Приварная резьбовая втулка является одним из видов установочного крепежа, т.е. служит для создания предварительно установленного резьбового соединения на листовой или массивной заготовке. Надежность крепления втулки обеспечивается приваркой – характеристики на отрыв, кручение и сдвиг приварного крепежа выше, чем у запрессовочного. Еще одно неоспоримое преимущество, которое определяет область применения приварной втулки - возможность установки (приварки) в труднодоступных местах сложных и стационарных корпусных конструкций, а также любых массивных изделий [4]. Способ также позволяет увеличить длину свинчивания в два и более раза, но все-таки обладает малой производительностью, поскольку требуется сложное оборудование и технологическая оснастка для изготовления и приваривания втулки (рисунок 1.5).

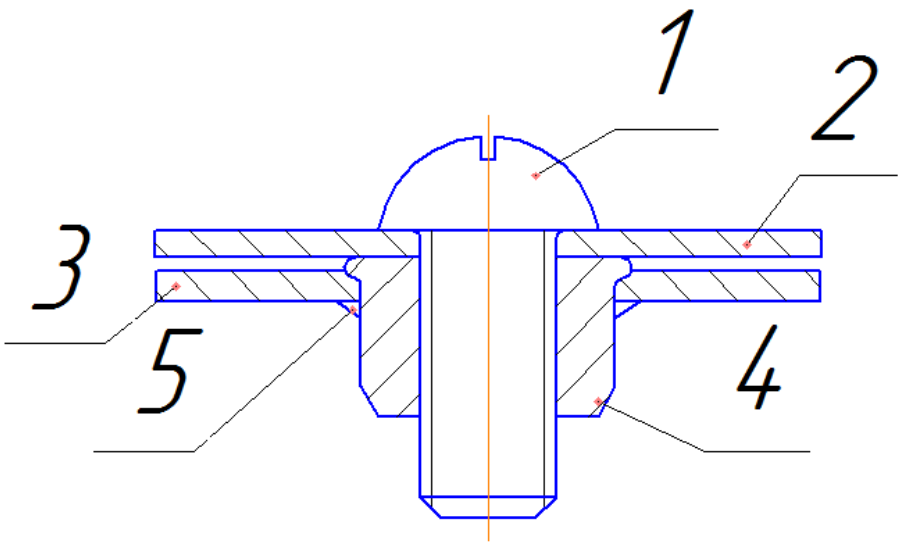


Рисунок 1.5 – Увеличение длины свинчивания за счет приваривания втулок: 1 – винт, 2 – лист, 3 – лист, 4 – втулка, 5 – сварной шов

3. Увеличение длины свинчивания за счет гибки листового материала.

Физика процесса гибки базируется на естественной пластичности (ковкости) металлов и сплавов. Под воздействием точно рассчитанных нагрузок можно изменить геометрию листового проката, который гнут в холодном состоянии, используя для этих целей прессы или механические приспособления.

Гибке подвергаются только пластичные материалы при этом в металле возникают значительные напряжения и деформации. Существуют наружные, внутренние и нейтральные слои, которые в процессе гибки растягиваются, сжимаются и не изменяются соответственно. Поэтому для получения ровных краев и нужных размеров изогнутой детали ее края после гибки запиливают. Помимо этого, в процессе гибки несколько искажается и сечение металла: у наружных волокон оно сужается, у внутренних — расширяется. Это требует дополнительно осадить металл, чтобы выровнять полученную деформацию поперечного сечения [3]. Все вышеперечисленное говорит о том, что данный метод хоть и увеличивает длину свинчивания в два и более раза, но имеет низкую производительность и повышенный расход металла (рисунок 1.6).

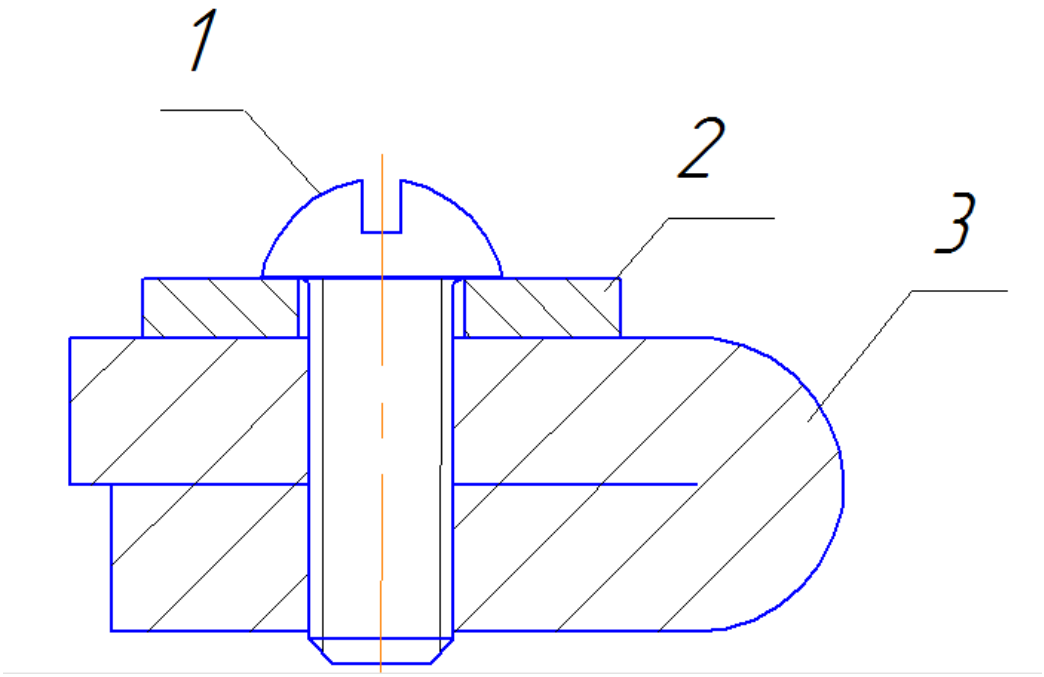


Рисунок 1.6 – Увеличение длины свинчивания за счет гибки листового металла: 1 – винт, 2 – накладка, 3 – заготовка

4. Увеличение длины свинчивания за счёт получения отверстия с отбортовкой.

Отбортовка отверстий широко используется в штамповочном производстве, заменяя операции вытяжки, с последующей вырубкой дна. Деформация металла при отбортовке характеризуется изменением радиально-кольцевой сетки, нанесенной на заготовку (рисунок 1.7) [8].

Традиционной схемой деформирования является отбортовка перемещающимся пуансоном (рисунок 1.8). В очаге деформации возникает двухстороннее растяжение. При приложении сжимающего усилия к торцу отбортовываемого отверстия за счет возникновения в радиальном направлении интенсивных сжимающих напряжений удается в значительной степени компенсировать влияние растяжения в тангенциальном направлении на процесс деформирования.

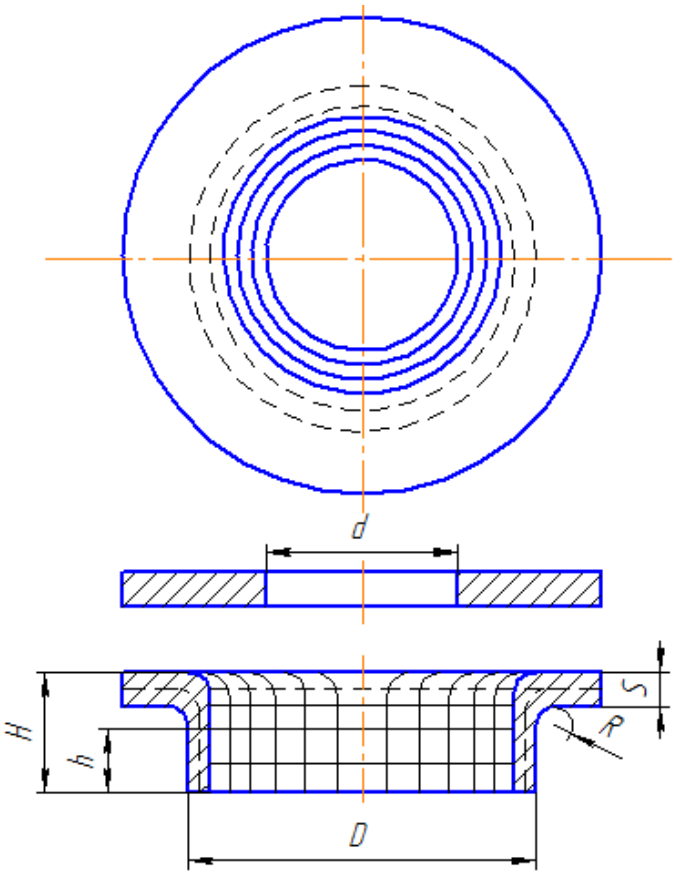


Рисунок 1.7 – Схема отбортовки [5]

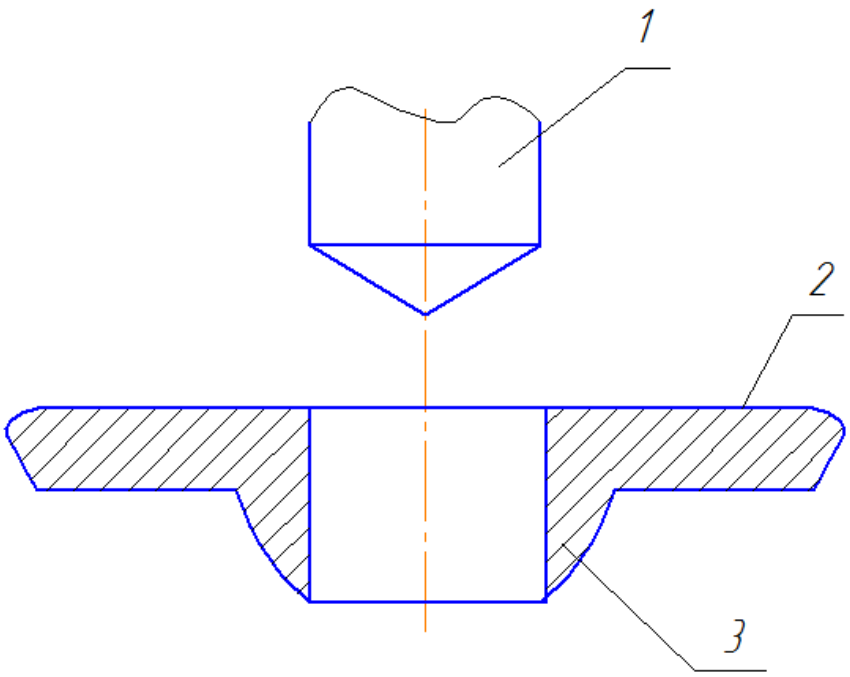


Рисунок 1.8 – Отбортовка перемещающимся пуансоном: 1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – борт

Операция с получением отбортовки является одной из наиболее распространенных и трудоемких. Ее выполнение требует практических навыков, а также знаний технологических свойств, термической обработки металлов и сплавов.

5. Увеличение длины свинчивания за счет получения отверстий с отбортовкой с утонением стенок [5].

В различных отраслях промышленности (электротехника, радиотехника, приборостроение) применяется штамповка деталей, имеющих отверстия с высокими цилиндрическими стенками. В этом случае применяются операции отбортовки с утонением стенок, так как при простой отбортовке для образования большого цилиндрического борта не хватило бы площади заготовки. При этом обычно достигается значительная экономия металла.

Отбортовка под резьбу в тонких материалах (до 2 мм) иногда осуществляется без предварительной пробивки отверстия, получаемого одновременно с рассматриваемым процессом. В некоторых неответственных

случаях допускается изготовление рваного борта путем прокола материала острым пуансоном. Этот же способ применяется для соединения деталей из тонкого материала (до 0,6 мм) вместо соединения заклепками, а также для получения отверстий с загнутыми кромками.

На практике применяются следующие способы отбортовки: 1) мелких отверстий пуансоном с заостренной или сферической формой конца (рисунок 1.9); 2) средних отверстий ступенчатым пуансоном с кольцевыми выступами постепенно, что увеличивает диаметр, причем первая ступень делает только отбортовку допустимой величины, а следующие кольцевые выступы делают постепенное утонение и увеличение высоты борта; 3) больших отверстий в две операции – отбортовка и протягивание (если недостаточно величины хода пресса).

Рассматриваемый процесс является более целесообразным вследствие большей устойчивости пластической деформации металла и отсутствия разрыва и трещин, так как в процессе утонения возникает более благоприятное напряженное состояние с появлением значительных сжимающих напряжений. Это позволяет вести отбортовку при смягченных «безопасных» коэффициентах, а высоту борта получить за счет максимально допустимого утонения материала. Однако усилие, необходимое для отбортовки с истончением, значительно выше, чем при отбортовке без истончения (при том же коэффициенте), причем оно возрастает пропорционально увеличению истончения. Поскольку при этом в матрице возникает боковое давление большой величины, то для увеличения прочности матрицы рекомендуется спрессовывание их в наружную обойму [5].

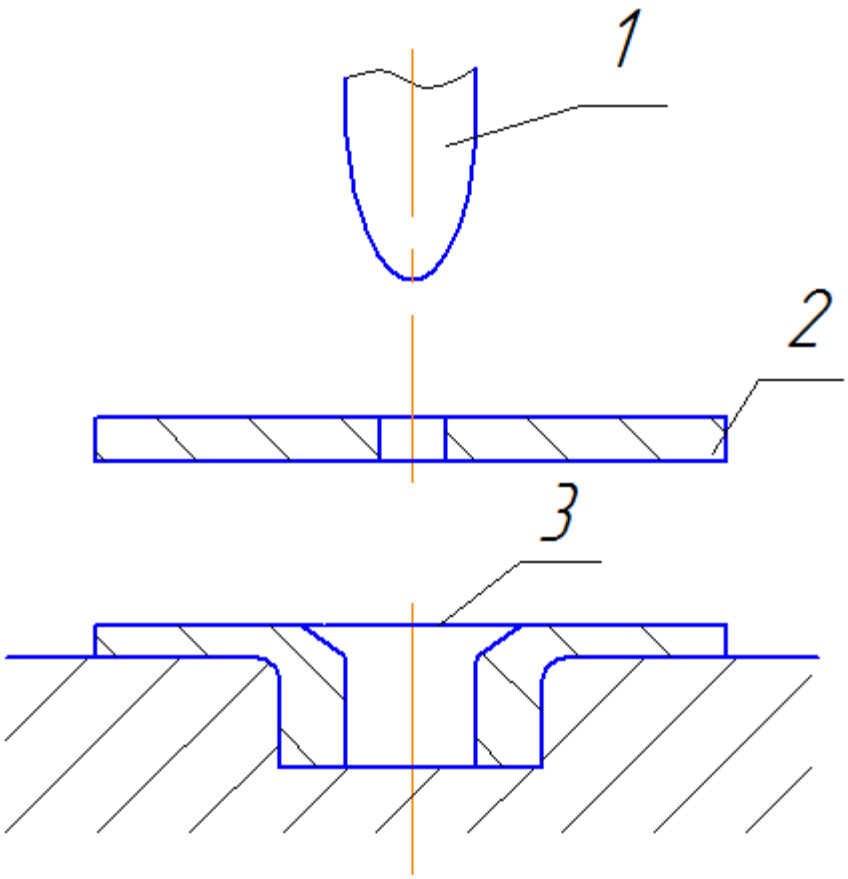


Рисунок 1.9 – Отбортовка с утонением: 1 – пуансон, 2 – заготовка, 3 – отверстие

6. Увеличение длины свинчивания резьбы методом холодной объемной штамповки в закрытых штампах (рисунок 1.10).

При холодной объемной штамповке высота отверстия образуется за счет выдавливаемого пуансоном материала, который перераспределяется в кольцеобразной полости, в глухой матрице. Таким образом, материал из зоны отверстия полностью расходуется на образование бурта. Остающаяся на дне отверстия пленка пробивается метчиком при нарезании резьбы. Недостатками этого способа являются необходимость предварительной подготовки производства (изготовление штампа), необходимое прессовое оборудование и оснастка. Кроме того, этим способом невозможно увеличение длины свинчивания в замкнутом профиле.

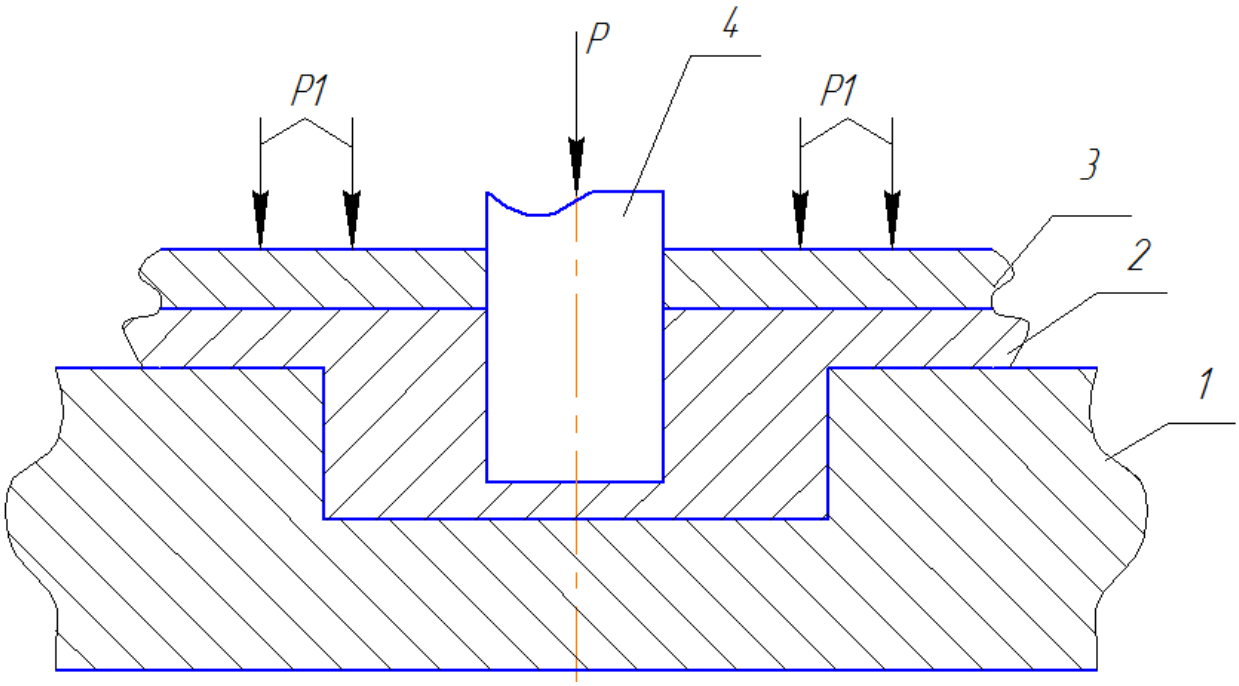


Рисунок 1.10 – Увеличение длины свинчивания резьбы методом холодной объемной штамповки в закрытых штампах:1 – штамп; 2 – заготовка; 3 – пластина; 4 – пуансон

Все вышеперечисленные методы увеличения длины свинчивания резьбы в тонколистовых заготовках недостаточно технологичны и экономически не оправдывают себя. Также ни один из представленных способов не пригоден для формирования отверстия в замкнутом объёме и в труднодоступных местах. Решением данной проблемы может стать способ увеличения длины свинчивания в отверстиях под резьбу в тонколистовых заготовках за счёт пластического деформирования листовой заготовки вращающимся пуансоном.

1.2 Формообразование отверстий с отбортовками вращающимся пуансоном

Отбортовка – операция получения борта отверстия или края изделия путём отгибания от первоначальной плоскости части заготовки со значительной деформацией на кромке, образующей вершину борта. Деформация на кромке 2 (рисунок 1.11) значительно превосходит деформацию в зоне 1 непосредственного отгибания от первоначальной плоскости. Поэтому образование трещин,

лимитирующее возможное расширения исходного отверстия, начинается именно на кромке 2.

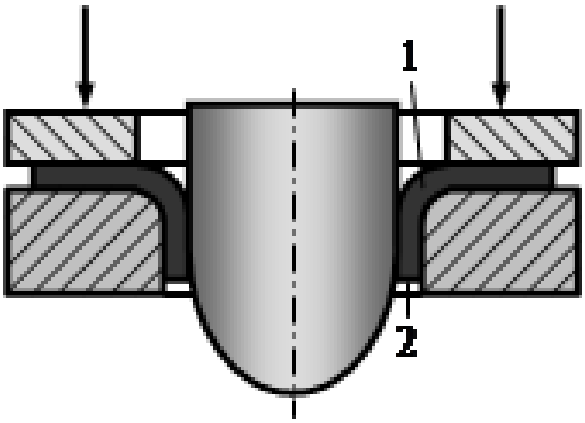


Рисунок 1.11 – Схема процесса отбортовки с зазором между пуансоном и матрицей, равным толщине обрабатываемого материала

Сущность метода получения отверстия с отбортовками вращающимся пуансоном пластическим деформированием [6, 7] заключается в следующем (рисунок 1.12): вращающийся инструмент, имеющий коническую или другую форму рабочей части, с некоторым осевым усилием воздействует на листовую заготовку. В результате трения в зоне контакта выделяется тепло, которое нагревает заготовку. При движении инструмента вдоль оси вращения, разогретый до пластического состояния металл начинает течь вверх, принимая форму кольца (верхняя отбортовка). При дальнейшем движении инструмента, вытягиваемый металл прошивается и цилиндрическая часть инструмента формирует внутренний диаметр отверстия и нижнюю отбортовку заготовки. Сформированные таким образом в листовой заготовке отбортовки образуют с заготовкой единое целое и могут быть использованы для последующего нарезания в ней резьбы.

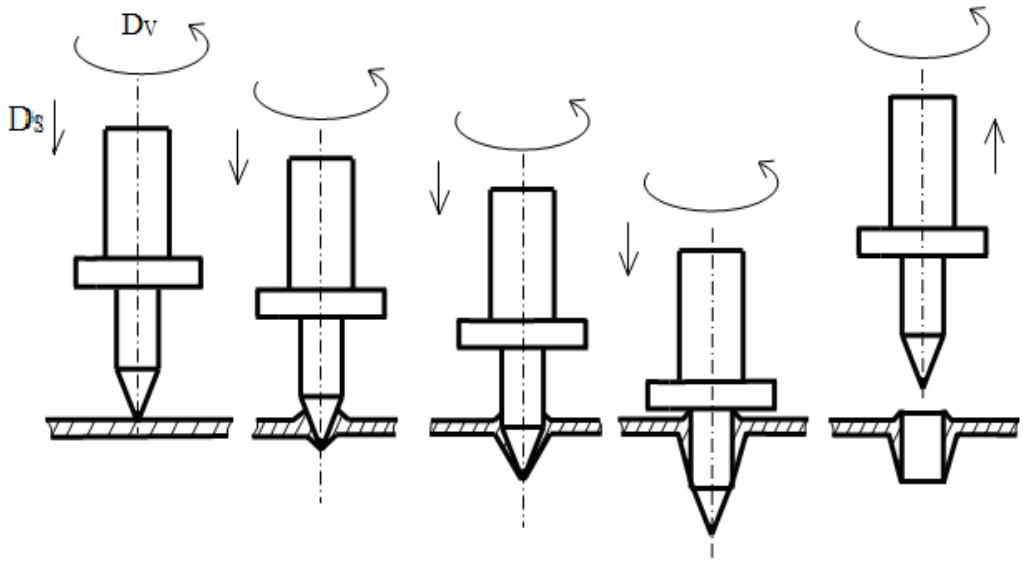
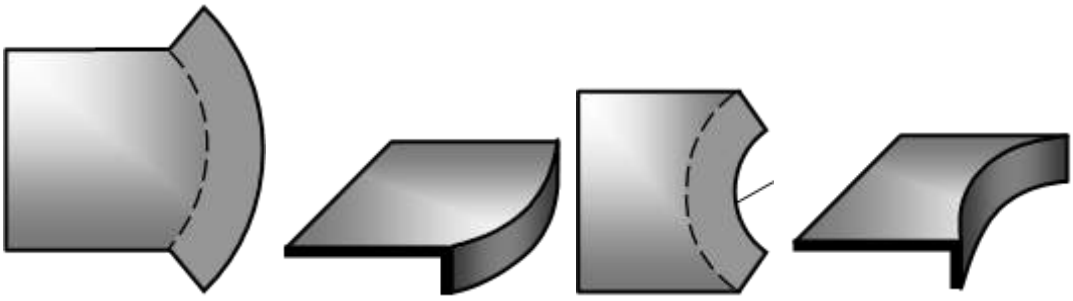


Рисунок 1.12 – Схема получения отбортовок пластическим деформированием: D_V – осевое вращение инструмента, D_S – движение инструмента

Следует указать, что отбортовывать можно не только отверстия или края круглой формы, но и любой иной, например, прямоугольной или шестигранной. Кроме того, отбортовываемый контур может быть и незамкнутым (рисунок 1.13, а, б). В случае незамкнутой краевой отбортовки различают отбортовку с получением выпуклого борта (рисунок 1.13, в) и отбортовку с получением вогнутого борта (рисунок 1.13, г).



а) б) в) г)

Рисунок 1.13 – Незамкнутая краевая отбортовка: а) контур исходной заготовки для получения выпуклого борта; б) изделие, полученное отбортовкой выпуклого контура; в) контур исходной заготовки для получения вогнутого борта; г) изделие, полученное отбортовкой вогнутого контура

В отечественной литературе приведены многочисленные исследования области применения данной операции отбортовки, пуансона, заготовительного материала, также приведен ряд способов получения отверстий с отбортовками вращающимся пуансоном. Об отбортовке выпуклого или вогнутого контура изложено в работе [8]. Помимо этого, предложены детали и схема штампа для наружной и внутренней отбортовки, выполненные в одну операцию. Такой штамп может быть установлен как на кривошипных, так и на гидравлических прессах.

В работе [9] описан характер износа матрицы и пуансона в процессе операции отбортовки. Так, при отбортовке отверстий без утонения износу подвергается главным образом кромки закругления матрицы, несколько меньше стенки отверстия ее. Более сильному износу подвергается отбортовочный пуансон, который в случае отбортовки малых отверстий подвергается также и продольному изгибу.

Усовершенствование инструмента в плане износа, геометрии и материала описано в работе [10], где предложен детонационный способ теплоизолирующего керамического покрытия оксида алюминия, и затем износостойкое твердосплавное покрытие (ВК-12). Новый инструмент позволяет повысить производительность обработки деталей за счет уменьшения отвода тепла из зоны обработки через инструмент в шпиндель станка. Исследовано влияние геометрии инструмента на технологические режимы пластического сверления. Установлено, что с увеличением угла расширяющей части пуансона и ростом радиуса закругления вершины наблюдается увеличение длительности обработки, повышение температуры детали в процессе сверления и уменьшение момента трения. Также проведено исследование влияния коэффициента заполнения ствола горючей смесью при детонационном напылении на износостойкость и структуру твердосплавных покрытий и влияние угла заострения расширяющей части инструмента на параметры пластического сверления. В результате исследования разработаны экспериментальная установка и методика, позволяющие исследовать технологические режимы пластического сверления с возможностью

одновременной регистрации осевой нагрузки, момента трения, осевого перемещения и температуры в области деформации, исследовано влияние технологического режима детонационного напыления на свойства твердосплавного покрытия и выбран оптимальный коэффициент заполнения ствола детонирующей смесью – 60%, обеспечивающий максимальную износостойкость покрытия, установлено, что с увеличением угла расширяющей части и радиуса закругления вершины инструменты возрастает длительность формирования отверстия и уменьшается момент трения при сверлении. Автор утверждает, что отверстия, получаемые методом пластического сверления, имеют высокий класс чистоты, достигающий Ra 0,4 (8-9 класс шероховатости по ГОСТ 2789-59). Квалитет получаемых отверстий Js9. Показано, что при изготовлении пуансонов для пластического сверления целесообразно обеспечивать высокую чистоту калибрующей части (отвечающей за чистоту поверхности) и высокую шероховатость расширяющей части (отвечающей за производительность сверления).

Из научно-технической литературы известно, что отбортовка отверстий это операция, применяемая в технологии производства нефтяного аппаратостроения. В работе [11] описывается процесс отбортовки горловин в корпусах цилиндрических аппаратов под приварку штуцеров. Процесс заключается в том, что на цилиндрический корпус ставят матрицу, закрепленную на столе пресса. При этом рабочий шток и шток прижима находятся в крайнем нижнем положении, обеспечивая свободное перемещение корпуса до совмещения его отверстия под отбортовку с осью матрицы. Затем в корпус заводят приспособление. Рабочий шток входит в отверстие под отбортовку, и с помощью полуколец пуансон и прижим (через приспособление) соединяются соответственно с рабочим штоком и штоком прижима.

В работе [12] предложен новый способ изготовления отбортовок в тонколистовых заготовках вращающимся пуансоном. Сущность способа заключается в использовании теплоты трения, возникающей при контакте

инструмента с заготовкой. Рабочая часть пуансона имеет коническую форму. Предварительно в заготовке просверливается отверстие. В результате осевого перемещения вращающегося пуансона в заготовке образуется отверстие с бортами, высота которых составляет около четырёх толщин заготовки. Способ рекомендуется применять для изготовления отбортованных отверстий в заготовках толщиной 0,3-2,0 мм. Наряду с описаниями вышеприведённых способов приводятся их модели. Автором предложено уравнение для определения частоты вращения пуансона с учётом разности температур на верхней и нижней поверхностях заготовки, осевой силы, коэффициента трения и угла конусности инструмента. Необходимо отметить, что в предложенное уравнение входит разность температур на верхней и нижней поверхностях заготовки. Однако эта разность из-за существенной теплопроводности материала будет незначительной и практически не влияющей на процесс формообразования отверстия при толщинах заготовки 0,3-2,0 мм. Кроме того, входящий в уравнение коэффициент трения для процесса формообразования отверстий вращающимся пуансоном неизвестен, что не позволяет вести практические расчёты.

В работе [13] было проведено исследование, связанное с применением комбинированного инструмента в формообразовании отверстий с отбортовками. Его режущая кромка пробивной ступени незамкнута и участок торца, на котором она расположена, выполнен выступающим относительно участка, на котором ее нет (односторонняя плоская фаска или радиус 5 мм). В месте ее расположения в заготовке создаются условия для преобладания пластической деформации и скалывающие трещины не образуются, поэтому здесь образуется перемычка, связывающая отделяемую часть – отход с заготовкой. При дальнейшем движении отход отгибается и осуществляется отбортовка, при этом отход остается на торце борта. После процесса этого отход удаляют при механической обработке борта, например, при нарезке резьбы.

В работе [14] автор провел исследования в этой малоизученной области для заготовок толщиной меньше 2 мм и решил следующие задачи:

1) определение технологических параметров, существенно влияющих на формообразование и размеры отверстий;
2) численное моделирование механизма формообразования отверстий;
3) определение взаимосвязи геометрических параметров отверстия с длиной свинчивания и прочностью резьбового соединения на срез;
4) разработка методики по использованию способа формообразования отверстий в производстве.

После ознакомления с вышеперечисленными исследованиями можно выделить следующие замечания:

– не изучено применение комбинированного инструмента с двумя рабочими частями в формообразовании отверстий с отбортовками;

– большинство исследований проводились с заготовками толщиной более 2 мм;

– исследования проводились только к одному материалу заготовок;

– не рассмотрено применение принудительной подачи инструмента;

– не рассмотрено влияние углов заточки инструмента на технологические параметры операции и на геометрию получаемых отбортовок.

Фирма Formdrill использует данный метод, который называется термическим сверлением Formdrill (рисунок 1.14). Суть действия заключается в том, что при вращательном и поступательном движении наконечника возникает трение, которое нагревает инструмент и заготовку до высокой в несколько сотен градусов температуры. Естественно, такая температура может вызвать перегрев, чтобы подобного не происходило используется специальный цанговый патрон с охлаждающим радиатором.

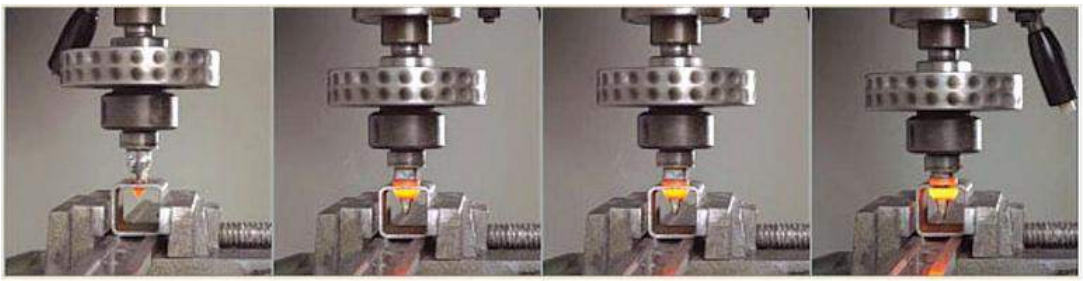


Рисунок 1.14 – Процесс термического сверления Formdrill

Анализ литературных источников показал, что способ формообразования отверстий с отбортовками вращающимся пуансоном в листовых заготовках для нарезания резьбы является наукоемкой областью, исследования которой имеют широкое применение в промышленности.

1.3 Цель и задачи исследования

В процессе термического сверления в заготовке вокруг формируемого сквозного отверстия с обеих сторон образуются кольцевые буртики. Основным инструментом в процессе пластического формирования отверстия является специальный инструмент. Он может использоваться на любом сверлильном, фрезерном станке или обрабатывающем центре с ЧПУ. В сочетании с главным вращательным и поступательным движением подачи наконечника за счет трения о заготовку происходит нагрев инструмента и заготовки до высоких температур, которые могут достигать 900°С для инструмента и 700°С для заготовки. Благодаря высокой температуре материал заготовки становится пластичным, позволяя инструменту сформировать в тонкой стенке с обеих сторон кольцевой буртик, который в 3 раза больше первичной толщины металла. Таким образом, сформированные буртики идеально подходят для накатывания в них резьбы, так как получаемое количество витков и допускаемая нагрузка на резьбу значительно увеличиваются. Это является прекрасной альтернативой приваренным гайкам и резьбовым вставкам.

Простота, универсальность и долговечность инструмента и оснастки, отсутствие образования стружки при термическом сверлении позволяет эффективно применять данную технологию как при массовом производстве на автоматизированном оборудовании, а так и при опытных единичных испытаниях.

Цель работы: определение взамосвязи режимов формообразования отверстий вращающимся пуансоном с параметрами полученных отбортовок в тонколистовых заготовках толщиной 2,0 мм для обеспечения необходимой длины свинчивания и прочности резьбового соединения.

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

1) установить возможность получения отверстий под резьбу М8…М9 в заготовках толщиной 2 мм термическим сверлением;

2) определить рациональную форму инструмента;

3) определить влияние частоты вращения инструмента на время операции, осевую силу и температуру в зоне обработки;

4) выявить оптимальные режимы обработки;

5) определить расчетную и фактическую прочность резьбового соединения на срез;

6) определить зависимость геометрических параметров отбортовок от частоты вращения инструмента;

7) провести регрессионный анализ зависимости времени обработки от частоты вращения инструмента и осевой силы.

2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ С ОТБОРТОВКАМИ ВРАЩАЮЩИМСЯ ПУАНСОНОМ В ТОНКОЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВКАХ

В данной главе приводится методика изготовления инструмента и заготовок, описание экспериментальной установки, последовательность проведения экспериментов, результаты и выводы по ним. Также описано моделирование процесса и проверка модели на адекватность.

2.1 Методика изготовления инструментов и заготовок

Из твердосплавного столбика марки ВК 6 ГОСТ 3882-74 (рисунок 2.1) был изготовлен пуансон диаметром 8 мм для изготовления отверстий под резьбу М9х1 (рисунок 2.2).

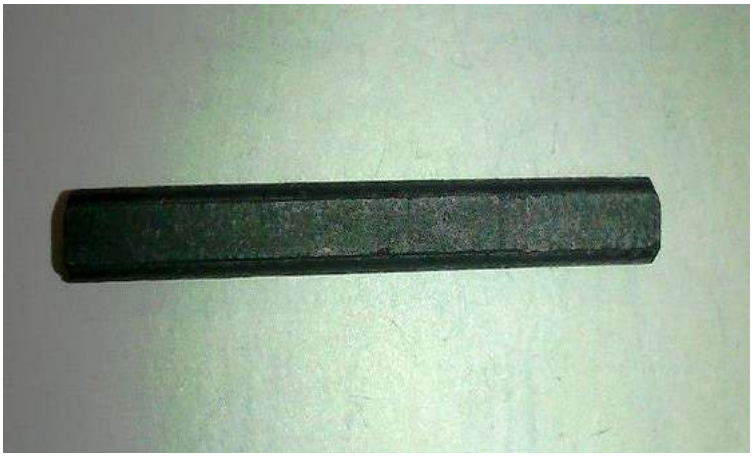


Рисунок 2.1 – Твердосплавный столбик

Рисунок 2.2 – Пуансон

Заточка конусов производилась на универсальном заточном станке 3Е642Е (рисунок 2.3), который предназначен для заточки и доводки основных видов режущего инструмента из инструментальной стали, твердого сплава и металлокерамики абразивными, алмазными и эльборовыми кругами. Данные станки могут быть оснащены приспособлениями, в том числе приспособлениями для плоского, круглого наружного и внутреннего шлифования, и системой отсоса пыли. Станок 3Е642Е имеет гидравлический привод продольного перемещения стола, а также укомплектован системой подачи охлаждающей жидкости.

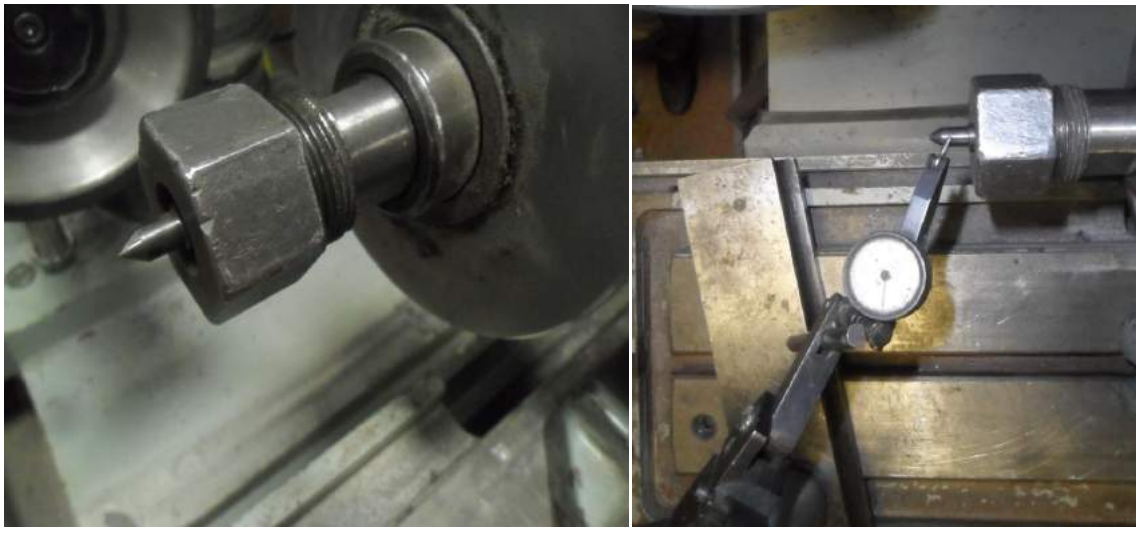
Рисунок 2.3 – Универсальный заточной станок 3Е642Е

В качестве инструмента для заточки был выбран шлифовальный круг, который выпускается в соответствии с ГОСТ 2424-75 (рисунок 2.4) [15]. Шлифовальные круги различаются по абразивному материалу, зернистости, связке, твердости, структуре, форме и размерам. Твердость шлифовального круга характеризуется усилием, которое нужно приложить, чтобы вырвать зерно с поверхности круга. По степени твердости круги делятся на весьма мягкие – ВМ1, ВМ2; мягкие – Ml, М2, М3; средне-мягкие – СМ1, СМ2; средние – СI, С2; средне-твердые – СТ1, СТ2, СТ3; твердые – Tl, Т2; весьма твердые – ВТ1, ВТ2; чрезвычайно твердые – ЧТ1, ЧТ2.

Рисунок 2.4 – Шлифовальный круг

Заготовка закреплялась в цанговый патрон, который обеспечивает наименьшее радиальное биение по сравнению с обычным патроном (рисунок 2.5, а). С помощью измерительной головки установлено значение биения цангового патрона, которое составляет 15 мкм, тогда как у обычного патрона – 30 мкм (рисунок 2.5, б). Также измерялось биение шлифовального круга, оно составило 0,01 мкм. По формуле найдем отклонение общего биения:

$$\Delta об.биения = \sqrt{биение\ патрона^2 + биение\ шлифовального\ круга^2} = 15{,}000003\ мкм$$



а) б)

Рисунок 2.5 – Измерение радиального биения: а) установленный в патроне инструмент; б) измерительная головка

Патрон с пуансоном устанавливался в специальное приспособление, обеспечивающим различные углы поворота инструмента (рисунок 2.6). Затачивался рабочий конус равный 60 градусам и предохранительный конус равный 80 градусам.

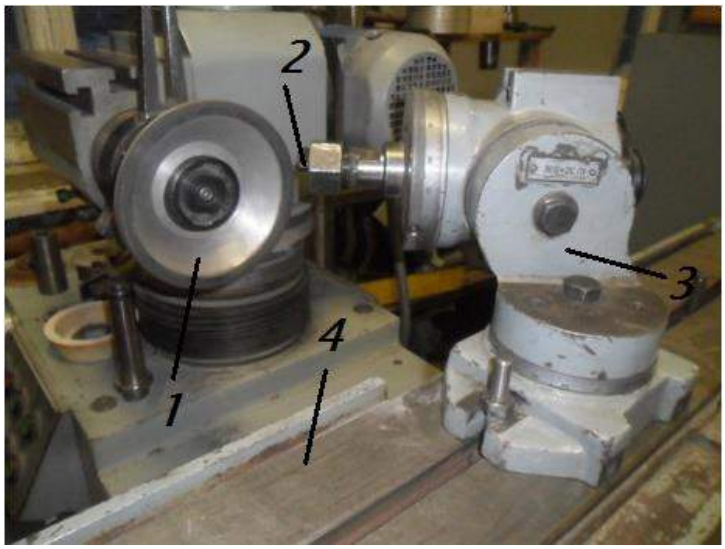


Рисунок 2.6 – Установка для заточки: 1– шлифовальный круг; 2 – затачиваемый инструмент; 3 – поворотное приспособление; 4 – стол для перемещения

На малом инструментальном микроскопе измерялись углы и диаметральные размеры полученного инструмента (рисунок 2.7).

а) б)

Рисунок 2.7 – Измерения на микроскопе: а) микроскоп; б) увеличенное изображение пуансона под микроскопом

Заготовки для формообразования отверстий изготавливались из тонколистового проката марки Ст3сп ГОСТ 380-2005 толщиной 2,0 мм на лазерной установке Bystronic Bystar 4025 (рисунок 2.8).

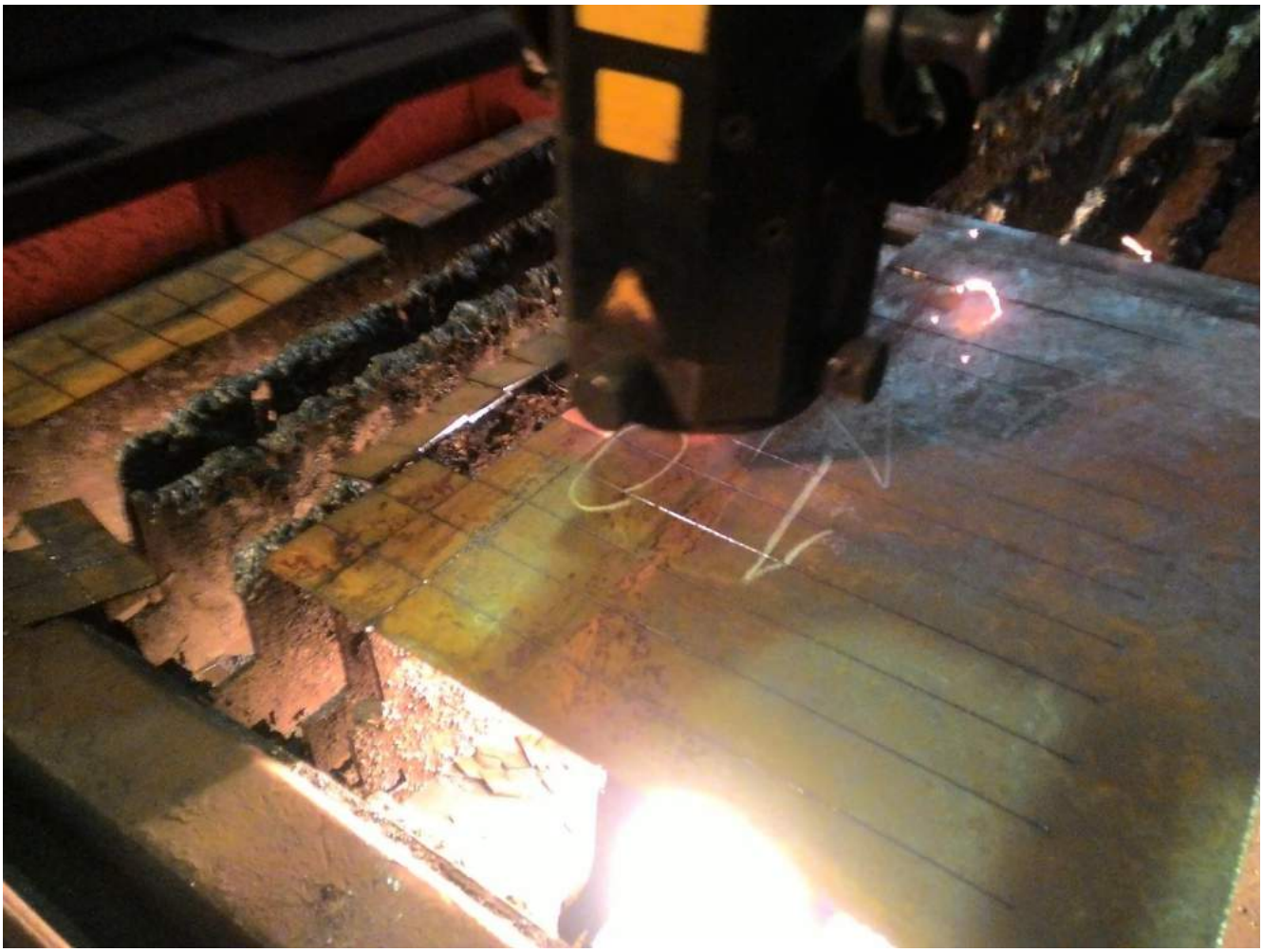
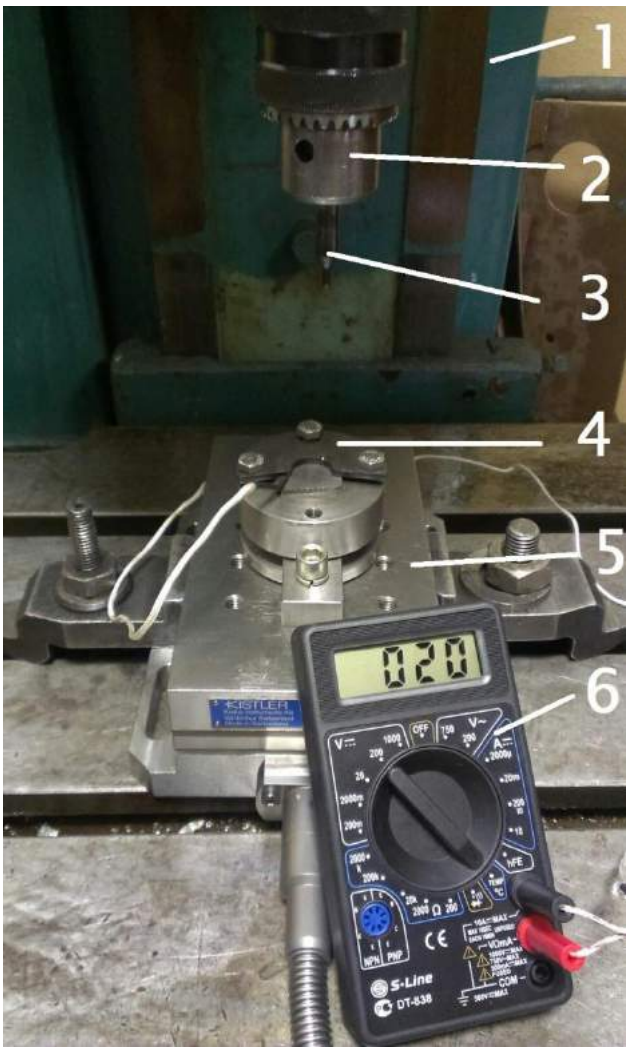


Рисунок 2.8 – Фотография процесса изготовления заготовок на лазерной установке

2.2 Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рисунок 2.9) позволяет определять колебание осевой силы в зоне формообразования отверстий, температуру и время протекания процесса.



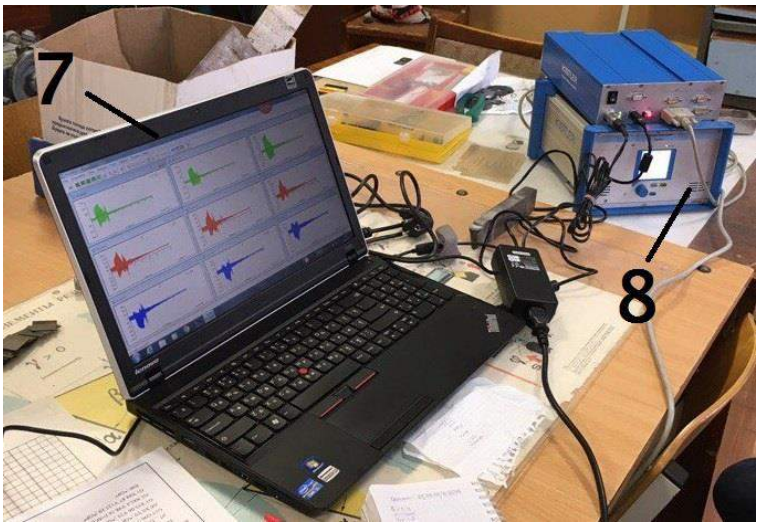


Рисунок 2.9 – Схема и фотография экспериментальной установки:
1 – вертикально-сверлильный станок 2Н125; 2 – патрон; 3 – пуансон; 4 – заготовка (пластина); 5 – динамометр механический; 6 – мультиметр; 7 – ноутбук; 8 – усилитель заряда 5070A Kistler

Опыты проводились на вертикально-сверлильном станке 2Н125. Станки этой модели предназначены для сверления, рассверливания, зенкования, развертывания, нарезания резьбы и применяются в условиях единичного и серийного производства.

Технические характеристики станка:

– Класс точности Н.

– Наибольший диаметр сверления в стали 45 ГОСТ 1050-74, 25 мм.

– Размеры конуса шпинделя по ГОСТ 25557-82 Морзе 3.

– Расстояние от оси шпинделя до направляющих колонны, 250 мм.

– Наибольший ход шпинделя, 200 мм.

– Расстояние от торца шпинделя, мм:

- до стола 60-700.
- до плиты 690-1060.

– Наибольшее (установочное) перемещение сверлильной головки, 170 мм.

– Перемещение шпинделя за один оборот штурвала, 122.46 мм.

– Рабочая поверхность стола, 400х450 мм.

– Наибольший ход стола, 270 мм.

– Установочный размер Т-образных пазов в столе по ГОСТ 1574-75:

- центрального 14Н9.
- крайних 14Н11.

– Расстояние между двумя Т-образными пазами по ГОСТ 6569-75, 80 мм.

– Количество скоростей – 12.

– Пределы частоты вращения шпинделя, 45-2000 мин$^{-1}$.

– Количество подач – 9.

– Пределы подач, 0.1-1.6 мм/об.

– Наибольшее количество нарезаемых отверстий в час – 60.

– Управление циклами работы – ручное.

– Род тока питающей сети – трехфазный.

– Напряжение питающей сети, 380/220 В.

– Габаритные размеры, мм:

- высота 2350;
- ширина 785;
- длина 915.

– Масса станка, т880 кг [16].

При формообразовании отверстий в заготовках фиксировалась осевая сила посредством трехкомпонентного динамометра фирмы Kistler (Швейцария) с рабочей плитой 100х170 мм (рисунок 2.10). Одной из главных особенностей прибора является возможность измерения сил резания в широком частотном диапазоне (от 1 Н до 10 кН). Компактная конструкция позволяет устанавливать динамометр на станки с небольшой рабочей зоной. Герметичность динамометра позволяет производить измерение сил резания при обработке с применением СОЖ.

Рисунок 2.10 – Многокомпонентный динамометр 9257B Kistler

Для фиксирования и преобразования сигнала, поступающего с динамометра, использовался многоканальный усилитель заряда 5070A Kistler для многокомпонентного измерения сил резания – в нормированный токовый или

потенциометрический выход, значение которого проще анализировать с помощью стандартного оборудования (рисунок 2.11). Усилитель дает возможность производить измерения в диапазоне ±200000 пКл в частотном диапазоне 0-20 кГц [17].

Рисунок 2.11 – Многоканальный усилитель заряда 5070A Kistler для многокомпонентного измерения сил резания

Частота вращения шпинделя на станке проверялась с помощью тахометра testo 465 (рисунок 2.12). Тахометр testo 465 используется для бесконтактной диагностики скорости вращения. Скорость вращения определяется путем подсоединения специального рефлектора и направления на него луча прибора. Все результаты отображаются на жидкокристаллическом дисплее. Измеритель имеет небольшие размеры и вес, для удобного пользования и переноски. Пластиковый корпус предохраняет инструмент от непреднамеренных механических воздействий.

Технические характеристики тахометра testo 465:

–Температура хранения тахометра testo 465: -20 ... +70 °C;

– Рабочая температура тахометра testo 465: 0 … +50 °C;

– Электропитание: АКБ АА 2 шт.;

– Ресурс непрерывной работы АКБ: порядка 40 часов;

– Экран: ЖКИ, однострочный;

– Масса тахометра testo 465: 145 г;

– Габариты тахометра testo 465: 144 х 58 х 20 мм;

– Диапазон значений скорости: +1 до +99999 об/мин;

– Разрешение тахометра testo 465 по диапазонам:

- об/мин (+1 ... +99.99 об/мин);
- об/мин (+100 ... +999.9 об/мин);
- об/мин (+1000 ... +99999 об/мин);

– Погрешность: не более ±0.02% измеренного значения [18].

Рисунок 2.12 – Тахометр testo 465

Для измерения температуры применялась термопара с мультиметром (рисунок 2.13). Мультиметр - это универсальный прибор, который совмещает в себе вольтметр, амперметр, омметр. Его еще называют тестер. Технические характеристики мультиметра S-Line DT 838 заключаются в следующем. Напряжение переменное при диапазоне 200 V разрешающая способность 0.1 V, а точность составляет ±1.2%±10D. При диапазоне 700 V, разрешающая способность равна 1 V, а точность ±1.2%±10D.

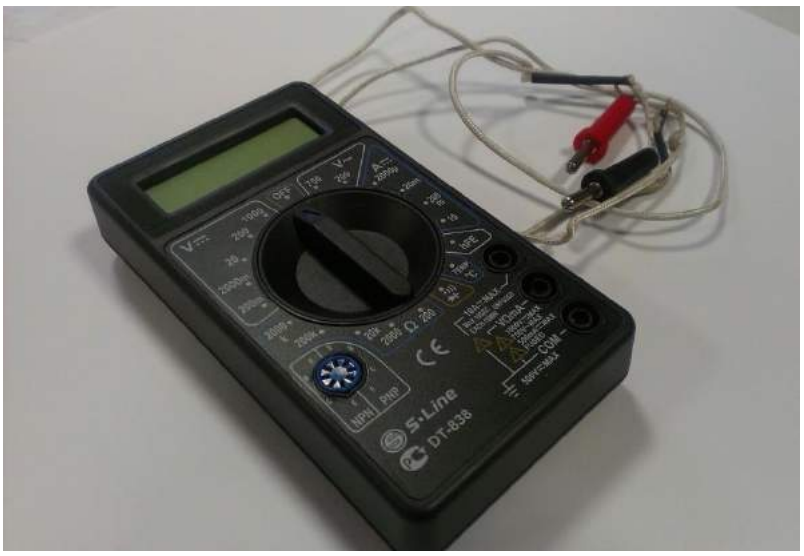


Рисунок 2.13 – Термопара с мультиметром

Для закрепления заготовок на динамометре и для экспериментов на прочность, которые описаны в главе 3, из прутка диаметром 60 мм было выточено приспособление, общий вид которого представлен на рисунке 2.14. Приспособление состоит из основного корпуса, шайбы и хвостовика (рисунки 2.15, 2.16). В корпусе имеются четыре глухих отверстия с резьбой М6х1 под болты для закрепления шайбы, одно основное сквозное отверстие диаметром 12 мм, в котором на половину нарезана резьба М12х2 для свинчивания с хвостовиком (рисунок 2.15), и канавка (рисунок 2.16) для закрепления приспособления на динамометре с помощью прижимов (рисунок 2.17). Основное отверстие также позволяет сверлить закрепленные в приспособлении заготовки на сверлильном станке. Хвостовик предназначен для эзакрепления на универсальной разрывной машине (см. главу 3), представляет собой шпильку длиной 80 мм, на которой на половину нарезана резьба М12х2 для свинчивания с корпусом. Хвостовик закрепляется в корпусе посредством контргайки.

Рисунок 2.14 – Общий вид приспособления для закрепления заготовок на универсальной разрывной машине

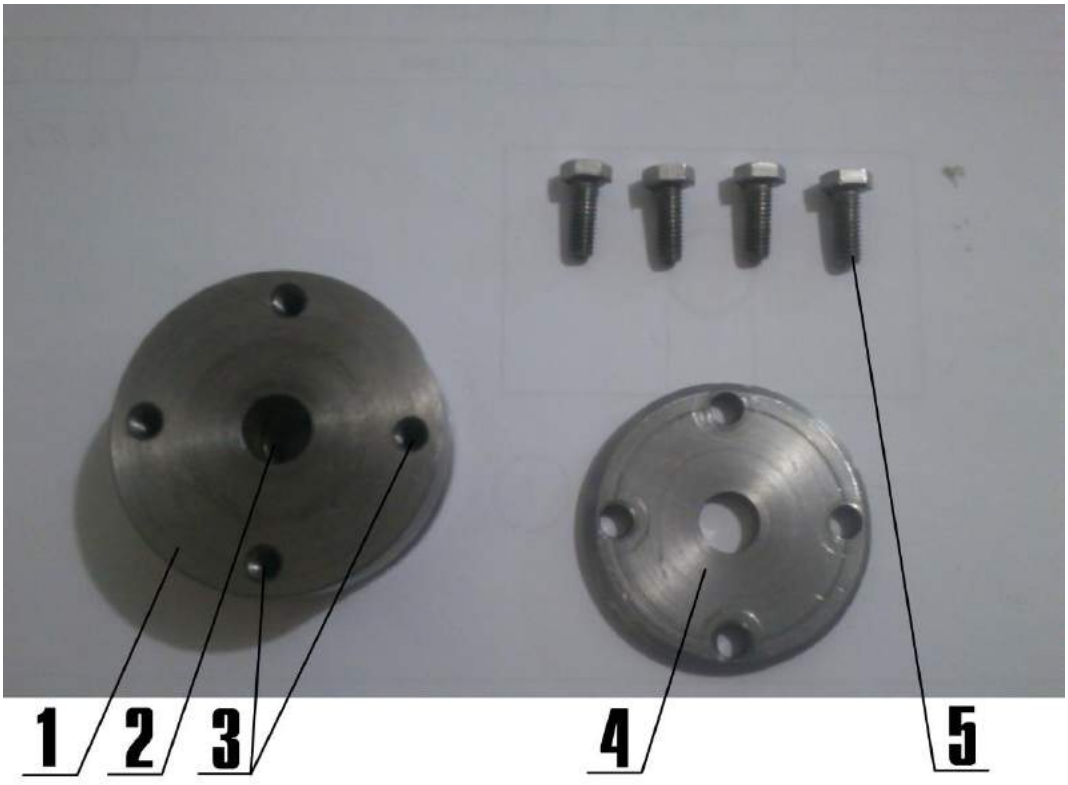


Рисунок 2.15 – Фотография комплектующих и основных элементов приспособления: 1 – корпус; 2 – основное отверстие; 3 – отверстия для закрепления шайбы; 4 – шайба; 5 – болты для закрепления шайбы

Рисунок 2.16 – Фотография приспособления, вид слева

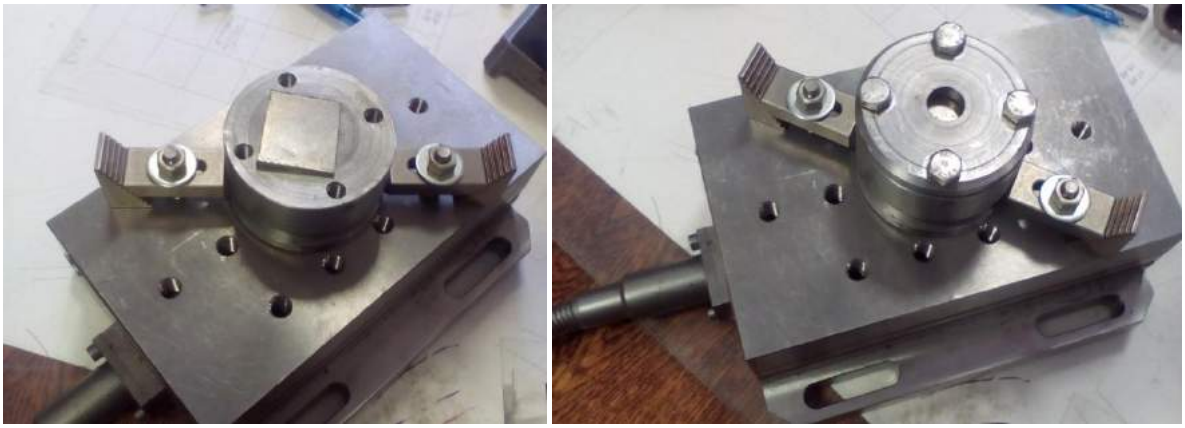


Рисунок 2.17 – Закрепление заготовки

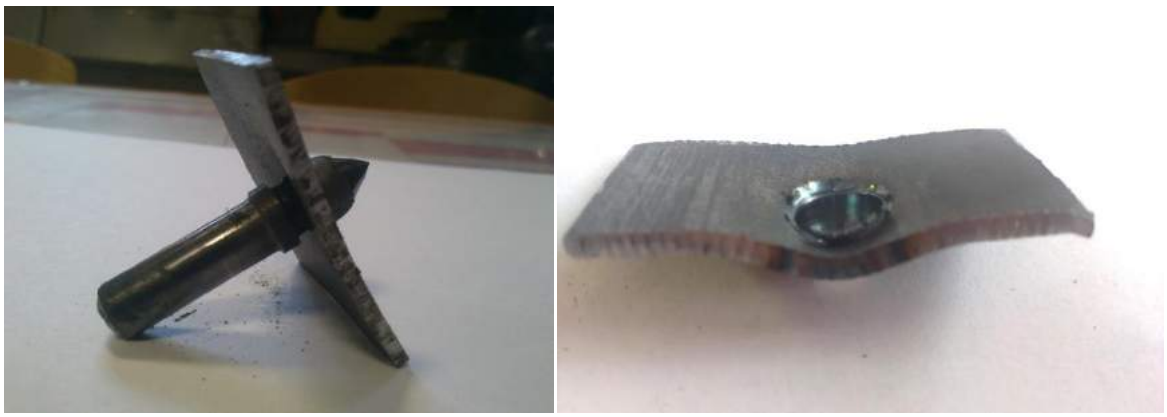
Для доступа проводника термопары к зоне обработки необходимо было изготовить шайбу с выемкой. Окончательное закрепление заготовки и установка на станке представлены на рисунках 2.9, 2.18.

2.18 – Окончательное закрепление заготовки

2.3 Формообразование отверстий под резьбу в тонколистовых заготовках конусным инструментом

В ходе работы было исследовано влияние частоты вращения шпинделя в процессе формообразования отверстий под резьбу на фиксируемую осевую силу, температуру, а также на геометрию получаемых отбортовок. Для этого проведены эксперименты с частотами вращения шпинделя n=710 мин$^{-1}$, n=1000 мин$^{-1}$, n=1400 мин$^{-1}$, n=2000 мин$^{-1}$, каждая из которых комбинировалась с разными подачами S=0,1 мм/об, S=0,14 мм/об, S=0,2 мм/об, S=0,4 мм/об.

Опыты по образованию отверстий проводились на вертикально-сверлильном станке 2Н125 в заготовках толщиной 2 мм. Использовался инструмент диаметром 8 мм с рабочим конусом 60° и предохранительным конусом 80° (см. рисунок 2.2). Отверстия с отбортовками образовывались лишь при максимальной частоте вращения n=2000 мин$^{-1}$ и минимальной подаче S=0,1 мм/об, при других режимах резания происходило закусывание инструмента (рисунок 2.19, а) или прогиб заготовки (рисунок 2.19, б). Первоначально менялся патрон для увеличения сил закрепления инструмента, однако этого оказалось недостаточно. Был сделан вывод, что использование данного инструмента при различных режимах резания для обработки отверстий под резьбу М9х1 недопустимо.



а) б)

Рисунок 2.19 – Обработка отверстий обычным пуансоном: а) закусывание инструмента; б) прогиб заготовки

2.4 Применение комбинированного инструмента

Для исключения проблем, описанных в п. 2.3, был изготовлен комбинированный инструмент с двумя рабочими частями (рисунок 2.20).

Рисунок 2.20 – Комбинированный инструмент

Первая рабочая часть данного инструмента имеет диаметр 6 миллиметров, а вторая – 8 миллиметров. Оба рабочих конуса составляют 60 градусов. Инструмент подходит для образования отверстий под резьбу М9х1.

Методика изготовления инструмента аналогична описанной в п. 2. 1.

2.5 Формообразование отверстий под резьбу в тонколистовых заготовках комбинированным инструментом

Следующие эксперименты проводились на такой же установке, как и в п. 2.3, но в качестве инструмента использовался комбинированный инструмент.

В результате были получены значения осевой силы, времени обработки и температуры, которые сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты замеров осевой силы

S, мм/об	n, мин$^{-1}$	F_z, Н	T, ℃	t, сек
0,1	2000	165	620	7
	1400	240	610	9
	1000	240	615	11
	710	240	610	12
0,14	2000	240	620	4
	1400	250	610	7
	1000	260	580	7
	710	250	600	12
0,2	2000	200	620	3
	1400	260	590	5
	1000	270	580	6
	710	260	600	9
0,4	2000	300	577	1,5
	1400	220	610	1,5
	1000	180	615	3
	710	–	–	–

При частоте вращения шпинделя n=710 мин$^{-1}$ и подаче инструмента 0,4 мм/об формообразование отверстий невозможно, так как инструмент продавливает отверстие в заготовке, а не образует его благодаря процессу течения металла. Нарезать резьбу в таких отверстиях не получится (рисунок 2.21).

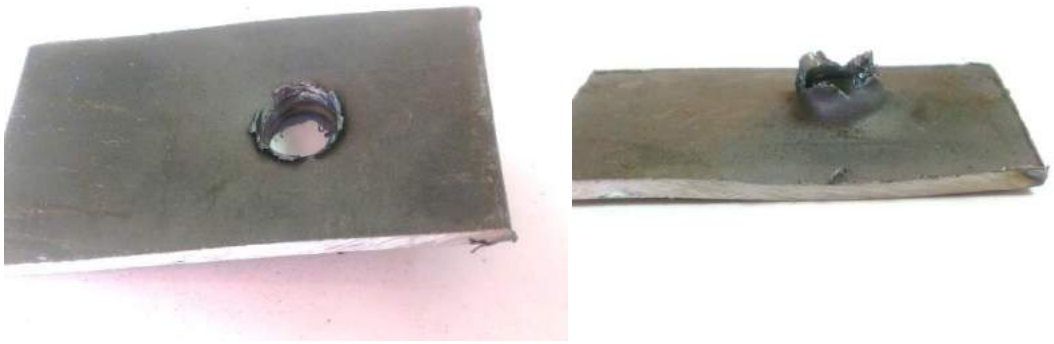


Рисунок 2.21 – «Пробитая» заготовка

На основе полученных результатов для каждого эксперимента были построены графики зависимости осевой силы и температуры от времени обработки Fz (t) и T (t) соответственно. На этих графиках отражен процесс формообразования отверстия. По времени протекания, изменению осевой силы и температуры формообразования отверстий процесс можно разделить на четыре стадии (рисунок 2.22). На первой стадии происходит нагрев заготовки за счёт сил трения между пуансоном и заготовкой, внедрение в заготовку первой конусной части, пластическое течение металла в верхнюю и нижнюю части заготовки. На второй стадии процесса происходит внедрение первой цилиндрической части инструмента. Здесь осевая сила уменьшается, а температура продолжает возрастать. Во время третьей стадии процесса внедряется вторая конусная часть пуансона, осевая сила и температура почти одновременно достигают своих максимальных значений. На четвертой стадии процесса, когда в отверстие внедряется вторая цилиндрическая часть пуансона, осевая сила уменьшается. В момент выхода второй конусной части из сформированного отверстия осевая сила снижается до нуля.

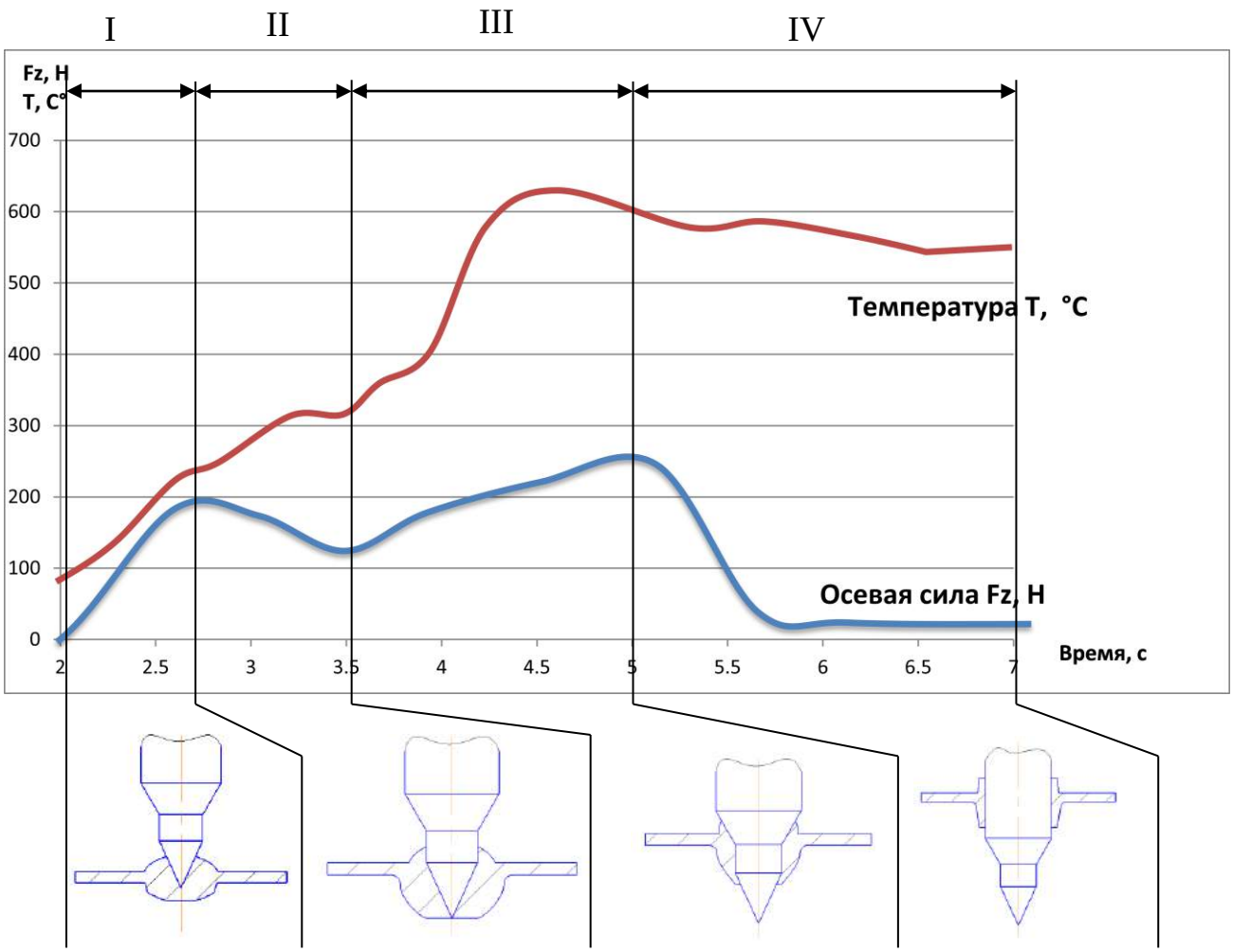


Рисунок 2.22 - Изменение осевой силы F_z, Н и температуры T, °C в точке измерения во время процесса t, с; S=0,14 мм/об; n=2000 мин$^{-1}$; I, II, III, IV – стадии протекания процесса

На рисунках 2.23-2.25 представлены графики, показывающие изменения осевой силы и температуры в зависимости от времени протекания процесса при формообразовании отверстий с отбортовками в заготовках толщиной 2 мм для одной подачи S=0,14 мм/об и разных частот вращения инструмента.

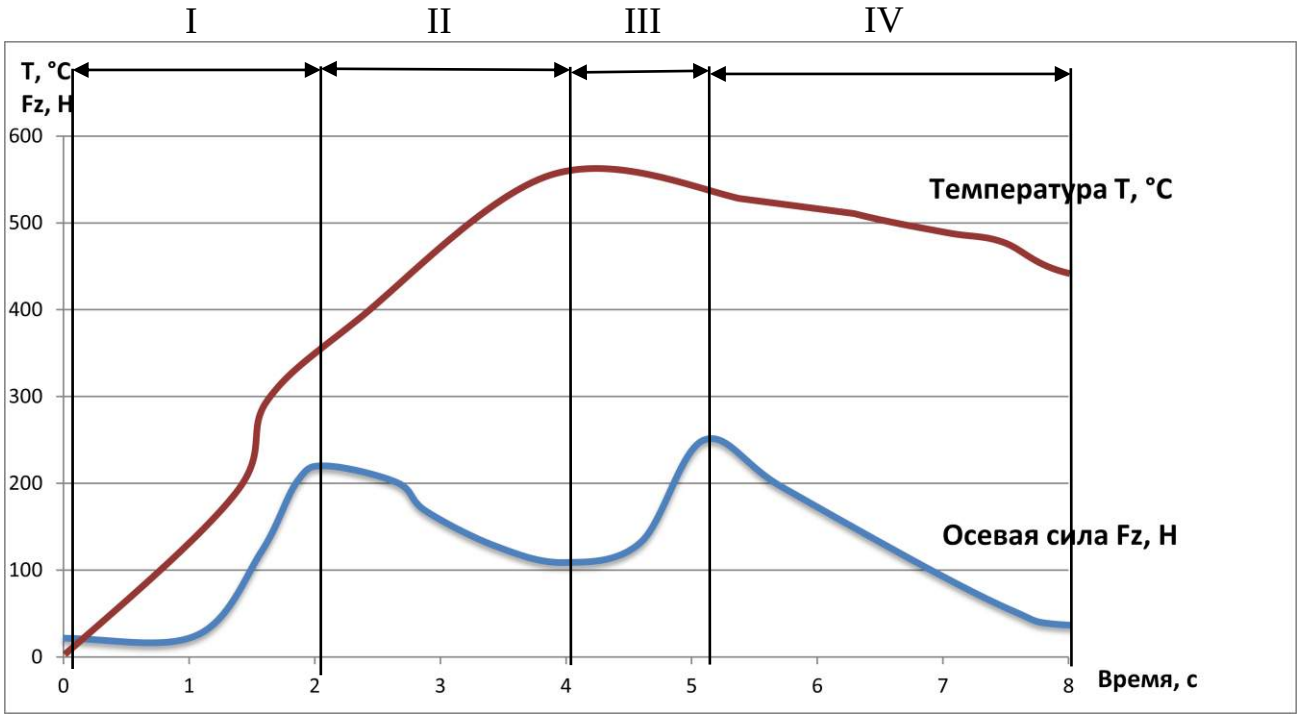


Рисунок 2.23 - Изменение осевой силы $P_{ос}$, Н и температуры Т, °С в точке измерения во время процесса t, с; S=0,14 мм/об; n=1400 мин$^{-1}$; I, II, III, IV – стадии протекания процесса

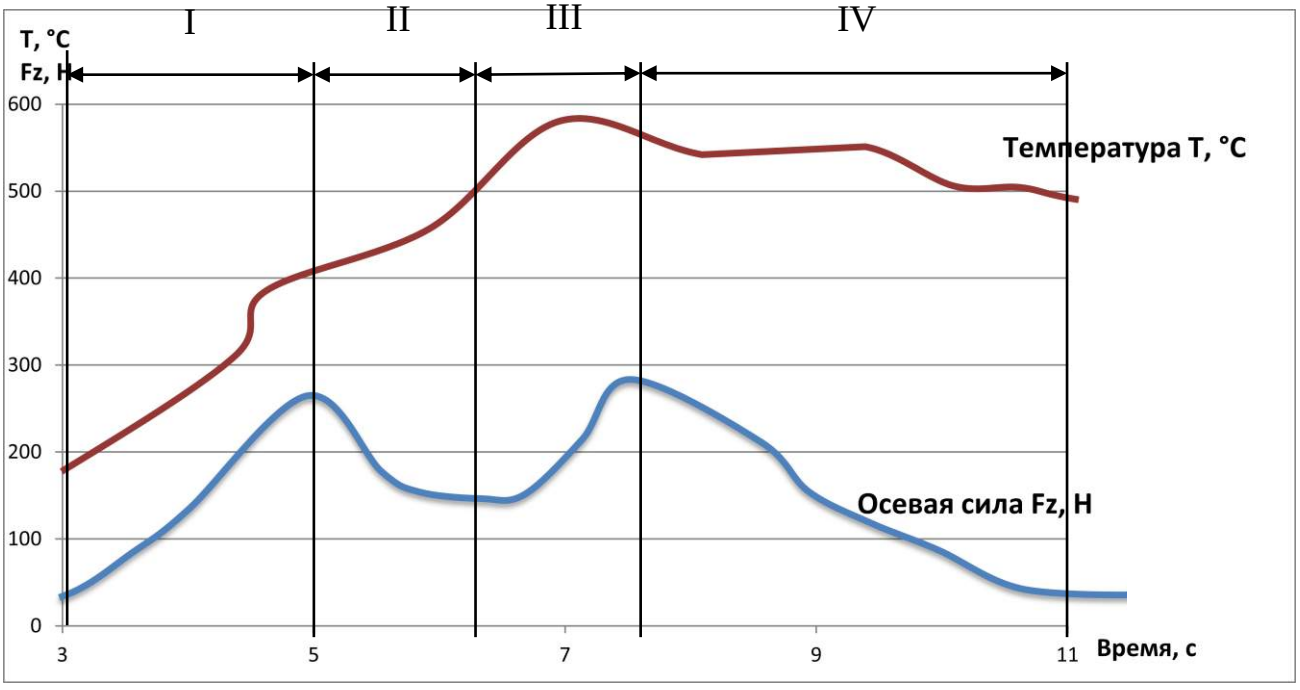


Рисунок 2.24 - Изменение осевой силы $P_{ос}$, Н и температуры Т, °С в точке измерения во время процесса t, с; S=0, 14 мм/об; n=1000 мин$^{-1}$; I, II, III, IV – стадии протекания процесса

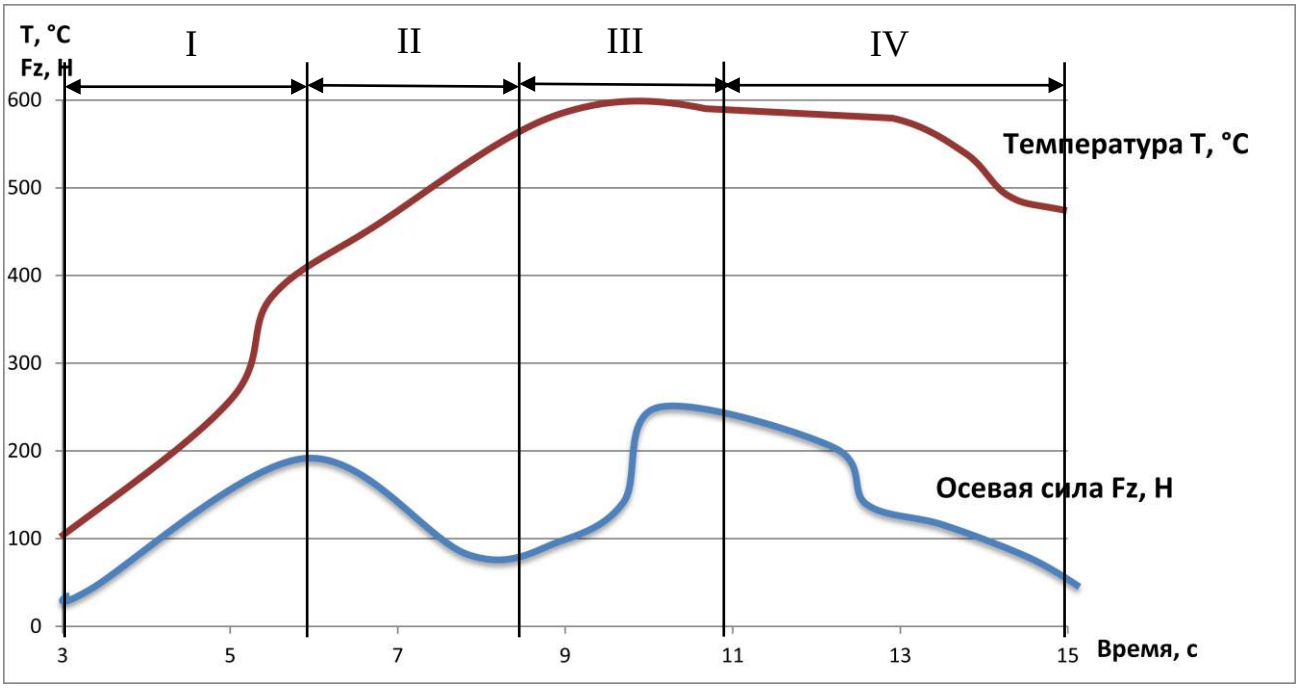


Рисунок 2.25 - Изменение осевой силы P_{oc}, Н и температуры Т, °С в точке измерения во время процесса t, с; S=0, 14 мм/об; n=710 мин$^{-1}$; I, II, III, IV – стадии протекания процесса

На основании всех графиков F_z (t) выяснилось, что с ростом частоты вращения шпинделя происходит уменьшение осевой силы, при максимальной подаче S=0,4 об/мин уменьшение значительно, при S=0,2 об/мин и S=0,14 об/мин – уменьшение небольшое, при S=0,1 об/мин – уменьшения осевой силы практически нет. При минимальных частоте вращения n=710 мин$^{-1}$ и подаче S=0,1 об/мин заготовка не успевает нагреваться, резьбу в полученных отверстиях не нарезать.

Время формообразования отверстий при увеличении частоты вращения также уменьшается. Максимальное время обработки составило 12 секунд при частоте n=710 мин$^{-1}$ и подаче S=0,1 мм/об, минимальное – при частотах n=1400 мин$^{-1}$, n=2000 мин$^{-1}$ и подаче S=0,4 мм/об. Данные режимы с наименьшим временем обработки, а следственно с большей производительностью, являются оптимальными, однако такой режим обработки, где частота вращения шпинделя

составляет n=1400 об/мин, а подача инструмента S=0,4 мм/об, имеет меньшую осевую силу, поэтому он является наиболее предпочтительным.

2.6 Измерение геометрических параметров отверстий с отбортовками

Для замера геометрических параметров, заготовки, полученные в результате проведения вышеописанных экспериментов, разрезались ножовкой так, как представлено на рисунке 2.26.

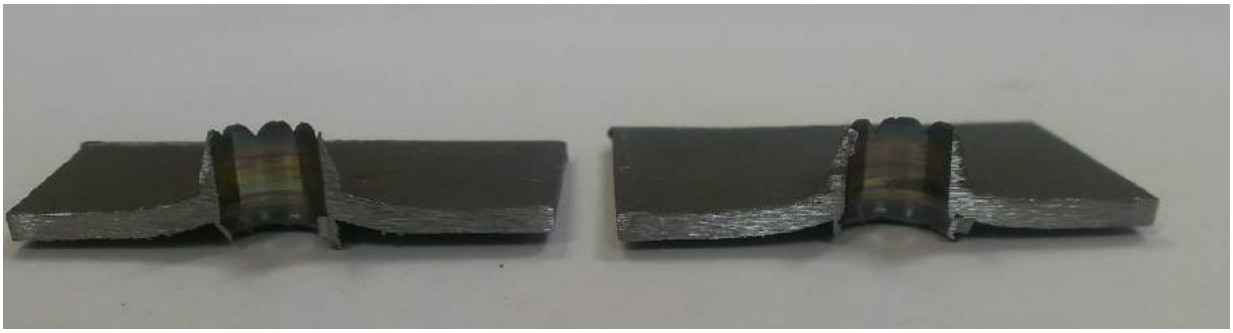


Рисунок 2.26 – Фотография разрезанной заготовки

Перед измерениями место разреза обрабатывалось на универсально-заточном станке 3Д642Е для удаления заусенцев (рисунок 2.27). Он предназначен для заточки и доводки основных видов режущих инструментов из инструментальной стали, твёрдого сплава и минералокерамики абразивными, алмазными и эльборовыми кругами.

Технические характеристики данного станка:

– Наибольший диаметр изделия, устанавливаемого в центровых бабках, 200 мм;

– Наибольшая длина изделия, устанавливаемого в центровых бабках, 500 мм;

– Наибольшее продольное перемещение стола, 350 мм;

– Угол поворота шлифовальной головки, град.:

- в горизонтальной плоскости 360;
- в вертикальной плоскости 200;

– Продольное перемещение стола - ручное;

– Суммарная мощность установленных электродвигателей, кВт 0,89/1,03;

– Габаритные размеры станка (ДхШхВ), 1085×1195×1630 мм;

– Масса станка (без приспособлений и принадлежностей), 780 кг.

Рисунок 2.27 – Фотография универсально-заточного станка 3Д642Е

Посредством малого инструментального микроскопа были замерены значения геометрических параметров, представленные на рисунке 2.28: А – высота нижней отбортовки, мм; Д – высота верхней отбортовки, мм; Е – высота нижней отбортовки, где она не меняется, мм; Б, В, Г – толщины нижней отбортовки в трех сечениях, мм.

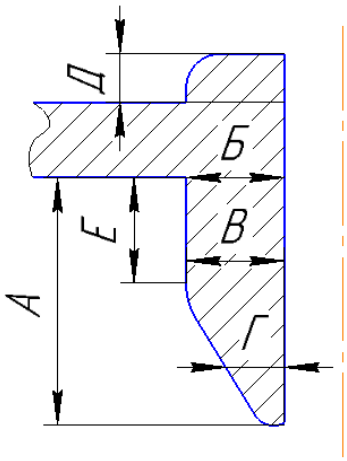


Рисунок 2.28 – Параметры, полученные в результате формообразования отверстия с отбортовками

Полученные результаты были сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты замеров геометрических параметров

n, мин$^{-1}$	S, мм/об	№ заготовки	А, мм	Б, мм	В, мм	Г, мм	Д, мм	Е, мм
n=2000	S=0,1	1	3,22	1,31	1,295	0,795	-	-
		2	4,015	2,36	2,26	1,08	1,5	-
		3	4,325	1,215	1,98	0,71	0,71	1,735
	S=0,14	1	4,92	1,345	1,025	0,505	0,49	2,045
		2	5,425	2,04	1,63	1,505	-	1,61
		3	3,72	1,17	0,925	0,445	0,415	2,255
	S=0,2	1	4,595	1,15	0,77	0,33	1,5	-
		2	4,71	1,28	1,045	0,45	-	-
		3	5,4	1,035	0,875	0,41	-	-
	S=0,4	1	4,82	0,98	0,855	0,325	2,075	-
		2	3,81	0,97	0,78	0,565	1,6	-
n=1400	S=0,1	1	4,554	1,435	1,01	0,665	–	–
		2	4,605	1,325	1,075	0,56	–	–
		3	4,395	1,26	0,9	0,445	–	–
	S=0,14	1	4,49	2,44	1,825	1,245	1,56	–
		2	3,755	1,22	1,015	0,54	–	–
	S=0,2	1	4,86	1,195	0,91	0,47	–	–
		2	4,72	1,11	0,945	0,34	–	–
		3	4,885	1,135	0,805	0,36	–	–
	S=0,4	1	4,76	1,12	0,8	0,54	–	–
		2	4,59	1,09	1,84	0,8	–	–
		3	4,88	1,13	1,25	0,78	1,97	–

Окончание таблицы 2.2

n, мин$^{-1}$	S, мм/об	№ заготовки	А, мм	Б, мм	В, мм	Г, мм	Д, мм	Е, мм
n=1000	S=0,1	1	4,565	1,12	0,8	0,425	1,32	–
		2	4,68	1,37	1,045	0,49	1,29	–
	S=0,14	1	4,625	1,25	0,885	0,435	1,25	–
		2	3,95	1,125	0,94	0,72	–	–
		3	4,59	1,045	0,825	0,455	1,37	–
	S=0,2	1	4,385	2,125	0,86	0,4	1,33	–
	S=0,4	1	4,785	1,1	0,87	0,441	1,09	–
		2	4,54	1,5	1,07	0,56	–	–
		3	4,71	1,05	1,59	0,35	–	–
n=710	S=0,1	1	4,975	2,195	1,89	1,265	0,49	–
		2	5,13	1,045	0,785	0,575	–	–
	S=0,14	1	4,33	1,215	0,865	0,47	1,28	–
		2	4,46	1,02	0,92	0,49	–	–
	S=0,2	1	3,8	1,18	0,74	0,27	–	1,68
	S=0,4	1, 2, 3	-	-	-	-	–	-

Для наглядности посчитаны средние значения, которые приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты замеров геометрических параметров (средние значения)

n, мин$^{-1}$	S, мм/об	№ заготовки	А, мм	Б, мм	В, мм	Г, мм	Д, мм	Е, мм
n=2000	S=0,1	1	3,22	1,31	1,295	0,795	-	-
		2	4,015	2,36	2,26	1,08	1,5	-
		3	4,325	1,215	1,98	0,71	0,71	1,735
	S=0,14	1	4,92	1,345	1,025	0,505	0,49	2,045

Окончание таблицы 2.3

		2	5,425	2,04	1,63	1,505	-	1,61
		3	3,72	1,17	0,925	0,445	0,415	2,255
	S=0,2	1	4,595	1,15	0,77	0,33	1,5	-
		2	4,71	1,28	1,045	0,45	-	-
		3	5,4	1,035	0,875	0,41	-	-
	S=0,4	1	4,82	0,98	0,855	0,325	2,075	-
		2	3,81	0,97	0,78	0,565	1,6	-

Проанализировав таблицу средних значений показателей, не было выявлено зависимости изменения геометрии отбортовок от частоты вращения инструмента. Самая маленькая высота отбортовки получена вследствие «пробивки» отверстия, как было выяснено в п. 2.5. Такой режим недопустим. Что касается оптимального режима, определенного п. 2.5, где частота вращения n=1400 мин$^{-1}$ и подача S=0,4 мм/об, размер нижней отбортовки составляет 4,7 мм и позволяет нарезать до 6 витков резьбы.

2.7 Выбор математической модели, независимых переменных и результаты эксперимента

Под технологическими параметрами процесса формообразования отверстия с отбортовками понимаются входные параметры (осевая сила и частота вращения шпинделя станка) и выходные параметры (температура, время протекания процесса и геометрические размеры отверстия с отбортовками) (таблица 2.4). Для управления процессом формообразования необходимо установить их взаимосвязь.

Таблица 2.4 – Технологические параметры формообразования отверстий с отбортовками для каждого режима

n, мин$^{-1}$	S, мм/об	F_z, Н	T, °C	t, сек	А, мм	Б, мм	В, мм	Г, мм	Д, мм	Е, мм
n=2000	S=0,1	165	620	7	3,853	1,628	1,845	0,861	1,105	1,735
	S=0,14	240	620	4	4,688	1,52	1,5	0,82	0,452	1,97
	S=0,2	200	620	3	4,9	1,155	0,9	0,4	1,5	–
	S=0,4	300	577	1,5	4,315	0,975	0,8175	0,445	1,837	–
n=1400	S=0,1	240	610	9	4,518	1,34	0,995	0,556	–	–
	S=0,14	250	610	7	4,122	1,83	1,42	0,892	1,56	–
	S=0,2	260	590	5	4,822	1,146	0,886	0,39	–	–
	S=0,4	220	610	1,5	4,74	1,11	1,29	0,7	1,97	–
n=1000	S=0,1	240	615	11	4,622	1,245	0,922	0,457	1,305	–
	S=0,14	260	580	7	4,38	1,14	0,883	0,536	1,31	–
	S=0,2	270	580	6	4,385	2,125	0,86	0,4	1,33	–
	S=0,4	180	615	3	4,68	1,216	1,176	0,45	1,09	–
n=710	S=0,1	240	610	1,5	4,297	1,62	1,337	0,92	0,49	–
	S=0,14	250	600	12	4,395	1,117	0,892	0,48	1,28	–
	S=0,2	260	600	9	4,305	1,187	0,792	0,39	0,96	1,68
	S=0,4	-	-	-	-	-	-	-	–	-

Предварительно проведённые опыты позволяют утверждать, что время формообразования отверстия, возникающая температура зависят от осевой силы, частоты вращения инструмента. Для оценки влияния осевой силы и частоты вращения пуансона на время цикла было проведен регрессионный анализ. Исходные данные приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5 – Входные и выходные параметры для регрессионного анализа

№	Входные параметры		Выходной параметр
	X_1	X_2	Y
	n, мин$^{-1}$	Рос, Н	t, с
1	2000	240	4,0
2	1400	250	7,0
3	1000	260	7,0
4	710	250	12,0
5	2000	200	3,0
6	1400	260	5,0
7	1000	270	6,0
8	710	260	9,0

Изменение осевой силы и числа оборотов влияют на температуру и время протекания процесса, но практически не влияют на геометрические параметры отверстия. При уменьшении осевой силы и частоты вращения шпинделя увеличивается конечная температура и время протекания процесса. Данное положение может служить основой для управления процессом.

2.7.1 Оценка уравнения регрессии

В первом приближении (учитывая относительно небольшой диапазон изменения получаемых параметров) получаем модель в форме алгебраического полинома первой степени:

$$y_к = b_o + \sum_{i=1}^{n} b_i x_i + \sum_{i \neq j}^{n} b_{ij} x_i x_j , \qquad (2.1)$$

где b_i – коэффициент полинома, подлежащий определению по результатам эксперимента; x_i, x_j – независимые переменные факторы; x_i x_j – взаимодействие факторов; n – число независимых переменных факторов.

Определим вектор оценок коэффициентов регрессии. Согласно методу наименьших квадратов, вектор S получается из выражения 2.2:

$$S = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (2.2)$$

К матрице X добавляем единичный столбец:

$$\mathrm{X} = \begin{Bmatrix} 1 & 2000 & 240 \\ 1 & 1400 & 250 \\ 1 & 1000 & 260 \\ 1 & 710 & 250 \\ 1 & 2000 & 200 \\ 1 & 1400 & 260 \\ 1 & 1000 & 270 \\ 1 & 710 & 260 \end{Bmatrix}$$

Матрица Y:

$$Y = \begin{Bmatrix} 4 \\ 7 \\ 7 \\ 12 \\ 3 \\ 5 \\ 6 \\ 9 \end{Bmatrix}$$

Транспонируем матрицу входных параметров X:

$$\mathrm{X^T} = \begin{Bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2000 & 1400 & 1000 & 710 & 2000 & 1400 & 1000 & 710 \\ 240 & 250 & 260 & 250 & 200 & 260 & 270 & 260 \end{Bmatrix}$$

Умножаем матрицы, ($\mathrm{X^T X}$)

$$\mathrm{X}^T X = \begin{Bmatrix} 8 & 10220 & 1990 \\ 10220 & 14928200 & 2486100 \\ 1990 & 2486100 & 498300 \end{Bmatrix}$$

В матрице, ($\mathrm{X^T}$ X) число 8, лежащее на пересечении 1-й строки и 1-го столбца, получено как сумма произведений элементов 1-й строки матрицы $\mathrm{X^T}$ и 1-го столбца матрицы X.

Умножаем матрицы, ($\mathrm{X^T Y}$)

$$\mathrm{X}^T Y = \begin{Bmatrix} 53 \\ 58710 \\ 13390 \end{Bmatrix}$$

Находим обратную матрицу $(X^TX)^{-1}$

$$(X^TX)^{-1} = \begin{Bmatrix} 52{,}336 & -0{,}00604 & -0{,}179 \\ -0{,}00604 & 0 & 0 \\ -0{,}179 & 0 & 0{,}000623 \end{Bmatrix}$$

Вектор оценок коэффициентов регрессии равен

$$Y(X) = \begin{Bmatrix} 52{,}336 & -0{,}00604 & -0{,}179 \\ -0{,}00604 & 0 & 0 \\ -0{,}179 & 0 & 0{,}000623 \end{Bmatrix} * \begin{Bmatrix} 53 \\ 58710 \\ 13390 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 24{,}119 \\ -0{,}00624 \\ -0{,}0402 \end{Bmatrix}$$

Уравнение регрессии (оценка уравнения регрессии):

$$Y = 24.1192 - 0.00624X_1 - 0.04021X_2.$$

2.7.2 Проверка математической модели на адекватность

Для того чтобы определить адекватность математической модели, т.е. проверить ее соответствие экспериментальным результатам и возможность использования модели на практике, необходимо провести статистический анализ полученного уравнения регрессии, а именно оценку значимости коэффициентов.

При первичной проверке в уравнение были подставлены значения n и P_{oc} из таблицы 2.5. Полученные значения времени обработки $t_{расч}$ отличаются от фактических значений t на величину Δt (таблица 2.6). Анализируя значения полученной погрешности, можно сказать, что в некоторых случаях математическая модель дает результат довольно близкий к фактическому.

Таблица 2.6 – Первичная проверка математической модели

№	Входные параметры		Выходные параметры	Уравнение регрессии	
				$Y=24.1192-0.00624*X_1-0.04021*X_2$	
	X_1, n	X_2,P_{oc}	Y, t	T по модели	Погрешность
1	2000	240	4	1.9888	2.0112
2	1400	250	7	5.3307	1.6693
3	1000	260	7	7.4246	-0.425
4	710	250	12	9.6363	2.3637
5	2000	200	3	3.5972	-0.597
6	1400	260	5	4.9286	0.0714
7	1000	270	6	7.0225	-1.023
8	710	260	9	9.2342	-0.234
Сумма	Σ=5110	Σ=1000	Σ=30		

Чтобы дать более точную оценку значимости, необходима вторичная проверка значимости коэффициентов.

Вторичная проверка осуществляется путем расчета критерия Фишера и сравнения расчетного значения с табличным. Расчет критерия выполняется по формуле 2.3:

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} * \frac{f_2}{f_1}, \quad (2.3)$$

где R – коэффициент корреляции Пирсона,

f_1 и f_2 – число степеней свободы.

Первая дробь в уравнении равна отношению объясненной дисперсии к необъясненной. Каждая из этих дисперсий делится на свою степень свободы (вторая дробь в выражении). Число степеней свободы объясненной дисперсии f_1 равно количеству независимых переменных.

Число степеней свободы объясненной дисперсии f_2 равно 2.4:

$$f_2 = N - f_1 - 1, \quad (2.4)$$

где N – количество экспериментальных точек.

Коэффициент корреляции Пирсона 2.5:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N}(X_i-\bar{X})(Y_i-\bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(X_i-\bar{X})^2 \sum_{i=1}^{N}(Y_i-\bar{Y})^2}}, \quad (2.5)$$

Для переменной X_1 рассчитывается критерий Фишера F_1и коэффициент корреляции R_1, для переменной X_2 – F_2 и R_2 соответственно.

Промежуточные расчеты проверки математической модели на адекватность представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Промежуточные расчеты

Промежуточные расчеты							
№	X_i	Y_i	X_i-$X_{ср}$	Y_i-$Y_{ср}$	(X_i-$X_{ср}$)* *(Y_i-$Y_{ср}$)	(X_i-$X_{ср}$)^2	(Y_i-$Y_{ср}$)^2
1	2000	1,9888	722,5	-4,1565	-3003,07125	522006,25	17,27649225
2	1400	5,3307	122,5	-0,8146	-99,7885	15006,25	0,66357316
3	1000	7,4246	-277,5	1,2793	-355,00575	77006,25	1,63660849
4	710	9,6363	-567,5	3,491	-1981,1425	322056,25	12,187081
5	2000	3,5972	722,5	-2,5481	-1841,00225	522006,25	6,49281361
6	1400	4,9286	122,5	-1,2167	-149,04575	15006,25	1,48035889
7	1000	7,0225	-277,5	0,8772	-243,423	77006,25	0,76947984
8	710	9,2342	-567,5	3,0889	-1752,95075	322056,25	9,54130321
Среднее	1277,5	6,1453					
Сумма					-9425,42975	1872150	50,04771
Корень произведения							12436,24455

Подставляем необходимые данные из таблицы 2.7 в формулу 2.5 для расчета переменной X_1:

$$R_1 = \frac{-9425{,}42975}{12436{,}24455} = -0{,}7579$$

$$f_1 = 2$$

$$f_2 = 8 - 2 - 1 = 5$$

$$F_1 = \frac{(-0{,}7579)^2}{1 - (-0{,}7579)^2} * \frac{5}{2} = 7{,}83$$

Аналогичным образом производится расчет для переменной X_2:

$$R_2 = \frac{218{,}029625}{811{,}2505115} = 0{,}268757$$

$$f_1 = 2$$

$$f_2 = 8 - 2 - 1 = 5$$

$$F_2 = \frac{0{,}2687^2}{1 - 0{,}2687^2} * \frac{5}{2} = 0{,}19$$

По таблицам распределения Фишера-Снедоккора критическое значение F-критерия для уровня значимости α=0,05 и степеней свободы f_1=2 и f_2=5:

$$F_{\text{кр}} = 5{,}79$$

$$F_{\text{кр}} < F_1 \text{ и } F_{\text{кр}} > F_2$$

В результате оценки значимости коэффициентов уравнения множественной линейной регрессии можно сделать вывод, что коэффициент X_1 статистически значим, коэффициент X_2 не целесообразно включать в модель после введения фактора X_1.

2.8 Выводы по главе

Анализируя данные, полученные в результате экспериментов по формообразованию отверстий с отбортовками под резьбу, были сделаны следующие выводы:

1) при частоте вращения меньше n=2000 мин$^{-1}$, инструмент, диаметр которого составляет 8 мм под резьбу М9х1, прогибает заготовку или застревает в ней. Чтобы этого избежать, нужно применять конусный инструмент с двумя рабочими частями, где диаметр первой части составляет 6 мм, второй – 8 мм, рабочий конус обеих частей – 60 градусов;

3) с увеличением частоты вращения шпинделя уменьшается фиксируемая осевая сила и время обработки;

4) оптимальным режимом формообразования отверстий термическим сверлением является n=1400 мин$^{-1}$ и подача S=0,4 мм/об;

5) геометрические параметры отбортовок от режимов формообразования не зависят;

6) при обработке тонколистовых заготовок толщиной 2,0 мм технологические параметры процесса: осевая сила, частота вращении инструмента, время протекания процесса взаимосвязаны, можно найти зависимость в форме математической модели.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ С ОТБОРТОВКАМИ ВРАЩАЮЩИМСЯ ПУАНСОНОМ

3.1 Расчет прочности резьбового соединения на срез

Полученные данные о форме (см. главу 2) и геометрических размерах отверстий с отбортовками (см. табл. 2.2, 2.3) позволяют определить длину свинчивания $L_{св}$. Однако при ее определении в отверстии, образованным вращающимся пуансоном, необходимо учитывать, форму кривых наружных поверхностей отбортовок в виде параболы. Учитывая данный факт, длина свинчивания $L_{св}$ эффективна на 75% от общей высоты отбортовки ($h_{эф}=0,75h_1$), так, вследствие деформации заготовки при прохождении цилиндрической части инструмента, образуются «рваные» края.

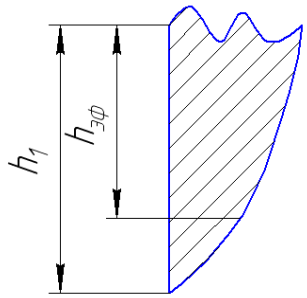


Рисунок 3.1 – Эффективная длина свинчивания

Экспертной практике известны два вида повреждений резьбовых соединений: самоотвинчивание и срыв гайки. При самоотвинчивании гайки резьба остается неповрежденной, а при срыве гайки витки резьбы взаимно сминаются и срезаются, вершины профиля витков резьбы болта при этом отгибаются и срезаются в направлении срыва гайки, а вершины профиля витков резьбы гайки отгибаются и срезаются в противоположном направлении. Сминание и срезание витков резьбы сопровождается сдвигом металла и образованием заусенцев (загибов) с одной стороны.

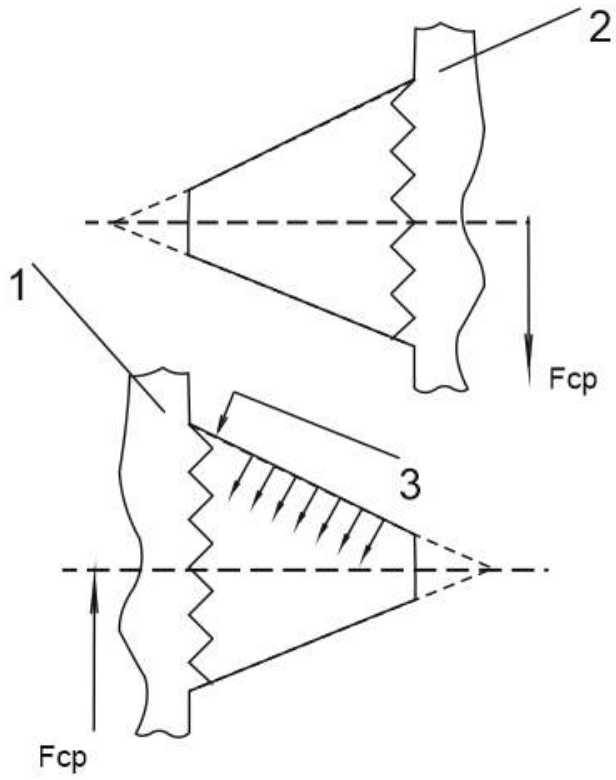


Рисунок 3.2 – Схема разрушения витка резьбы в результате среза: 1 – болт; 2 – гайка; 3 – линия разрушения резьбы

Сила, вызывающая срез витков резьбы гайки определяется по формуле 3.1 [19]:

$$F_{ср} = \pi d \cdot L_{св} \cdot К_г \cdot К_м \cdot \tau_{в.г}, \quad (3.1)$$

где d – внутренний диаметр резьбы гайки, мм;

$L_{св}$ – длина свинчивания резьбы, мм;

$К_г$ – коэффициент полноты резьбы, коэффициент полноты резьбы, показывающий отношение высоты прямоугольника, представляющего собой поверхность среза, к шагу резьбы. Для метрической резьбы $К_г = 0,87$ [19];

$К_м$ – коэффициент учитывающий неравномерность деформирования витков по высоте гайки при наличии пластической деформации, $К_м = 0,72$ [19];

$\tau_{в.г}$ – предел прочности на срез, МПа. Сталь 3 $\tau_{в.г} = 260$ МПа [20].

Результаты расчетов прочности сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты расчета прочности резьбы в отверстиях, образованных термическим сверлением

S, мм/об	n, мин-1	$L_{св}$, мм	Fср, Н
S=0,1	n=2000	4,1	13303
	n=1400	4,99	14233,2
	n=1000	4,96	16922,4
	n=710	5,2	17447,3
S=0,14	n=2000	5	16190,2
	n=1400	4,59	15233,2
	n=1000	4,78	15126,5
	n=710	4,79	15195,6
S=0,2	n=2000	5,175	16922,4
	n=1400	5,12	16650,7
	n=1000	4,78	15140,3
	n=710	4,73	15140,3
S=0,4	n=2000	4,74	16900
	n=1400	5,05	16369,8
	n=1000	5,01	16162,6
	n=710	3,72	15222
Среднее значение			15760

Из таблицы видно, что с увеличением частоты вращения увеличивается длина свинчивания, а также увеличивается сила, вызывающая срез витков резьбы гайки, кроме режима, где подача составляет S=0,1 мм/об. Здесь, наоборот, при увеличении частоты вращения инструмента длина свинчивания уменьшается.

3.2 Определение фактической прочности резьбового соединения

Для проверки прочности полученной резьбы (см. главу 2) на срез применялась универсальная разрывная машина INSTRON 5882 (рисунок 3.3). Эти машины предназначены для проведения испытаний на растяжение, сжатие, изгиб, сдвиг и расслоение образцов из металлов, пластмасс, резины, текстиля, древесины, пленки, бумаги и различных композиционных материалов.

Рисунок 3.3 – Универсальная разрывная машина INSTRON 5882

Разрывная машина U-серии стандартно оснащена выносным пультом управления с ЖК-дисплеем (рисунок 3.4). Пульт позволяет перемещать траверсу, отображать нагрузку, положение, скорость перемещения траверсы и деформацию образца.

Рисунок 3.4 – Фотография пульта управления разрывной машины

Захваты для испытаний на растяжение имеют дополнительные крепления внешней оснастки, позволяющие перейти к испытаниям на сжатие, изгиб или к испытаниям профильных образцов с головками и резьбой. Переход от одного типа испытания к другому, не требует снятия основных захватов (рисунок 3.5).

Рисунок 3.5 – Фотография захватов разрывной машины

Основные характеристики:

– Выносной пульт управления, отображение значений нагрузки, деформации и перемещения;

– Класс точности ± 0,5 % в диапазоне от 0,2 до 100 % номинала используемого силоизмерительного датчика;

– Диапазон скоростей 0,01 мм/мин до 500 мм/мин;

– Испытательная машина оснащена встроенной системой автоматической диагностики;

– Наличие концевых выключателей и встроенной электронной системой защиты от перегрузки;

– Русифицированное многофункциональное программное обеспечение [21].

Испытания проводились для заготовок с отверстиями, полученными в результате термического сверления, у нескольких из них отбортовки были отшлифованы, также имелись образцы, отверстия которых были просверлены простым сверлом. Резьба М9х1 на образцах нарезалась с помощью комплекта из двух метчиков (рисунок 3.6).

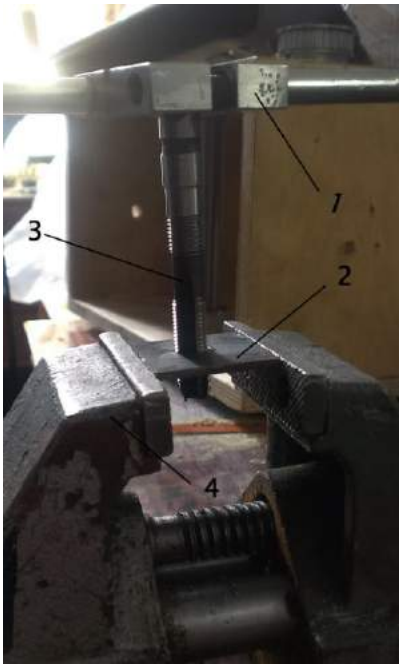


Рисунок 3.6 – Фотография нарезания резьбы метчиком: 1 – вороток; 2 – заготовка; 3 – метчик; 4 - тисы

Для закрепления образца приспособлении, описанном в п. 2.2, применялась шпилька с резьбой М9х1. Заготовка для нее обрабатывалась также на токарном станке, после чего нарезалась резьба плашкой (рисунок 3.7).

Рисунок 3.7 – Фотография нарезания наружной резьбы шпильки

Принцип закрепления заготовки состоит в том, что в ее отверстие и приспособления накручивается шпилька, после этого на шпильку устанавливается шайба, которая закрепляется четырьмя болтами М6х1, тем самым зажимая заготовку (рисунок 3.8). Такое приспособление в сборе устанавливается в разрывную машину, где ее захваты зажимают шпильку и хвостовик (рисунок 3.9).

Рисунок 3.9 – Принцип закрепления заготовки в приспособлении

Рисунок 3.10 – Установка приспособления в разрывной машине:
1 – образец; 2 – шпилька; 3 – захват разрывной машины; 4 – приспособление

В результате испытаний на прочность были получены графики, представленные на рисунках 3.11 – 3.13.

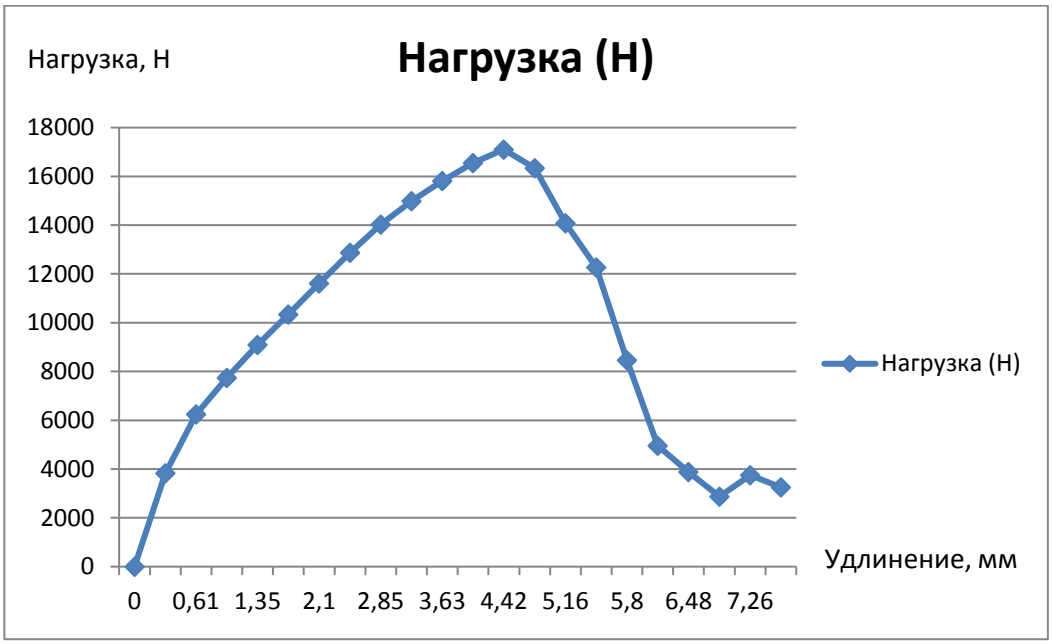


Рисунок 3.11 – График испытания прочности резьбового соединения на срез отверстия с отбортовкой

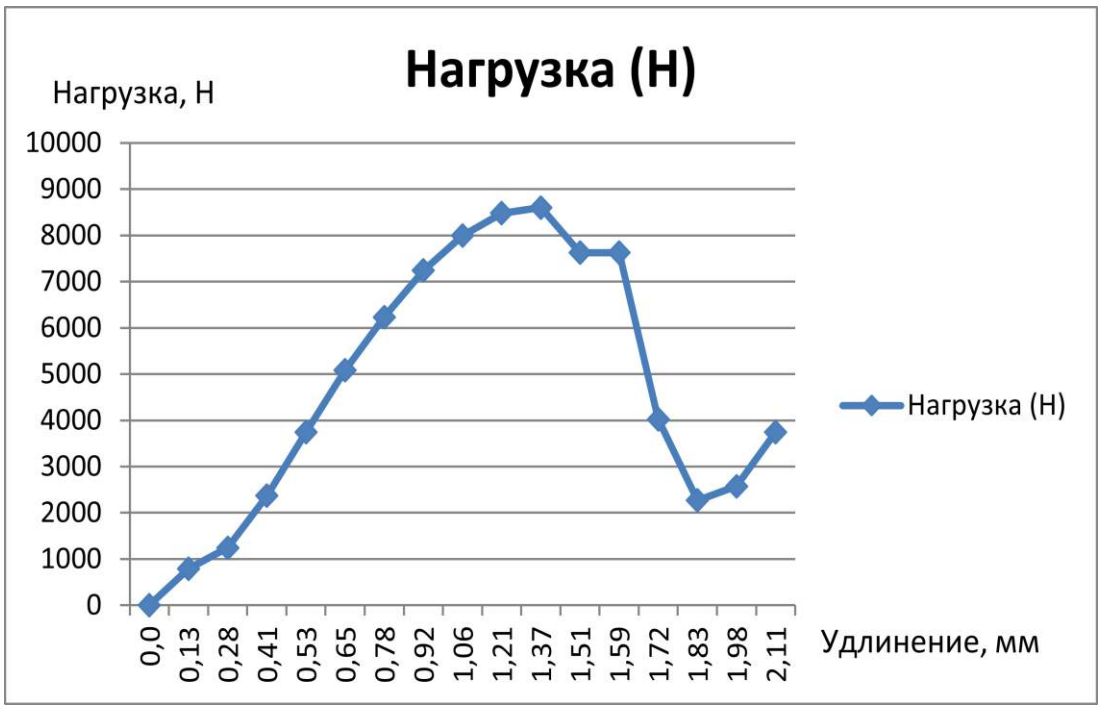


Рисунок 3.12 – График испытания прочности резьбового соединения на срез отверстия без отбортовки

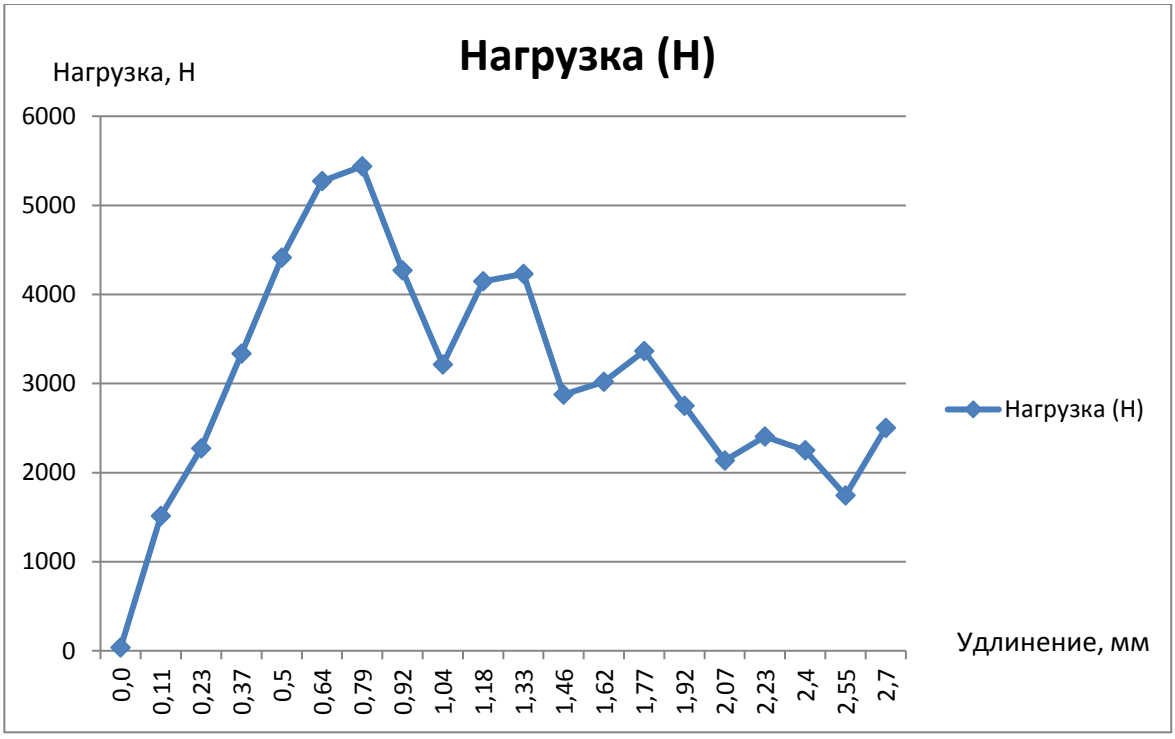


Рисунок 3.13 – Графики испытания прочности резьбового соединения на срез отверстия, просверленного сверлом

Для сравнения результатов рассчитанной силы среза и полученной при испытаниях прочности резьбового соединения на срез была составлена таблица 3.2.

Таблица 3.2 – Сравнение результатов рассчитанной и фактической сил среза заготовки с отбортовками

Заготовка	Расчетная сила среза Fср, Н	Среднее значение фактической силы среза Fср, Н
Отверстия с отбортовками	15760	17061
Отверстия без отбортовок	6210	9766
Отверстия, просверленные сверлом	6210	5487

Проанализировав данные таблицы 3.2, можно сделать вывод, что фактические значения силы среза резьбового соединения больше расчетных. Предположительно, такое различие данных произошло из-за явления наклепа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были выполнены поставленные задачи: установлена возможность получения отверстий под резьбу М8…М9 в заготовках толщиной 2 мм термическим сверлением, на основе этого определена оптимальная форма пуансона, рассмотрено влияние частоты вращения инструмента на основное время, осевую силу и температуру, выявлены оптимальные режимы обработки, измерены геометрические параметры отбортовок, определена расчетная и фактическая прочность резьбового соединения на срез, получена математическая модель и исследована на адекватность. Помимо этого, был произведен анализ источников литературы по данной тематике, изложен метод изготовления инструмента и заготовки, описаны экспериментальная установка, принцип проведения экспериментов и результаты, полученные в ходе них, сделаны выводы, приведены рекомендации по использованию рассматриваемого метода в производстве.

Таким образом, в ходе исследований были заключены следующие основные выводы:

1) при увеличении частоты вращения инструмента происходит уменьшение осевой силы и основного времени на обработку;

2) выявлено, что геометрия отбортовок не зависит от частоты вращения шпинделя;

3) при обработке тонколистовых заготовок толщиной 2,0 мм технологические параметры процесса: осевая сила, частота вращении инструмента, время протекания процесса взаимосвязаны, можно найти зависимость в форме математической модели.

4) выявлено упрочнение материала в зоне образования отверстия;

5) полученная длина свинчивания составляет 6,5 мм;

6) расчетная прочность резьбы М9х1 составляет 15760 Н, фактическая прочность – 17061 Н.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1) Интернет – ресурс: http://studopedia.ru/1_89647_raspredelenie-nagruzki-po-vitkam-rezbi.html.

2) Wurth Elektronik Oy [Электронная версия] / Wurth Elektronik Oy, 2010 - http://www.wurthelektronik.fi/site/media/pdf/we/kuvasto/WE_Ohutlevykiinnikkeet_ven.pdf.

3) Интернет – ресурс: http://mpg.susu.ru/_slesar/index.php?page=4c8e115a4f6313fcfb9deaa8b2d940e1.

4) Интернет – ресурс: http://www.metae.ru/privarnoj-krepezh.html.

5) Интернет – ресурс: http://emchezgia.ru/omd/109_otbortovka_otverstii.php.

6) Отбортовка патрубков на трубах, корпусах и листовых заготовках / Технология, организация производства и управления. – Обзор. – Москва, ЦниитТмаш, 1980. – 32 с.

7) Flies loshhformen–ein Xerfah ren zur Spanlosen Erreugung Von Lochern inmetallishen Werkstoffen. – «Aluminium» (BRA). – 1979, 55. – № 3. – 234 с.

8) Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке / В.П. Романовский. – Ленинград: Машиностроение, 1971. — 782 с

9) Зубцов М. Е. Листовая штамповка: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Машины и технология обработки металлов давлением». — 3-е изд., перераб. и доп. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980. — 432 с., ил.

10) Усачев В. В. Технология и инструмент для термопластического формирования отверстий/ В. В. Усачев //Автореферат: Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 13, №1(2)– СПб.: – 2011. –с. 429 – 432.

11) Берлинер, Ю. И. Технология химического и нефтяного аппаратостроения / Ю . И. Берлинер.– М.: Машиностроение, 1976.– 256 с.

12) Прагер, А.И. Получение отбортованных отверстий в листовых деталях / А.И. Прагер // Кузнечно-штамповочное производство, 1989. – № 11. – с. 28-30.

13) Пат. 1803233 Российская Федерация, МПК: B21D35/00. Способ получения отбортованных отверстий в листовом материале и комбинированный пуансон для его осуществления / Ю. Н, Берлет, А. Ш. Мурасов, С, А. Рыженков, В. Ф. Макаров. –№4905999/27; заявл. 30.01.1991; опубл. 23.03.1993 – http://patentdb.su/3-1803233-sposob-polucheniya-otbortovannykh-otverstijj-v-listovom-materiale-i-kombinirovannyjj-puanson-dlya-ego-osushhestvleniya.html.

14) Шаламов, П.В. Формообразование отверстий под резьбу вращающимся пуансоном в тонколистовых заготовках: дис. ... канд. техн. наук / П.В. Шаламов. – Ч., 2012. – С. 153.

15) ГОСТ 2424-83 Круги шлифовальные. Технические условия.

16) Наладка и настройка вертикально-сверлильного станка модели 2Н125 на обработку детали: методические указания / сост. И.П. Никитина. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. – 52 с.

17) Утенков, В.М. Возможности использования динамометра Kistler для испытания металлорежущих станков / В.М. Утенков, П.А. Быков // Инженерный вестник. Электронный научно-технический журнал. – 2012. – №10. – http://engbul.bmstu.ru/doc/492011.html (дата обращения 01.09.2013).

18) Интернет – ресурс: http://t-ndt.ru/index.php?id=587.

19) Иванов М.Н. Детали машин: учебник для ВУЗов / М.Н. Иванов. – М.: Высшая школа, 1984. – 336 с.

20) Биргер И. А. и др. Расчет на прочность деталей машин: Справочник/ И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1993. — 640 с.

21) Интернет – ресурс: http://www.utmachines.ru/utm/highcap/58-tinius-olsen-h100ku.html

22) Интернет – ресурс: http://sixsigmaonline.ru/load/37-1-0-210.

23) ГОСТ 16093-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Допуски. Посадки с зазором.