

Старооскольский технологический институт им А.А. Угарова (филиал)
федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего профессионального образования «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»

На правах рукописи

ПРОСКУРИН АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ
РЕВЕРСИВНОЙ ВЫРУБКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТОНКОЛИСТОВОГО ПРОКАТА БЕЗ
ЗАУСЕНЦЕВ

05.02.09 - «Технологии и машины обработки давлением»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель:
Сергиев Аркадий Петрович
д. т. н., профессор.

г. Москва - 2015

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
Введение	4
1 Состояние вопроса. Цели и задачи исследования	
1.1 Основные параметры, влияющие на качество поверхности среза при холодной листовой вырубке	6
1.2 Механизм образования заусенцев	10
1.3 Экспериментальные и теоретические исследования технологического процесса вырубки	28
1.4 Теоретические основы влияния обратной деформации на характер распределения напряжений в зоне среза	33
1.5 Объект и предмет исследования	50
1.6 Цель и задачи исследования	50
1.7 Основные положения, выносимые на защиту	51
2 Экспериментальное исследование процесса образования заусенцев в условиях применения реверсивной вырубки	52
2.1 Общая методика проведения экспериментальных исследований	52
2.2 Описание экспериментального оборудования	54
2.3 Описание комплекса измерительной аппаратуры	58
Выводы по главе	61
3 Исследование влияния знакопеременного деформирования на высоту заусенцев при реверсивной вырубке	62
3.1 Оценка параметров заусенцев и воспроизводимости опытов	62
3.2 Исследование влияния числа деформирований на образование заусенцев при вырубке	66
3.3 Установление величины и интервалов варьирования доминирующих факторов	69
3.4 План полного факторного эксперимента	78
4 Экспериментальные исследования параметров реверсивной вырубки	82
4.1 Оценка адекватности разработанной модели	82

4.2	Исследование образцов на каждой стадии деформирования	89
4.3	Подбор технологических материалов	97
4.4	Схема разделения материала при реверсивной вырубке	98
	Выводы по главе	102
5	Разработка технологических рекомендаций и оборудования для реверсивной вырубки	103
5.1	Технологические параметры процесса реверсивной вырубки	103
5.2	Разработка схемы работы серийного устройства реализующего процесс реверсивной вырубки	104
5.3	Проектирование серийной оснастки, реализующей процесс реверсивной вырубки	108
	Выводы по главе	113
	Основные результаты и выводы	114
	Библиографический список	116
	Приложения	129
П1	Справка о рекомендации к применению результатов научных исследований в производственный процесс ЗАО «СОАТЭ»	129
П2	Справка об использовании результатов научных исследований в учебном процессе СТИ НИТУ «МИСиС»	130
П3.1	Стандартизированные значения высоты заусенцев.	131
П3.2	Значения коэффициента A	131
П3.3	Значения относительной глубины пластического внедрения режущей кромки до начала образования скалывающих трещин k_0	132
П3.4	Значения высоты заусенцев h для алюминиевого сплава АД1 при числе реверсов $n=0$	133
П4	Комплект чертежей экспериментальной установки	134
П5	Комплект чертежей испытательного стенда	145
П6	Конструкторская документация инструментальной оснастки	160

Введение

Во многих отраслях промышленности, например оптико-механическая, электронная, заусенцы, возникающие в процессе изготовления деталей не допустимы. В связи с увеличением требований к точности и качеству изделий, уменьшением трудоёмкости их изготовления и ростом производительности труда возрос интерес к проблеме образования заусенцев. Доля операций по удалению заусенцев может составлять до 30% от трудоёмкости штамповки детали, а в оптико-механической и электронной промышленности превышает её в 4-5 раз.

Чтобы избежать введения дополнительных операций в технологический процесс, используют способы и методы чистовой штамповки. Одним из таких методов является реверсивная вырубка.

В патентах на устройства, реализующие подобный метод, приведено описание штампов, предназначенных для применения на кривошипных и гидравлических прессах. Но такая компоновка не позволяет использовать эти штампы на многоползунковых автоматах, осуществляющих получение широкой номенклатуры деталей с высокими требованиями к качеству для приборостроительной промышленности. Кроме того, в конструкции запатентованных штампов обратной вырубки, присутствуют быстроизнашиваемые элементы, которые ограничивают межремонтный ресурс.

В настоящее время отсутствуют технологии, позволяющие при небольших финансовых вложениях устранить появление заусенцев или свести их к минимуму, сохраняя высокую производительность процесса вырубки.

Таким образом, создание универсального способа для устранения заусенцев и оборудования, реализующего такой способ, определяет актуальность темы.

Теоретические исследования базировались на фундаментальных положениях соответствующих разделов технологии и оборудования механической обработки, технологии машиностроения, теоретической механики, теории разрушения металлов, теории математического моделирования и планирования эксперимента, стандартных и специальных программ персонального компьютера.

Экспериментальные исследования проводились на экспериментальной установке, реализующей процесс вырубki с применением знакопеременного нагружения в диапазоне изменения основных факторов.

Работа выполнена в Старооскольский технологический институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

Научная новизна:

1. Разработана математическая модель, описываемая уравнением регрессии в виде полинома первой степени, которая позволила установить значения режимов реверсивной вырубki, обеспечивающих изготовление деталей без заусенцев.

2. Установлены взаимосвязи между режимами реверсивной вырубki и величиной образующихся на изготавливаемых деталях заусенцев.

3. Определены диапазоны режимов реверсивной вырубki, при которых изготовленные детали не имеют заусенцев.

4. Экспериментально установлены соотношения механических свойств обрабатываемых материалов и параметров прямого и обратного деформирования.

Практическая ценность работы состоит в том, что на основе установленных режимов реверсивной вырубki разработано устройство реверсивной вырубki деталей без заусенцев из тонколистового проката, защищенное патентом на изобретение №2399451 и патентом на полезную модель №126270.

Сформулированы рекомендации по применению режимов реверсивной вырубki в зависимости от механических свойств материала заготовки.

Практическая ценность и новизна подтверждаются также тем, что результаты диссертационного исследования используются при проведении лекций и практических занятий по дисциплинам «Математическое моделирование в машиностроении» и «Организация и планирование эксперимента».

1 Состояние вопроса. Цели и задачи исследования

1.1 Основные параметры, влияющие на качество поверхности среза при холодной листовой вырубке

В последнее время в связи с увеличением требований к точности и качеству изделий, уменьшением трудоемкости их изготовления и ростом производительности труда резко возрос интерес к проблеме образования заусенцев.

Заусенцы, образующиеся при вырубке, представляют собой разновидность выступающих дефектов кромок и являются одним из показателей качества. Эти дефекты, как правило, являются нежелательным следствием технологического процесса производства и отрицательно сказываются на всех его этапах, начиная с базирования. Заусенцы, образующиеся на кромках при вырубке, являются причиной уменьшения точности детали, затруднения работы на автоматизированных линиях. Заусенцы ухудшают условия контроля размеров детали, препятствуют сборке изделий, могут являться источником повреждений сопрягаемых поверхностей и проводов, нарушают эксплуатационные характеристики изделия, кроме того, являются причиной травматизма и портят внешний вид изделий. При термической обработке заусенцы могут служить причиной трещин на кромках, вследствие действия напряжений растяжения. Электрические короткие замыкания также часто возникают по причине обламывания заусенцев. В связи с этим в технологический процесс часто вводят операции по удалению заусенцев, как на межоперационных, так и на финишных операциях и переходах. Затраты на выполнение данных операций могут составлять до 30% от стоимости изготовления детали в зависимости от сложности изготовления детали, а в некоторых случаях, например в оптико-механической промышленности, достигают значительно больших значений. Капиталовложения фирмы Mercedes-Benz в оборудование для удаления заусенцев составляют до 15% общего капиталовложения [1]. Указанные причины обуславливают

необходимость поиска и совершенствования технологических процессов, обеспечивающих минимизацию или устранение образования заусенцев. В настоящее время разработано более сотни методов удаления заусенцев [2]. И тем не менее, на большинстве предприятий заусенцы удаляют вручную простейшим слесарным инструментом или полуавтоматическим способом, а время, затрачиваемое на выполнение данных операций, возрастает по экспоненте с увеличением размеров заусенца и уменьшением его податливости [3,4]. Выбор способа удаления заусенцев зависит от размеров, формы, а также места расположения заусенцев. При этом стоимость операции тем меньше, чем меньше размеры заусенцев. Следовательно, для уменьшения затрат на удаление заусенцев необходимо стремиться к минимизации их размеров. В развитых странах для некоторых видов обработки уже разработаны рекомендации по выбору рациональных параметров технологических процессов механической обработки с целью уменьшения размеров заусенцев.

Чтобы избежать введения дополнительных операций в технологический процесс, используют способы и методы чистовой штамповки. Например, в часовой и оптикомеханической промышленности применяют прессы чистовой вырубки фирмы «Файнтулл», однако в конструкции штампов имеется клиновидное ребро, расположенное на расстоянии эквидистантном контуру вырубки детали, которое с одной стороны создает напряженное состояние всестороннего неравномерного сжатия, что обеспечивает получение среза без заусенцев, а с другой стороны приводит к превышению расхода металла.

Однако особую актуальность в настоящее время приобретает проблема предотвращения образования заусенцев, что требует не только большого количества наблюдений и опытных данных, но и четкого научного объяснения физической сущности, происходящих при листовой вырубки процессов и их математического описания. Решение этого вопроса только экспериментальным путем осложнено большим количеством факторов, влияющих на механизм образования заусенцев. Размеры заусенцев зависят практически от всех параметров технологического процесса вырубки. Экспериментальные

исследования нередко затруднены из-за проблем с метрологией заусенцев. Эти проблемы могут быть обусловлены различием параметров заусенцев вдоль кромки, труднодоступностью заусенцев или необходимостью использования специальных измерительных устройств. На сегодня разработаны аналитические модели, раскрывающие механизм образования некоторых типов заусенцев [5]. Использование этих моделей позволяет в некоторой степени управлять механизмом образования заусенцев, но предлагаемые разработки имеют чрезвычайно узкую область применения и не позволяют решить проблему предотвращения появления заусенцев. Исследователи в работе [6] в связи с этим полагают, что исключить образование заусенцев совсем нельзя и следует стремиться только к уменьшению их размеров. В то же время, в работе [7] считают, что любым явлением, в том числе и образованием заусенцев можно управлять вплоть до предотвращения их появления. Это предположение также подтверждается в работе [8], в которой предложена модель образования заусенцев на выходе в направлении главного движения при свободном ортогональном резании, которая позволяет практически полностью контролировать технологический процесс образования заусенцев.

К заусенцам не следует относиться, как к неизбежному следствию технологического процесса вырубki, необходимо глубже изучить механизм их возникновения и производить дальнейшие исследования по исключению их образования. Для этого необходимо остановиться на основных факторах, определяющих условия оптимального процесса вырубki.

Показателями качества при вырубке являются такие геометрические погрешности формы, отмеченные в работе [9]:

- а) неплоскостность детали вследствие действия изгибающих моментов, вызванных действующими силами;
- б) утяжины, у свободных поверхностей вблизи поверхности среза;
- в) уменьшение поперечного размера вырубленного изделия;
- г) образование второй поверхности скола;

д) выход параметров шероховатости боковой поверхности изделия за пределы требований чертежа.

Однако, как отмечено в работе [9], наиболее существенное влияние на качество оказывает наличие заусенцев. Схематично виды дефектов при вырубке показаны на рисунке 1.1.

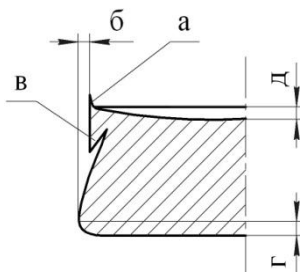


Рисунок 1.1 - Виды дефектов, образующихся на листовом изделии при вырубке.
а - заусенец, б - уменьшение диаметрального размера,
в - вторая поверхность скола, г - утяжина, д - прогиб.

Для устранения вышперечисленных дефектов применяют прижимы или уменьшают зазоры между режущими кромками рабочего инструмента. Оба эти способа уменьшают действующие на заготовку в процессе вырубке изгибающие моменты [9].

Каждый вид дефектов имеет свои допустимые значения, которые как раз и контролируются применением вышеназванных способов снижения изгибающих моментов. Например, допустимая шероховатость поверхности среза R_a в зависимости от требуемой точности изделия может быть равна от 0,032 до 6,3 мкм. И только в отношении заусенцев необходимо стремиться к нулевому значению их размеров, так как они, как было отмечено ранее, кроме величины зазора зависят от комплекса факторов, в результате заусенцы влияют на безопасность эксплуатации, точность готового изделия, а также другие показатели.

1.2 Механизм образования заусенцев

Согласно международному стандарту, [10] заусенец - пластически деформируемый материал, образованный на кромке детали в результате обработки резанием или вырубкой. Заусенец включает в себя весь материал, находящийся за пределами теоретического пересечения двух поверхностей, образующих кромку детали. В некоторых случаях заусенец может располагаться внутри теоретического пересечения двух поверхностей. В этом случае кромка представляет собой не линию, а определенную поверхность (округление). К заусенцам причисляют и другие выступающие дефекты, образующиеся при штамповке, ковке и других операциях.

К основным параметрам заусенцев относятся:

1. размеры (высота, толщина, длина);
2. твердость;
3. форма поперечного сечения;
4. конфигурация в продольном направлении;
5. местонахождение (доступность).

Поперечное сечение заусенцев, образующихся при вырубке, имеет форму близкую к треугольной. Они имеют стабильное основание, не имеют слабых мест и трудно поддаются обламыванию. На рисунке 1.2 представлены основные параметры заусенца.

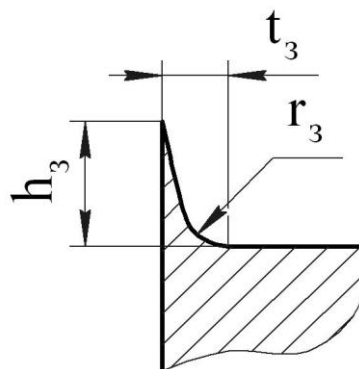


Рисунок 1.2 - Основные параметры заусенца.

h_3 - высота заусенца; r_3 - радиус заусенца; t_3 - толщина корня заусенца.

Различают прилегающее к необрабатываемой поверхности основание (корень) и вершину заусенца. Толщиной заусенцев t_3 называют толщину корня заусенца, определяемую в его поперечном сечении вдоль необрабатываемой поверхности, образующей кромку. Высотой заусенца h_3 называют размер, определяемый в поперечном сечении заусенца от теоретической линии кромки до наиболее удаленной вершины заусенца. Радиус заусенца r_3 определяется в его поперечном сечении у основания заусенца со стороны необрабатываемой поверхности. Длиной заусенца l_3 называется размер, характеризующий протяженность заусенца вдоль кромки вырубленного изделия (в основном это периметр заготовки). Твердостью заусенца H_3 называют твердость корня заусенца, измеренную на теоретической линии необрабатываемой поверхности.

Степень значимости того или иного параметра заусенца зависит от влияния, оказываемого им на трудоёмкость устранения заусенцев. К. Такава [11], например, располагает свойства заусенцев в следующей последовательности: толщина, расположение, твердость, длина. Если считать заусенец короткой консольной балкой, то усилие для его полного удаления, очевидно, зависит от толщины корня заусенца, характеризующей прочность закрепления заусенца на кромке. Также есть и другие мнения. Например, в работе [12] отдается предпочтение высоте заусенцев. Причина этих разногласий, вероятно, заключается в различии предполагаемых способов устранения заусенцев, так как для каждого способа значимость определенного параметра различна. Если требования к кромке готового изделия не высокие, то в некоторых случаях целесообразно удалять только наиболее тонкую и длинную часть (вершину) заусенца, то есть уменьшать h_3 , а если к кромке предъявляются требования шероховатости поверхности Ra 0.32 и менее, то необходимо удалять заусенцы вместе с корнем. Обычно допускается скругленная вершина основания корня, не выходящая за пределы допуска на толщину изделия.

В соответствии с источниками [13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23] обобщенные параметры, влияющие на высоту заусенцев при вырубке, целесообразно классифицировать:

1 Конструктивные параметры - величина зазора между пуансоном и матрицей, конструкция штампа (жесткость, прочность и стойкость рабочих инструментов штампа, точность подачи заготовки, точность изготовления штампа, соосность пуансона и матрицы), профиль вырубki;

2 Технологические параметры - степень износа торцовых и боковых поверхностей пуансона и матрицы (притупление рабочих кромок, выкрашивание, деформация), скорость сдвига металла при вырубке, смазка при вырубке;

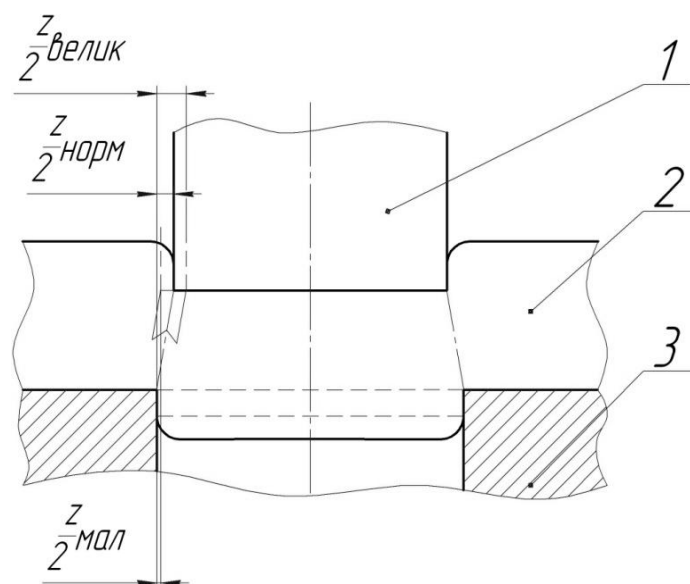
3 Физико - механические характеристики обрабатываемого материала.

Рассматривая конструктивные параметры в первую очередь, необходимо акцентировать внимание на влияние величины зазора на характер образования заусенцев.

Под технологическим зазором понимают положительную или отрицательную разность рабочих размеров матрицы и пуансона z .

При выборе величины зазора, кроме размеров заусенцев и качества поверхности среза, необходимо учитывать желаемую стойкость инструмента, на которую существенное влияние оказывает зазор, а также требования, предъявляемые к точностным параметрам штампуемой детали.

На рисунке 1.3 схематично показана вырубка при разных зазорах.



1 - режущая кромка пуансона; 2 – заготовка; 3 – режущая кромка матрицы.

Рисунок 1.3 – Зазор между матрицей и пуансоном.

При нормальном зазоре, трещины, идущие от режущих кромок пуансона и матрицы, совпадают, что и способствует образованию качественной, без трещин и заусенцев поверхности среза. Такая поверхность показана на рисунке 1.4.

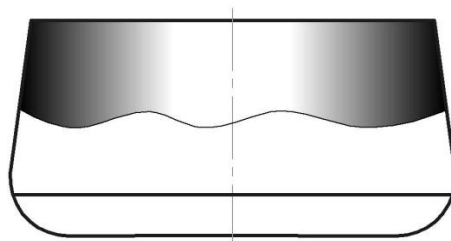


Рисунок 1.4 – Форма поверхности среза вырубленной детали при нормальном зазоре.

Верхняя часть детали имеет размеры, соответствующие размерам пуансона, а нижняя — матрицы. Часть детали, обращенная к матрице, имеет характерный блестящий пояс с небольшим закруглением кромок; часть, обращенная к пуансону, является слегка конической и шероховатой. Боковая поверхность детали (поверхность среза) получается, таким образом, не строго вертикальной, однако по своему виду вполне удовлетворительной.

Следует отметить, что удовлетворительная форма поверхности среза получается при острых режущих кромках штампа даже и при достаточно больших зазорах — до 30% от толщины.

На рисунке 1.5 показана форма поверхности среза вырубленной детали при малом зазоре.

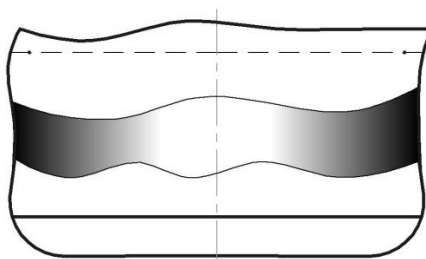


Рисунок 1.5 – Форма поверхности среза вырубленной детали при малом зазоре.

При малом зазоре скалывающиеся трещины не совпадают, а идут как бы параллельно на некотором расстоянии друг от друга. При окончательном разрыве металл между этими трещинами образует слоистость на поверхности среза. В результате этого в верхней части детали образуется второй блестящий пояс с неровным зубчатым краем и небольшим конусным уширением кверху. При такой схеме вырубки уменьшается стойкость рабочих частей штампа, что ведет к увеличению себестоимости готовых деталей.

На рисунке 1.6 показана форма поверхности среза вырубленной детали при большом зазоре.

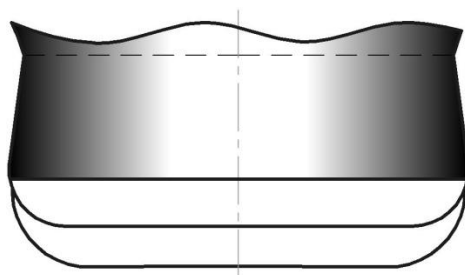


Рисунок 1.6 – Форма поверхности среза вырубленной детали при большом зазоре.

В случае большого зазора, при очень тонком материале (до 1,5 мм) происходит втягивание металла в зазор между матрицей и пуансоном с последующим обрывом. Изделие при этом выходит с рваными заусенцами, имеющими вид затянутых краев. Очень большие зазоры (свыше 30—40% от толщины) при вырубке более толстых материалов приводят к образованию сильно закругленной кромки детали со стороны матрицы и кромки отверстия со стороны пуансона.

При проектировании штампов, величину зазора определяют в зависимости от рода и толщины материала и для толщин от 0,5 до 10—12 мм она колеблется в пределах 4—16% толщины материала. При выборе зазора стремятся к установлению оптимальной его величины, при которой удовлетворяются основные четыре условия качественной вырубки, а именно: наименьшее усилие вырубки, высокое качество поверхности среза изделия, наибольшая точность штамповки и, как следствие, наиболее высокая стойкость штампа.

В инженерных расчетах при проектировании штампов зазор обычно определяют из зависимости

$$z = ms, \quad (1.1)$$

где m — переменный коэффициент, учитывающий род и толщину материала s , который определяют по нормативам [24].

Таким образом, рассматривая вопрос о зазоре при вырубке, следует особо подчеркнуть, что качество штампуемых деталей зависит не только от величины зазора, но и от его равномерности по периметру. Неравномерный зазор приводит к неравномерному распределению по периметру усилий резания и боковых усилий, что приводит к неравномерному притуплению режущих кромок, появлению поясков вторичного среза в местах уменьшенного зазора и заусенцев в местах увеличенного зазора, а появление боковых усилий, действующих на пуансон, увеличивает вероятность его износа от усталостного разрушения.

Вторым конструктивным параметром, влияющим на образование заусенцев, является величина притупления режущих кромок инструмента, что обеспечивает

более интенсивное скольжение материала по торцовым поверхностям матрицы и пуансона, в результате чего, скалывающие трещины появляются при более глубоком внедрении инструмента в деформируемый материал, а зона пластического разрушения увеличивается. Эта пластическая деформация сопровождается более интенсивным упрочнением материала в зоне разделения, что в свою очередь приводит к возрастанию сопротивления разделению. Образующиеся при вырубке заусенцы на отдельной части заготовки и на отходе является частью упрочненной зоны очага деформации и следовательно, взаимодействие с рабочими поверхностями матрицы и пуансона интенсифицирует их износ.

Как отмечается в работе [24], при затуплении режущих кромок пуансона заусенцы образуются на вырубке детали. При затуплении матрицы - вокруг отверстия. Если затупились и матрица, и пуансон, заусенцы образуются и на детали, и вокруг отверстия на материале [24].

Незначительное притупление режущих кромок ($r = 0,05 \div 0,1$ мм) в случае вырубке из стали толщиной свыше 1 мм не вызывает появления заусенцев и повышает стойкость штампа. Например, при чистовой вырубке с зазором 0,01 мм, а также при зачистке рекомендуется искусственное притупление режущих кромок матрицы. Такое же притупление рекомендуется у режущих кромок пуансона, работающего в паре с твердосплавной матрицей. Однако при вырубке материалов толщиной менее 1мм притупление режущих кромок не допустимо. Обычно притупление режущих кромок пуансона и матрицы происходит самопроизвольно в процессе эксплуатации штампа.

С увеличением числа циклов штампа происходит разрушение режущих кромок и их округление под влиянием износа, что в сочетании с износом боковых поверхностей приводит к увеличению зазора и, следовательно, увеличению высоты заусенцев. Соответственно необходимо выбирать такие режимы штамповки, которые ограничивают разрушение и износ режущих кромок инструмента. При достижении верхнего допустимого предела одного из

параметров заусенца, необходимо принимать соответствующие меры: перетачивать, выполнять замену или восстановление пуансона или матрицы.

Согласно работе [25] быстрое притупление и износ режущих кромок инструмента могут быть вызваны неточностью пресса, в частности за счет увеличения зазора в подвижных элементах штамповой оснастки, либо неправильным выбором материала инструмента или режима его технического обслуживания. Кроме того, причиной износа матрицы может быть набивание отходов.

Таким образом, образование заусенцев по всему периметру детали в основном может быть связано с большим зазором или затуплением кромок инструмента. Образование заусенцев с одной стороны периметра связано с несоосностью штампа. В штампах последовательного действия может присутствовать неточность подачи, что также сказывается на образовании заусенцев. В случае образования местных заусенцев причиной обычно является некачественная обработка пуансона, матрицы, или локальные дефекты режущих кромок (забоины, выкрашивания и т.д.).

В работе [26] показано, что стойкость пуансона можно увеличить в 5-6 раз при нанесении рифлений на торцовую поверхность пуансона с шагом 0,4 мм, что будет содействовать получению большего числа готовых изделий с малыми заусенцами или без заусенцев. Рекомендуемая шероховатость рабочих кромок инструмента должна быть от $Ra = 0,32$ мкм до $Ra = 0,1$ мкм.

Для ограничения образования заусенцев также нужно стремиться к ограничению пластичности вырубаемого материала, обеспечению концентрации растягивающих усилий для более плавного образования трещин, а также сохранению необходимой остроты режущих кромок рабочего инструмента [27].

В работе [28] проведен анализ качества поверхности детали после вырубки в зависимости от схемы напряженного состояния, который показал, что при реализации схемы с приложением давления прижима на внешней границе заготовки наблюдается существенное улучшение качества поверхности разделения в сравнении с обычной схемой вырубки. Это объясняется созданием

повышенного гидростатического давления и реализацией схемы всестороннего сжатия. При всестороннем сжатии заготовки в зоне очага условия деформирования близки к чистому сдвигу, ширина очага деформации уменьшена в сравнении с обычной вырубкой, деформации по толщине распределены более равномерно и разрушение происходит почти, одновременно по всей толщине без образования трещин, идущих от режущих кромок. Всестороннее сжатие приводит к тому, что образующиеся заусенцы существенно меньше, чем при обычной вырубке, что в определенной степени связано с уменьшением действия изгибающих моментов на технологический процесс деформирования.

Для определения зависимости размеров заусенцев от физико-механических характеристик материала заготовки в работе [8] были проведены исследования, которые показали, что при вырубке из алюминия А2 размеры заусенцев больше, чем при вырубке из Ст20. Автором данной работы сделано предположение, что поскольку прочностные характеристики (предел текучести, предел прочности, твердость) у Ст20 больше, чем у А2, то по всей вероятности при увеличении этих характеристик и у других материалов, размеры заусенцев уменьшаются, т.е. величина заусенцев зависит от комплекса физико-механических свойств материала.

Первые исследования изменения упруго-пластических свойств металлов при знакопеременном деформировании были сделаны в последней четверти 19 века Иоганном Баушингером [29]. Открытие в этой области, вошло в литературу под названием эффект Баушингера, его суть состоит в том, что, при вторичном нагружении напряжениями обратного знака (обратном нагружении) предел пропорциональности материала понижается по сравнению с величиной напряжения прямого нагружения, превышающего предел пропорциональности.

В дальнейшем исследование закономерностей циклического упругопластического деформирования показало, что материалы, имеющие резко выраженный эффект Баушингера, при циклическом деформировании разупрочняются. [30]

В работе [31] сделано предположение, что эффект Баушингера объясняется внутренними напряжениями второго рода, которые остаются в более слабых зернах деформируемого образца после удаления нагрузки и суммируются с напряжениями, создаваемыми внешней нагрузкой противоположного знака. Авторы путем экспериментальных исследований установили:

- При повторном нагружении противоположного знака (при растяжении после предварительного сжатия или при сжатии после предварительного растяжения) наблюдается весьма большое снижение предела пропорциональности, особенно у высокоотпущенных сталей и магниевых сплавов. У сталей 30ХГСА и 30ХГСНА в состоянии низкого отпуска, пределы пропорциональности снижаются на 15-30%. У алюминиевых сплавов В-95 и Д-16 пределы пропорциональности снижаются еще меньше – на 10-20%.
- Перемена знака нагрузки значительно меньше сказывается на величине предела текучести.
- У чистого алюминия изменение пределов пропорциональности и текучести при повторном нагружении вообще не проявляется, у чистой меди выражено слабо.
- У материалов, обладающих площадкой текучести, изменение пределов пропорциональности и текучести связано не только с остаточными напряжениями второго рода, но и с тем, что при первом нагружении разрушается жесткий каркас по границам зерен, являющийся причиной существования площадки текучести.

Исследователи [32] экспериментально подтвердили гипотезу Г.Б. Тальпова [33], которая состоит в том, что значения параметра эффекта Баушингера при цикле нагружения сначала растяжение потом сжатие и при цикле нагружения сначала сжатие потом растяжение, полностью совпадают.

В результате экспериментов описанных в работе [34], установлено, что упрочнение металла, вызванное предшествующей калибровкой, оказывает

существенное влияние на истинное сопротивление деформированию при приложении нагрузки в направлении, перпендикулярном к предшествующей.

В работе [35] приводится описание, применимого в многооперационных процессах холодной штамповки, эффекта реверса знака истории деформирования (РЗИД). Такой эффект позволяет получить большие суммарные степени деформаций при снижении количества термохимических операций и величин деформирующих усилий, а также увеличить коэффициент использования материала.

Сущность эффекта РЗИД состоит в том, что соблюдая определенную последовательность штамповочных операций, при которой каждая последующая операция меняет знаки пластической деформации предыдущей на противоположный в идеальном случае в трех направлениях, т.е. при объемном деформировании, можно обнаружить общее повышение пластических характеристик металла и уменьшение деформирующих усилий на каждой операции, следовательно, объемное сжатие повышает пластичность материала и препятствует трещинообразованию.

В ряде исследований [36, 37, 33] также наблюдают уменьшение деформирующих усилий при реверсировании связанное с проявлением эффекта Баушингера, и считают, что повышение пластических свойств материала требует дальнейшего теоретического обоснования и очевидно связано с использованием объемного (трехосного) сжатия детали.

Другим параметром, влияющим на качество поверхности среза являются силы трения, которые возникают при вырубке между рабочим инструментом и заготовкой, на преодоление которых затрачивается часть усилия вырубki. Силы трения приводят к износу рабочих инструментов штампа, а также ограничению скоростей вырубki из-за чрезмерного разогрева контактных поверхностей заготовки. Наиболее эффективным путем решения проблемы снижения сил трения при вырубке является создание жидкостного режима трения за счет гидродинамического эффекта технологической смазки [38].

В результате изложенного можно сделать вывод о том, что применение смазки при вырубке способствует уменьшению размеров образующихся заусенцев. Наличие смазки способствует уменьшению усилия вырубки, подобно снижению пластичности материала заготовки или увеличению скорости вырубки, что способствует уменьшению размеров высоты заусенцев. Существенным недостатком применения смазки является необходимость ее тщательного удаления с деталей, на которые в дальнейшем требуется наносить гальванические и другие покрытия. Введение дополнительной операции по удалению смазки увеличивает трудоемкость и себестоимость изделия.

Проведенный анализ параметров, обеспечивающих качество штампованных заготовок, показал, что важными параметрами является зазор и состояние режущих кромок штампа. Многочисленными исследованиями [39,40,41,42,43,44] установлено, что неправильный зазор и тупые режущие кромки штампа увеличивают потребное усилие и работу вырубки.

Из технологических параметров наибольшее влияние на качество изделий оказывает износ режущих кромок пуансона и матрицы. По мере износа инструмента высота заусенца h_3 , образующегося на вырубленном изделии, возрастает. После вырубки определенного количества изделий износ рабочих инструментов штампа и, следовательно, высота образующихся заусенцев интенсивно увеличиваются, что свидетельствует о необходимости заточки рабочих инструментов или их замены [12].

Систематический контроль h_3 является условием правильной эксплуатации вырубных штампов.

Введено понятие предельно допустимая высота заусенца h_{\max} , которая зависит от рода и толщины листового материала, требуемой точности, производства и т.п.

Определение заусенца как "искажение поверхности или кромки вырезанного изделия, связанное с образованием острых выступов", приведенное в польском стандарте PN-60/M-66002, не имеет практической ценности. Под высотой заусенца на вырубленной детали понимается

наибольшая высота заусенца, причем поверхность отнесения (основание заусенца) - это плоская поверхность материала, находящаяся в непосредственной близости к заусенцу. Обычно линия вершин заусенца вдоль линии реза (профиль заусенца) - неровная и расщепленная. В соответствии с данным определением, высотой заусенца следует считать h_{\max} .

Значения высот заусенцев по проекту стандарта [10], представляют собой ожидаемые величины высот заусенцев. Которые определяются как краевые неровности, расположенные вдоль открытой или замкнутой линии реза.

В другом варианте стандарта от 1975 года, предназначенном для опытного применения, установлено, что заусенец - это, как правило, тонкий или острый выступ - "передача" металла на кромке реза. Однако наиболее правильным представляется следующее определение: заусенец - это тонкие и острые неровности, расположенные вдоль линии реза и выступающие над поверхностью вырубленного материала.

В стандарте [10] зависимость высоты заусенца h_3 ограничивается всего тремя факторами:

- толщины вырубаемого материала;
- прочности вырубаемого материала на растяжение;
- заданной точности исполнения вырубленной детали.

Достижение заданной в стандарте точности вырубки зависит от зазора между рабочими инструментами штампа, точности исполнения рабочего инструмента и пресса, а также других технологических факторов, что в сущности совпадает с представленной нами ранее классификацией, но в суженном виде.

Другим существенным параметром, влияющим на минимизацию величины заусенцев, являются исследования по совершенствованию конструктивных и кинематических параметров вырубных штампов.

Применение прижимов, уменьшающих зазоры, т.е. поддерживающих величину зазора между режущими кромками рабочих инструментов штампа до

расчетного минимума оказывает существенное влияние на механизм образования заусенцев.

В работе [45] в результате рассмотрения влияния прижима на контактные напряжения и износ рабочих частей штампа, а также установлено:

- 1) уменьшается износ торцевой поверхности матрицы, за счет того, что наличие прижима приводит к увеличению контактного пояска матрицы, что приводит к уменьшению нормального напряжения на нем;
- 2) усилие на пуансоне при наличии прижима заготовки уменьшается, что приводит к уменьшению силы трения на боковой поверхности пуансона и уменьшает его износ.

При вырубке с прижимом зазор между пуансоном и матрицей принимается равным $0,005 \div 0,01$ толщины заготовки, т.е. значительно меньшим, чем при обычном технологическом процессе вырубке, в результате чего можно сделать вывод, что при вырубке с прижимом образование заусенца за счёт увеличенного зазора исключается. Но при уменьшении зазора требуется увеличение усилия вырубке, что влечет за собой более интенсивный износ пуансона и матрицы.

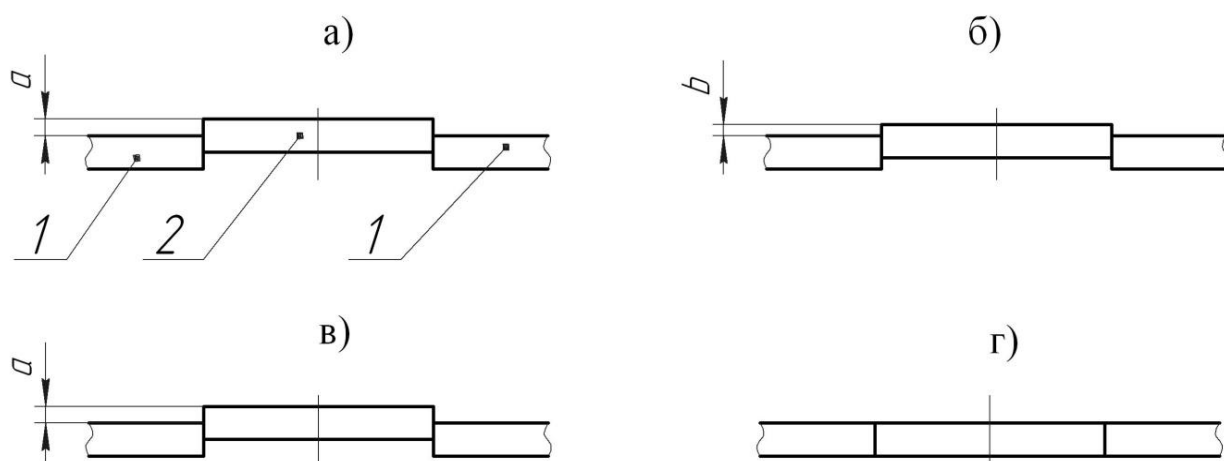
В работе [46] предложена установка механизма дополнительного перемещения пуансона, кинематически связанного с подвижной верхней плитой штампа, которая выполняет предварительное поджатие заготовки перед вырубкой, что в итоге позволяет осуществить чистовую штамповку на обычном универсальном штамповочном одноходовом прессе.

Предлагаемое техническое решение позволяет отказаться от применения сложного зарубежного оборудования для чистовой штамповки. К недостаткам данного способа следует отнести сложность конструкции штампа, что удорожает его изготовление и эксплуатацию и соответственно увеличивает трудоемкость изготовления деталей и себестоимость деталей.

В работе [47] описан способ обратной вырубке деталей из тонколистового материала, схематично представленный на рисунке 1.7, который осуществляется путем зажима материала и его разделения путем четырехкратного по меньшей мере внедрения в вырубаемый участок инструментов, которое проводят

попеременно с противоположных сторон сначала на глубину, не вызывающую образования трещины скола, а затем на глубину, обеспечивающую разделение, отличающийся тем, что с целью предотвращения образования заусенцев, второе внедрение инструмента проводят на меньшую глубину, чем первое, а полное разделение проводят при четвертом рабочем ходе.

Этот способ осуществляется следующим образом. Обрабатываемый тонколистовой материал зажимают на участке 1, охватывающем вырубаемый участок 2, а разделение (вырубку) проводят путем четырехкратного внедрения инструментов для вырубки в вырубаемый участок. На первом переходе, рисунок 1.7 а), в материал с одной стороны внедряют инструмент на глубину a , не вызывающую образования трещин скола. На втором переходе, рисунок 1.7 б), на этот же участок воздействуют другим инструментом, с другой стороны материала и инструмент внедряют в материал на меньшую глубину b , чем первый. На третьем переходе, рисунок 1.7 в), на материал воздействуют вновь первым инструментом и возвращают вырубаемый участок материала в положение, которое он занимал после первого перехода. На четвертом переходе, рисунок 1.7 г), на вырубаемый участок воздействуют тем же инструментом, что на втором переходе, возвращают вырубаемый участок в исходное положение, запрессовывают в материал и при этом производят окончательное разделение.



а) первая предварительная вырубка на глубину a ; б) вторая (реверсивная) предварительная вырубка на глубину b ; в) третья предварительная вырубка, возвращающее заготовку в положение после первой предварительной вырубки; г) окончательная вырубка.

Рисунок 1.7 – Последовательность чистовой вырубки деталей.

Предлагаемый способ и штамп для его осуществления обеспечивают фиксированную глубину внедрения инструментов, возможность регулировки этой глубины, исключение влияния кинематической погрешности прессы на фиксированную глубину внедрения и, следовательно, возможность осуществления обратной вырубki тонколистового материала с получением повышенной чистоты среза и предотвращение образования заусенцев на вырубаемых деталях.

К недостаткам данного способа является низкая производительность, и то что для каждого материала заготовки необходимо подбирать соответствующую глубину внедрения рабочих частей. Это значительно увеличит трудоемкость изготовления и себестоимость деталей.

В работе [48] описан способ, направленный на устранение образования заусенцев, в котором штамп снабжается кольцом, жестко связанным с пуансоном, эквидистантным рабочему контуру пуансона, выступающим за рабочий торец последнего в направлении матрицы и расположенным между рабочим контуром пуансона и прижимом, а также тем, что на зеркале матрицы выполнена дополнительная кольцевая выемка, соответствующая выступающей части кольца.

При вырубке на этом штампе уменьшается износ режущих кромок пуансона. Возможность увеличения зазора в 10-15 раз по сравнению с обычной вырубкой и снижение влияния неравномерности зазора на качество среза позволяет упростить изготовление, подгонку и сборку инструмента, расширить технологические возможности получения плоских деталей и повысить срок эксплуатации инструмента. Даже при очень сильном притуплении режущих кромок ($r \approx s$, где r - радиус закругления кромок; s - толщина обрабатываемого листа) и зазоре $z=(0.5\div 0.6)s$ вырубленные детали не имеют заусенцев.

Данные испытаний приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Результаты испытаний экспериментального штампа

Материал заготовки	Толщина материала, мм	Радиус притупления режущей кромки пуансона, мм	Зазор между режущими кромками пуансона и матрицы, мм	Высота заусенцев, мкм	
				Обычная вырубка	Вырубка экспериментальным штампом
Сталь Ст 08 кп	0,09	0,1	0,025	69	0
Латунь Л 63	0,13	0,1	0,025	53	0
Медь МЗ	0,32	0,1	0,025	52	0

Предложенный штамп опробован в лаборатории кафедры машин и технологии обработки металлов давлением Белорусского политехнического института.

Недостатком данного способа является увеличение расхода материала за счет увеличения площади действия на материал, и то, что штамп не был испытан в условиях производства.

В работе [49] установлено, что для листовой штамповки можно эффективно использовать продольные, радиальные и крутильные ультразвуковые колебания, которые подаются на пуансон, матрицу или пуансон и матрицу одновременно с расположением очага деформации в пучности смещений или в пучности напряжений стоячей волны.

Как показали исследования, применение в листовой штамповке ультразвуковых колебаний позволяет снизить усилие деформации (например, для стали X18H10T на 57 %), повысить предельную степень деформации, обеспечить ее равномерность и высокое качество изделий за счёт уменьшения величин шероховатости. Всё это возможно потому, что применение ультразвуковых колебаний в технологических процессах листовой штамповки сопровождается локальным разупрочнением, связанным с нагревом металла в очаге деформации и изменением условий трения на контактной поверхности инструмент-заготовка.

Однако применение ультразвуковых колебаний в технологических процессах листовой штамповки не целесообразно за счет сложности настройки и поддержания режима ультразвуковых колебаний, высокой энергоёмкости ультразвуковых генераторов, а также требования высококвалифицированного обслуживания.

В работе [50] описан способ, при котором перед вырубкой на поверхности выполняют клиновое углубление эквидистантное контуру детали с углом при вершине 90° и со смещением вершины от контура детали в сторону отхода, а вырубку выполняют со стороны, противоположной клиновому углублению. Вершину клинового углубления смещают от контура детали на величину $(15 \div 50)\%$ от толщины материала. При этом получаемая поверхность контура детали имеет параметр шероховатости $Ra=3,2\text{мкм}$, размеры заусенцев уменьшаются незначительно.

Фукун, Кондо и Маеда [1] предложили и экспериментально освоили способ чистовой вырубки ступенчатым пуансоном на прессах простого действия или на гидравлических прессах. Сущность этого способа заключается в том, что вырубной пуансон имеет уступ высотой меньше глубины вдавливания пуансона до образования скола. При вдавливании уступа диаметром d_n' в заготовку скалывающихся трещин не возникает. Диаметр уступа меньше диаметра матрицы на зазор $2z=0,06 \div 0,14$ мм. Диаметр верхней части пуансона больше диаметра матрицы на $2z = 0,14 \div 0,4$ мм. Таким образом, при рабочем ходе пуансона происходит вырубка пуансоном d_n' , меньшим размера матрицы. Вследствие этого очаг деформации значительно увеличивается, происходит выдавливание металла в радиальном направлении и возникновение напряжений радиального сжатия, предотвращающих образование скалывающихся трещин. Недостатком этого способа является необходимость точной регулировки пресса повышенной жесткости.

Известен способ чистовой вырубки пуансоном, перекрывающим матричное отверстие. Он применяется главным образом для мягких цветных металлов и сплавов небольшой толщины [51]. В этом случае вместо обычной вырубки

происходит выдавливание пластичного металла в отверстие матрицы по способу прямого выдавливания, причем скалывания не возникает. Лишь в конце хода, когда происходит сжатие и наклеп металла между режущими кромками, возникают скалывающие трещины. Обычно диаметр пуансона делается больше диаметра матрицы на $(0,1 \div 0,2)$ толщины заготовки. При закругленной форме детали припуск пуансона делается равномерным, в случае же детали с углами и выступами припуск у наружных углов принимается в два раза больше, то есть от 0,2 до 0,4 толщины заготовки, а внутренних углов – в два раза меньше, то есть от 0,05 до 0,1 толщины заготовки. В нижнем рабочем положении пуансон не должен доходить до поверхности матрицы на $(0,1 \div 0,2)$ мм. Деталь после выхода из штампа увеличивается в размерах на $(0,02 \div 0,05)$ мм. Шероховатость поверхности среза доходит до $Ra=0,63$ мкм. Указанный способ вырубки применяется как при резке из полосы, так и в случае вырезки из предварительно вырубленной заготовки с соответствующими припусками по контуру.

Все рассмотренные способы направлены на устранение образования заусенцев на поверхности листового материала при штамповке, но имеют определенные недостатки и решают отдельные частные вопросы. В результате можно сделать вывод о возможности и необходимости оптимизации конструктивных и технологических решений, представленных в описанных способах, а также разработки новых, наиболее оптимальных и универсальных способов.

1.3 Экспериментальные и теоретические исследования технологического процесса вырубки

Аналізу технологического процесса вырубки на основе экспериментальных исследований посвящено большое количество работ [52,53-63]. Динамические процессы вырубки исследованы в работах [64-82]. Экспериментально установлены оптимальные величины зазоров, формы режущих кромок

инструмента и различные схемы ведения операций, позволяющие обеспечить наилучшие качества поверхности разделения для различных материалов.

Исследования теоретических основ технологического процесса вырубки рассматривают анализ напряженно-деформированного состояния и оценку силовых режимов технологического процесса до момента зарождения трещины, но результаты этих работ практически не позволяют прогнозировать геометрию поверхности разделения и оценить отклонения формы и шероховатости среза. Тимошенко В.А. [53] методом линий скольжения рассмотрел задачу о резке полосы. Показано, что по мере роста глубины внедрения ножа очаг пластической деформации уменьшается, при этом возможность разрушения оценивалась как по предельной степени деформации, так и по исчерпанию ресурса пластичности. Показано, что глубина внедрения ножа в заготовку без разрушения зависит от механических характеристик материала и величины гидростатического давления в зоне разделения.

В работе [58] исследован очаг пластической деформации при вырубке листового материала с помощью метода конечных элементов. Авторы рассматривают деформационные процессы, происходящие в заготовке до начала разрушения.

Холина Н.Н. и Османова Т.З. [59] изучали неоднородности поля деформирования при вырубке-пробивке и рассматривали технологические процессы, происходящие в заготовке [58] до начала разрушения. В рассматриваемых работах технологический процесс образования заусенцев затронут не был.

В работах [55, 56] проведено численное моделирование технологических процессов вырубки-пробивки. В основу модели положено численное решение задач теплопроводности и термоупругопластичности. Интегральная постановка задачи в этой работе заключалась в минимизации соответствующих функционалов. Для решения сформулированной задачи предлагается подход, базирующийся на раздельном рассмотрении контактирующих тел. Итерационная процедура решения контактной задачи термоупругопластичности строится на

последовательном решении задач термоупругопластичности и последовательном удовлетворении контактных механических условий кинематических и силовых. На каждом этапе нагружения после итерационного решения сначала механической, а затем тепловой контактных задач осуществляется пересчет координат области с учетом деформирования тел и анализируется степень повреждаемости материала. Разрушение материала в технологическом процессе больших деформаций определяется с помощью функции повреждаемости. То есть зоны, в которых функция повреждаемости достигает критического значения, из дальнейшего рассмотрения исключались, тем самым в материале моделировался технологический процесс образования и развития трещин. При построении разрешающих уравнений использовался метод конечных элементов. Предложенный подход отличается сложностью и не затрагивал анализ механизма образования заусенцев.

Одно из первых решений задачи прогнозирования качества поверхности разделения заготовок с помощью математической модели, описано в работе [61], в которой на базе метода конечных разностей моделируется технологический процесс резки трубчатой заготовки импульсным магнитным полем. Система уравнений, включающая в себя уравнения движения условия текучести и системы уравнений связи скоростей перемещений со скоростями деформаций, записанная для осесимметричных состояний интегрирована численно методом конечных разностей на треугольных сетках. Для каждой ячейки разностной сетки на каждом шаге интегрирования по времени определяли суммарную степень использования запаса ресурса пластичности. При этом, если ресурс пластичности превышал предельные значения, моделировался технологический процесс разрушения ячейки конечно-элементной сетки. И полагали, что трещина проходит через ячейку в направлении перпендикулярном первому главному напряжению. Для уточнения полученного решения применялась итерационная процедура, позволяющая уточнить напряженно-деформированное состояние после возникновения трещины. Сама трещина имитировалась путем исключения из рассмотрения ячеек конечно-разностной сетки, в которых был исчерпан ресурс

пластичности. К сожалению, точность полученного решения с точки зрения оценки качества поверхности разделения, зависит от размеров конечно-разностной сетки, при уменьшении их время счета задачи резко увеличивается. Но несмотря на приближенность анализа, получено удовлетворительное согласование аналитических данных, с экспериментальными, полученными при резке труб. Сделан вывод о целесообразности использования упрощенной теории бруса при резке труб с отношением толщины стенки к среднему диаметру $T/D \leq 0,1$ и комбинированной теории сдвига и изгиба при резке труб с $T/D < 0,1$.

Автором работы [28] создана модель зарождения и распространения трещины в технологических процессах вырубки-пробивки, в основу которой положен вариант метода конечных элементов с использованием изопараметрического конечного элемента второго порядка. Создан оригинальный алгоритм разбиения конечных элементов для описания роста трещины внутри материала, локально перестраивающий сетку конечных элементов в области кончика трещины в отличие от существующих ранее моделей, которые предполагают перестроение сетки во всём объёме деформируемого материала.

Метод конечных элементов отличается большой точностью и даёт возможность проникновения в физику технологического процесса резания, что позволяет объяснить явления, происходящие вблизи кромки. Однако, этот метод отличается большой сложностью и решение какой-либо задачи с большей, чем при других методах, точностью является более трудоёмким технологическим процессом и не оправдывает себя, поскольку точность метода конечных элементов не всегда необходима для инженерных расчётов. Точность решения поставленных задач целиком зависит от правильности постановки граничных условий, которые обычно принимают с рядом допущений. Метод конечных элементов позволяет успешно решать задачи установившегося пластического течения. Задачи о нестационарных технологических процессах, связанные с постоянным изменением граничных условий, носящих подчас весьма сложный характер, решаются гораздо труднее.

В работе [8] с помощью метода линий скольжения разработаны математические модели образования заусенцев на выходе лезвия в направлении главного движения при свободном ортогональном резании и на выходе лезвия в направлении подачи при продольном точении, растачивании, строгании, торцовом фрезеровании, рассверливании, зенкеровании и развёртывании. Эти модели позволяют прогнозировать и размеры образующихся заусенцев и определять условия их предотвращения. В отличие от известных моделей образования заусенцев при свободном ортогональном резании в этих моделях учтено влияние износа лезвия и угла кромки заготовки, однако полученные результаты не могут быть основой для описания механизма образования заусенцев при вырубке.

В работе [79], используя метод линий скольжения, получили зависимость среднего числа изделий, штамповка (вырубка) которых возможна до образования заусенцев предельной высоты.

В основу модели разрушения положен адгезионный износ инструмента, который характерен для стабильного технологического процесса.

Недостатком этой модели является большое количество принятых при выводе допущений, что в свою очередь приводит к некоторым различиям результатов, полученных экспериментальным методом и с помощью формулы, выведенной автором.

Из зарубежных исследователей в этом направлении известны работы [62, 63]. В основном они отличаются способом описания разрушения материала. Проблема больших деформаций решается с помощью поэтапной перестройки сетки конечных элементов. Механизм распространения трещины реализуется с помощью дискретных приращений шага трещины, требующей последующей перестройки сетки конечных элементов, для описания новой геометрической области с учетом возникшей трещины. Указанный подход является более прогрессивным, в сравнении с работой [61], так как лучше описывает геометрию разделяемых поверхностей. Вместе с тем ему присущи некоторые недостатки, среди которых: сложный алгоритм разбиения элементов в области, прилегающей

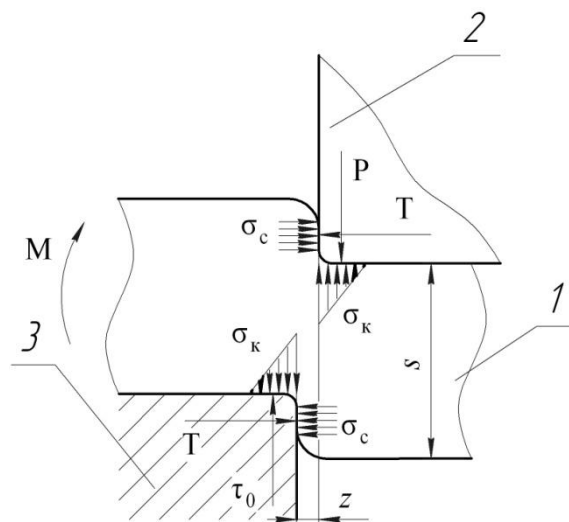
к кончику трещины и необходимость частой глобальной перестройки сетки конечных элементов.

В источнике [84] изложен способ воздействия на исходную структуру листового материала, который заключается в изменении упругопластических свойств материала путем предварительного растяжения. В работе сопоставлены растягивающие напряжения вдоль проката, поперек проката, и под углом 45° по отношению к направлению проката. Растягивающее напряжение под углом 45° по отношению к направлению проката позволяет ликвидировать анизотропию упругопластических свойств и осуществить равномерную последующую деформацию объемных деталей.

1.4 Теоретические основы влияния обратной деформации на характер распределения напряжений в зоне среза

На основании априорного анализа существующих моделей образования заусенцев, проведенного в первой главе, установлено, что метод конечных элементов [85,45] является наиболее оптимальным методом анализа технологического процесса вырубки, так как позволяет наиболее адекватно описать геометрию поверхности разделения и что для разработки адекватной математической модели образования заусенцев на листовом материале при холодной листовой вырубке целесообразно использовать адгезионный износ рабочих инструментов штампа, который чётко позволяет отследить технологический процесс образования заусенцев [86,87].

На рисунке 1.8 представлена принципиальная схема сил, действующих в зоне среза при вырубке.



1 - заготовка; 2 – режущая кромка пуансона; 3 – режущая кромка матрицы.

Рисунок 1.8 – Схема сил, действующих при разделении материала.

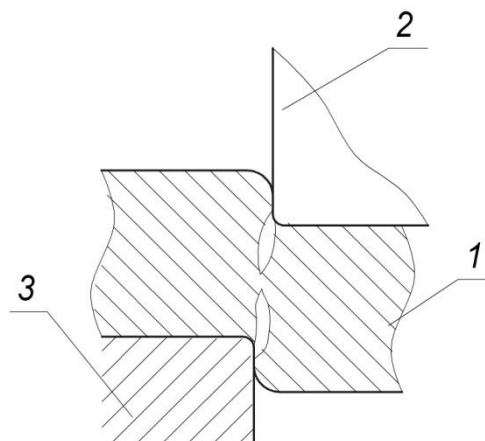
Благодаря наличию зазора z между режущими кромками пуансона и матрицы, сила P , приложенная к поверхности заготовки, и сопротивление срезу τ_0 в процессе деформации, образуют момент, стремящийся повернуть заготовку. Поворот заготовки приводит к тому, что контактные напряжения σ_k имеют максимальную величину у режущих кромок и резко уменьшаются до нуля на границе контактного участка [88-92,93].

На ранней стадии сдвига режущие кромки внедряются в заготовку и образуются участки контакта заготовки с боковыми поверхностями режущего инструмента. Упор заготовки в боковые поверхности инструмента приводит к тому, что возникают горизонтальные силы T , которые вызывают сжимающие контактные напряжения σ_c , сглаживающие поверхность при перемещении режущего инструмента относительно заготовки. Те же силы T стремятся увеличить зазор между режущими кромками [17,31,94].

Концентрация напряжений у режущих кромок приводит к тому, что очаг пластических деформаций соответственно возникает у режущих кромок пуансона и матрицы, кроме того размеры очага деформации увеличиваются по мере роста деформирующего усилия.

В определенный момент деформирования очаги деформации, распространяющиеся от режущих кромок, сливаются, образуя единый очаг пластических деформаций [95,96,97].

Расклинивающее действие сил P и T , особенно при наличии притупления режущих кромок, может приводить к тому, что зарождение трещин происходит несколько выше торца режущего инструмента как показано на рисунке 1.9 и на отдельных частях заготовки образуются острые заусенцы [98,99,97].



1 - заготовка; 2 – режущая кромка пуансона; 3 – режущая кромка матрицы.

Рисунок 1.9 – Зарождение трещин с образованием торцевого заусенца.

Дальнейшее сближение режущих кромок приводит к тому, что начинается смещение одной части заготовки относительно другой в направлении относительного движения режущих кромок. На стадии сдвига слои металла, параллельные плоскостям заготовки, изгибаются и удлиняются [100].

По мере сближения режущих кромок наступает момент, когда пластичность металла будет исчерпана и происходит нарушение сплошности материала, т.е. разрушение, приводящее к образованию трещины. Зарождение трещины начинается у режущих кромок. Благодаря концентрации напряжений в устье трещины, последняя, быстро развивается в толщину заготовки и при встрече трещин, идущих от режущих кромок навстречу друг другу, технологический процесс разделения заготовки заканчивается. Следовательно, разделение заготовки на части может завершаться при внедрении режущих кромок только на

определенную долю толщины заготовки. В этом случае поверхность среза будет иметь два существенно отличающихся по гладкости участка: блестящий пояс и шероховатый участок.

При рассмотрении схемы сил представленной на рисунке 1.8, используя метод линий скольжения, выведена зависимость среднего числа изделий, вырубка которых возможна до образования заусенцев предельной высоты. В основу модели разрушения автором положен адгезионный износ инструмента, механизм которого включает следующие этапы:

- образование адгезионных металлических связей на площадках физического контакта поверхности инструмента с обрабатываемым металлом;

- пластическая деформация образовавшихся связей и их разрушение;

- удаление продуктов разрушения.

Им установлено, что адгезионные металлические связи образуются на контактирующих поверхностях инструмента и обрабатываемого материала после разрыва химических связей между металлом и кислородом в окисных пленках, покрывающих поверхности контакта. Этот разрыв происходит в результате активации поверхностных участков в зоне контакта. Основным источником энергии активации является работа пластической деформации поверхностных микронеровностей, так как она макрогенерирует дефекты кристаллической решетки. Мерой работы пластической деформации является контактное давление в зоне возможных образований адгезионных связей.

Основными механизмами разрушения металлических адгезионных связей при холодной деформации являются перемещения и концентрации дислокаций. Разрушение адгезионных металлических связей после их пластической деформации происходит в пределах зоны резкой локализации дефектов кристаллической структуры, так как в этих зонах растягивающие напряжения близки к предельным теоретически возможным значениям. Поэтому в инструменте для холодного деформирования области разрушения и удаления продуктов разрушения локализованы пределами линий скольжения в полосах

скольжения. Среднее расстояние между линиями скольжения в полюсах скольжения для различных металлов приблизительно одинакова и равна в среднем $w = 5 \cdot 10^{-6}$ мм.

Рассмотренный механизм был положен Степанским Л.Г. [79] в основу создания модели разрушения, суть которой состоит в оценке величины износа контактной поверхности. При этом им были приняты следующие допущения:

1. Мерой активации поверхностных участков контакта инструмента с обрабатываемым металлом, достаточной для образования адгезионных металлических связей, является величина, оценивающая ту часть номинальной площадки контакта, в пределах которой энергия активации поверхностных участков достаточна для образования адгезионных связей j , равная отношению средних давлений на площадке контакта q к предельно допустимым контактными давлениям q_n , характеризующую несущую способность микронеровностей, которые приводят к полному пластическому смятию обрабатываемого материала:

$$j = \frac{q}{q_n}, \quad (1.2)$$

2. Площадь элементарной площадки скользящего контакта, на которой осуществляется физический контакт инструмента и обрабатываемого материала, определяется следующей зависимостью:

$$dF = j \cdot B \cdot v \cdot dt, \quad (1.3)$$

где B - ширина площадки скользящего контакта в направлении, перпендикулярном скорости v , мм;

v - скорость скольжения обрабатываемого материала по инструменту, $\frac{\text{мм}}{\text{с}}$;

dt - элементарный отрезок времени скольжения, с.

3. Создание адгезионных металлических связей проходит в условиях образования субмикротрещин, поэтому вероятность расположения места разрушения адгезионной связи в инструменте p определяется соотношением длин

критических трещин, инициирующих разрушение инструментального материала и обрабатываемого материала:

$$p = \frac{L_{T1}}{L_{T1} + L_{T2}}, \quad (1.4)$$

где L_{T1} - длина критической трещины в материале инструмента, мм;

L_{T2} - длина критической трещины в обрабатываемом материале, мм.

Тогда объем материала инструмента, удаляемый с элементарной площадки контакта после разрушения адгезионных связей за элементарный промежуток времени dt при вероятности p , составляет:

$$dV = p \cdot w \cdot dF = p \cdot w \cdot \frac{q}{q_n} \cdot B \cdot v \cdot dt, \quad (1.5)$$

где p - вероятность того, что место разрушения адгезионных связей находится в инструменте, а не в обрабатываемом материале;

w - среднее расстояние между линиями скольжения в плоскостях скольжения, мм.

Из условия устойчивости трещины автор работы [79] полагает, что при малом изменении диаметра D_K и длины трещины L_T не происходит изменения элементарной энергии тела \mathcal{E}_T , то есть выполняется условие:

$$\frac{\partial \mathcal{E}_T}{\partial L} = 0, \quad (1.6)$$

где $\partial \mathcal{E}_T$ - элементарная энергия тела, Дж;

dL - элементарная длина трещины, мм.

С учётом этого Степанским Л.Г. предложено выражение для оценки длины критической трещины L_T :

$$L_T = \frac{4 \cdot (A_{II} + A_D) \cdot E}{s_k^2}, \quad (1.7)$$

где A_{II} - удельная поверхностная энергия материала, $\frac{Дж}{мм^2}$;

A_D - удельная работа пластической деформации материала вблизи вершины

трещины, $\frac{Дж}{мм^2}$;

E - модуль упругости материала, МПа;

s_k - истинная прочность материала при растяжении, МПа.

Приняв допущение, что в первом приближении равенство произведений элементарной работы инструмента и обрабатываемого материала на модуль их упругости, одинаковы, получим:

$$[A_{П1} + A_{Д1}] \cdot E_1 = [A_{П2} + A_{Д1}] \cdot E_2, \quad (1.8)$$

Отсюда Степанским Л.Г. получено соотношение:

$$\frac{s_{к1}}{s_{к2}} = \frac{\sigma_u}{\sigma_p}, \quad (1.9)$$

где $A_{П1}$ и $A_{П2}$ - удельная поверхностная энергия материала инструмента и обрабатываемого материала соответственно, $\frac{Дж}{мм^2}$;

$A_{Д1}$ и $A_{Д2}$ работа пластической деформации в вершине трещины при ее расширении в материале инструмента и в обрабатываемом материале, отнесенная к единице поверхности трещины, $\frac{Дж}{мм^2}$;

E_1 и E_2 - модули упругости материала инструмента и обрабатываемого материала, МПа;

$s_{к1}$ и $s_{к2}$ - истинная прочность при разрушении растяжением материала инструмента и обрабатываемого материала, МПа;

σ_u - предел прочности на изгиб инструментального материала, МПа;

σ_p - максимальное разрушающее растягивающее напряжение обрабатываемого материала в испытаниях на растяжение, МПа.

Тогда вероятность разрушения адгезионных связей в инструменте p в соответствии с выражением (1.7) будет определяться:

$$p = \frac{\sigma_p^2}{\sigma_p^2 + \sigma_u^2}, \quad (1.10)$$

Согласно гипотезе Степанского Л.Г. пластическая деформация и разрушение адгезионных связей происходит в адиабатических условиях и, приняв допущения, что контактная поверхность инструмента не имеет микронеровностей и не деформируется, а пластическая деформация микронеровностей обрабатываемого материала в условиях скользящего контакта является плоской, им было показано, что напряжения контактного трения на площадках скользящего контакта, согласно рисунка 1.8, определяются следующей зависимостью:

$$\tau_k = \frac{2 \cdot f \cdot \sigma_s}{\sqrt{3}}, \quad (1.11)$$

где f - коэффициент трения: $0 < f < 0,5$;

σ_s - напряжение текучести обрабатываемого материала в зоне среза, МПа.

Принимая допущение, что происходит полное пластическое смятие микронеровности и контур свободной поверхности прямолинейный, как схематично показано на рисунке 1.10, был проведён анализ состояния зоны пластического смятия микронеровностей, используя метод линий скольжения. Различие условий нагружения задавались изменением направления сил трения и соответственно знака касательных напряжений τ_{xy} в области треугольника ΔAOB , где они положительны. Тогда в произвольной точке отрезка AO , например, в точке A угол между a -линией скольжения и осью x равен:

$$\phi_a = -0,5 \cdot \arccos \left(\frac{\tau_k \cdot \sqrt{3}}{\sigma_s} \right), \quad (1.12)$$

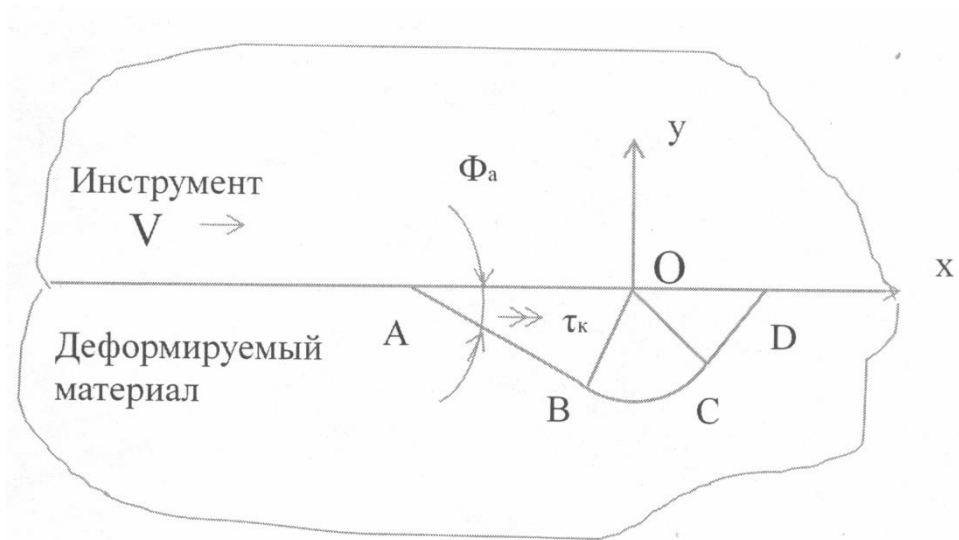


Рисунок 1.10 - Схема пластического смятия микронеровности.

Полагая, что напряжения σ_y на площадке скользящего контакта с микронеровностью, приводящие к ее пластическому смятию, однородны вдоль всей площадки, они определяются зависимостью:

$$\sigma_y = \sigma_a + \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot \sin 2\phi_a, \quad (1.13)$$

где σ_a - среднее нормальное напряжение в точке А площадки контакта, МПа.

Величина σ_a определяется интегралом пластичности для a - линии скольжения ABCD в соответствии с зависимостью:

$$\sigma_a - \sigma_d = \frac{2 \cdot \sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot (\phi_a - \phi_d), \quad (1.14)$$

Приняв:

$$\phi_d = \frac{\pi}{4}, \quad (1.15)$$

$$\sigma_d = -\frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}, \quad (1.16)$$

где ϕ_d - угол наклона a -линии скольжения к оси x в точке D;

σ_d - среднее нормальное напряжение в точке D;

и подставив все величины из зависимостей (1.11 - 1.15) в зависимость (1.16), после некоторых преобразований получим контактное давление, определяющее несущую способность микронеровности:

$$q_n = \frac{2 \cdot \sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot \left(0,5 + \frac{\pi}{4} + \sqrt{0,25 - f^2} + \arcsin \sqrt{0,5 - f} \right), \quad (1.17)$$

Для упрощения выражения (1.17) воспользуемся эмпирической зависимостью, предложенной в работе [79]:

$$q_n = 2,5 \cdot (1 - f) \cdot \sigma_s, \quad (1.18)$$

Тогда в соответствии с зависимостями (1.5) и (1.11) объем металла, удаляемый с поверхности инструмента в ходе скользящего контакта за время t , определяется интегралом:

$$V = \int_0^1 \frac{\sigma_p^2}{\sigma_u^2 + \sigma_p^2} \cdot \omega \cdot \frac{q}{q_n} \cdot B \cdot v \cdot dt, \quad (1.19)$$

Используя теорему о среднем значении интеграла и с учётом выражения (1.18) получим окончательно:

$$V = 0,4 \cdot w \cdot \left\{ \sum_{i=1}^m F_i \cdot q_i \right\} \cdot \frac{\sigma_p^{cp2}}{(\sigma_u^{cp2} + \sigma_p^{cp2}) \cdot (1 - f) \cdot \sigma_s}, \quad (1.20)$$

где w - среднее расстояние между линиями скольжения в полюсах скольжения, мм;

F_i - i -ая площадка скользящего контакта инструмента за время t , мм²

q_i - среднее давление на i -ой площадке контакта, МПа;

m - число площадок контакта;

σ_u^{cp} и σ_p^{cp} - средние значения предела прочности на изгиб материала инструмента и разрушающего растягивающего напряжения в обрабатываемом материале соответственно, МПа;

f - средняя величина коэффициента трения;

σ_s - напряжение текучести обрабатываемого материала в зоне среза, МПа.

Из рассмотрения полученной зависимости (1.20) видно, что величина адгезионного износа пуансона и матрицы при листовой вырубке, то есть объем металла, удаляемый с поверхности инструмента в ходе скользящего контакта, за время t возрастает с увеличением площадки скользящего контакта инструмента F_i , среднего давления q_i , средней величины коэффициента трения f и числа площадок контакта m , а также при уменьшении среднего значения предела прочности на изгиб обрабатываемого материала σ_u^{cp} и напряжения текучести обрабатываемого материала в зоне среза σ_s . Изменение среднего значения разрушающего растягивающего напряжения в обрабатываемом материале σ_p^{cp} , входящего в числитель и знаменатель формулы, не оказывает существенного влияния на объем металла, удаляемый с поверхности инструмента в ходе скользящего контакта за время t .

В разделительных операциях листовой штамповки основным видом отказа, вызванным износом режущих кромок инструмента, являются образующиеся на изделиях заусенцы.

Критерием предельного износа режущих кромок пуансонов и матриц разделительных штампов является образование по контуру реза в изделиях предельных по высоте заусенцев. К ним приводит износ боковых поверхностей режущих кромок инструмента. Величина предельных значений высоты заусенцев согласно существующих стандартов определяется из таблицы 2 в зависимости от толщины и прочности вырубляемого материала на растяжение, а также заданной точности исполнения вырубляемой детали.

Нами было сделано допущение, что заусенцы в поперечном сечении имеют форму прямоугольного треугольника, высота которого равна h , а основание равно зазору z Рисунок 1.11.

Тогда суммарный по контуру среза средний объем заусенцев равен:

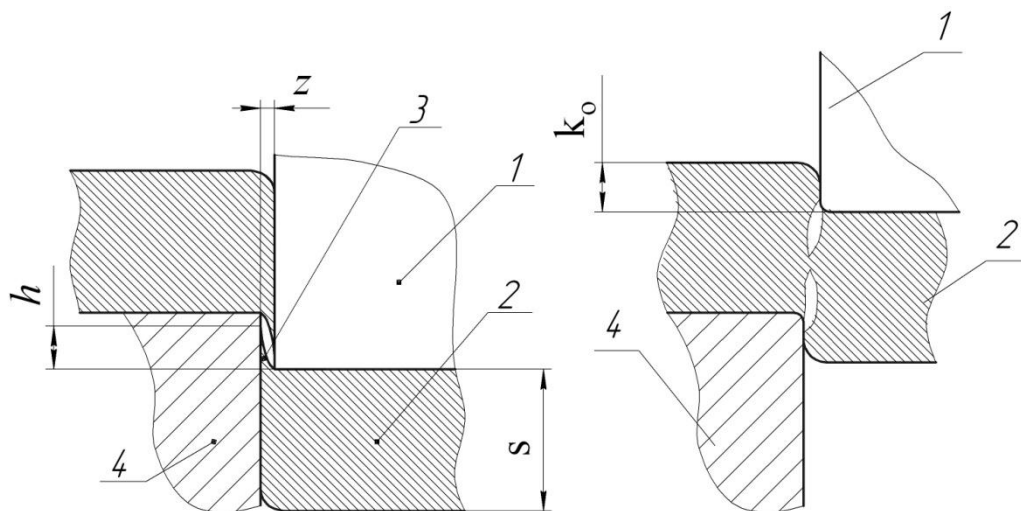
$$V_3 = F_3 \cdot B = 0.5 \cdot h \cdot z \cdot B, \quad (1.21)$$

где F_3 - средняя площадь заусенцев по контуру, мм^2 ;

B - периметр контура среза, мм ;

h - средняя высота заусенцев, мм ;

z - зазор между пуансоном и матрицей, мм .



1 - пуансон, 2 - вырубленное изделие, 3 - заусенец, 4 - матрица.

Рисунок 1.11 - Поперечное сечение заусенца.

Суммарная площадь скользящего контакта с обрабатываемым металлом в зоне реза по периметру среза при штамповке изделий равна:

$$F = k_0 \cdot s \cdot B, \quad (1.23)$$

где k_0 - относительная глубина пластического внедрения режущей кромки инструмента до начала развития скалывающих трещин в разделяемом материале;

s - толщина разделяемого материала, мм.

Средние контактные давления на площадках скользящего контакта инструмента равны:

- а) для пробивных матриц и пуансонов во время разделения $q = s$;
- б) для вырубных пуансонов и матриц во время разделения $q = 0,85 \cdot s$;
- в) для вырубных пуансонов во время выведения пуансона из зоны реза при обратном ходе $q = 0,2 \cdot s$;
- г) для пробивных пуансонов во время выведения пуансона из зоны реза при обратном ходе $q = 0,25 \cdot s$.

В матрицах в ходе штамповки возникает одна площадка скользящего контакта F , определяемой зависимостью (1.23); в пуансонах в ходе штамповке возникают две площадки контакта протяженностью F : в технологическом процессе среза и при обратном ходе.

Считая, что при штамповке изделий средние контактные давления на площадках скользящего контакта остаются постоянными, из равенства объемов V по зависимостям (1.20) и (1.22) при числе площадок контакта $m = 1$ для матриц и при $m = 2$ для пуансонов следует зависимость, полученная при использовании методики адгезионного износа, предложенной Степанским Л.Г. [79], для определения числа изделий, штамповка которых возможна до образования заусенцев предельной высоты h_{\max} , с внесением изменений о том, что заусенцы в поперечном сечении имеют форму прямоугольного треугольника, высота которого равна h , а основание равно зазору между пуансоном и матрицей z :

$$N_{\max} = \frac{A \cdot (1 - f) \cdot h_{\max} \cdot z_{\max} \cdot \left[1 + \frac{\sigma_u^2}{\sigma_p^2} \right]}{k_0 \cdot s \cdot w}, \quad (1.24)$$

где A - коэффициент, который принимается в зависимости от инструмента из таблицы 3 [49];

h_{\max} - предельная высота заусенцев, мм;

z_{\max} - ширина корня заусенцев, мм;

k_0 - относительная глубина пластического внедрения режущей кромки до начала образования скалывающих трещин.

Таблица 1.2 – Значения коэффициента A .

Инструмент	Значения коэффициента A при вырубке
пуансон	2,4
матрица	2,9

Величина k_0 зависит от механических свойств разделяемого материала, скорости деформирования, радиуса кривизны контура реза и от усилия прижима разделяемого материала. Значения k_0 представлены в таблице 4, которые приняты из источника [101].

Таблица 1.3 – Значения относительной глубины пластического внедрения режущей кромки до начала образования скалывающих трещин k_0 .

Материал		k_0
Медь, латунь, цинк, алюминий	отожжённые	0,5
	наклёпанные	0,35
Сталь мягкая $C = (0,1-0,2)\%$	отожжённые	0,45
	наклёпанные	0,35
Сталь средней твёрдости $C = (0,2 - 0,4) \%$	отожжённые	0,3
	наклёпанные	0,2
Сталь твёрдая $C = (0,5 - 0,8) \%$	отожжённые	0,2
	наклёпанные	0,1

Как видно из формулы (1.24) число изделий, штамповка которых возможна до образования заусенцев предельной высотой N_{\max} увеличивается с ростом значений коэффициента A , ростом предельной высоты заусенцев h_{\max} , увеличением ширины корня заусенцев z_{\max} и ростом предела прочности на изгиб

инструментального материала $\sigma_{и}$, а также уменьшением относительной глубины пластического внедрения режущей кромки до начала образования скалывающих трещин k_0 , толщины заготовки s , максимального разрушающего растягивающего напряжения обрабатываемого материала σ_p , средней величины коэффициента трения f и средней толщины слоя, в пределах которого происходит разрушение адгезионных связей и вынос продуктов разрушения w .

Для увеличения числа изделий N_{max} , штамповка которых возможна до образования заусенцев предельной высотой h_{max} , необходимо стремиться к увеличению A , z_{max} и $\sigma_{и}$, а также к уменьшению k_0 , s , f и σ_p . Значения параметров k_0 и $\sigma_{и}$ функционально связаны с величиной зазора z и изменяются по мере износа пуансона и матрицы, то есть с увеличением зазора z . Поэтому в реальных условиях регулировать значения k_0 и $\sigma_{и}$ с целью увеличения числа изделий N_{max} представляется возможным. Регулирование N_{max} путём изменения средней величины коэффициента трения f можно осуществить путём применения смазки. Однако в большинстве случаев требуется последующее удаление смазки с деталей, что значительно увеличивает трудоёмкость изготовления изделий. Таким образом, остаётся только возможность увеличения числа изделий N_{max} снижением максимального разрушающего растягивающего напряжения обрабатываемого материала σ_p , что позволяет реализовать применение знакопеременного нагружения, то есть за счёт проявления эффекта Баушингера.

В общем случае, для текущего времени эксплуатации штампа, при допущении, что максимальное разрушающее растягивающее напряжение обрабатываемого материала σ_p равно максимальному напряжению среза обрабатываемого материала $\tau_{ср}$, из формул (1.22) и (1.24) для определения суммарной по контуру среза средней площади заусенцев в интервале значений средней высоты заусенцев находятся в интервале $0 \leq h \leq h_{max}$. Не нарушая общности рассуждений, введем допущение о возможности применения формулы (1.24) при анализе единичного акта вырубki, т.е. примем $N=1$. Тогда площадь скользящего контакта составит:

$$F_3 = \frac{V_3}{B} = \frac{1}{2} \cdot h \cdot z = \frac{k_0 \cdot s \cdot w}{2 \cdot A \cdot (1-f) \cdot \left(1 + \frac{\sigma_u^2}{\tau_{cp}^2}\right)}, \quad (1.25)$$

Из выражения (1.25) произведение средней высоты заусенцев h на величину зазора z составит:

$$h \cdot z = \frac{k_0 \cdot s \cdot w}{A \cdot (1-f) \cdot \left(1 + \frac{\sigma_u^2}{\tau_{cp}^2}\right)}, \quad (1.26)$$

В формуле (1.26) средняя высота заусенцев h определяется из условия оптимального (расчётного) значения зазора между режущими кромками пуансона и матрицы, т.е. $z=z_H$, который рассчитывается по следующей формуле [24]:

$$z_H = (s - b) \operatorname{tg} \beta, \quad (1.27)$$

где z_H - оптимальный зазор между режущими кромками, мм;

s - толщина заготовки, мм;

b - высота блестящего пояса, мм;

β - угол между образующимися от режущих кромок трещин и вертикалью, $\beta=4 \div 6^\circ$.

При этом высота блестящего пояса составляет:

$$b = k_0 \cdot s, \quad (1.28)$$

где k_0 - относительная глубина пластического внедрения режущей кромки до начала образования скалывающихся трещин.

$$z_H = (1 - k_0) \cdot s \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (1.29)$$

Эмпирическая зависимость средней высоты заусенцев, образующихся за один удар штампа, с учётом действительных параметров технологического процесса при проведении экспериментальных исследований составляет:

$$h = \frac{k_0 \cdot s \cdot w}{z_n \cdot A \cdot (1 - f) \cdot \left(1 + \frac{\sigma_u^2}{\tau_{cp}^2}\right)}, \quad (1.34)$$

В соответствии с полученной математической моделью (1.34) среднее значение высоты заусенцев при постоянном значении z_n увеличивается с ростом толщины заготовки s , относительной глубины пластического внедрения режущей кромки до начала образования скальвающих трещин k_0 , максимального напряжения среза τ_{cp} и средней величины коэффициента трения f , а также снижением предела прочности на изгиб инструментального материала σ_u . То есть для уменьшения расчётной средней высоты заусенцев при постоянном зазоре z необходимо стремиться к уменьшению k_0 , f и τ_{cp} , а также увеличению σ_u . Значения параметров k_0 и σ_u функционально связаны с величиной зазора z и изменяются по мере износа пуансона и матрицы, то есть с увеличением зазора z . Поэтому в реальных условиях регулировать значения k_0 и σ_u с целью уменьшения расчётной средней высоты заусенцев не представляется возможным, но было целесообразно введение поправочного коэффициента K_z , учитывающего отношение реального зазора z_p к расчётному оптимальному зазору z_n . Таким образом, единственным целесообразным фактором уменьшения средней высоты заусенцев остаётся снижение максимального напряжения среза τ_{cp} , что может быть реализовано за счет применения знакопеременного нагружения.

На основании изученной информации выявлены наиболее существенные конструктивно-технологические параметры, влияющие на интенсивность образования заусенцев и величины блестящего пояска при вырубке с использованием знакопеременного нагружения. А также разработана адекватная

математическая модель образования заусенцев на листовом материале при вырубке, которая позволяет прогнозировать высоту образующихся заусенцев от максимального напряжения среза σ_u . Установлено, что уменьшение значения средней высоты заусенцев h можно достигнуть за счет использования обратного нагружения.

1.5 Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются детали из тонколистового проката толщиной от 1,5 до 4 мм, с размерами от 5 до 32 мм, изготавливаемые из стали и сплавов цветных металлов.

Предметом исследования является процесс изготовления деталей из тонколистового проката реверсивной вырубкой без заусенцев.

1.6 Цель и задачи исследования

Цель диссертационной работы - исследование режимов реверсивной вырубки и разработка устройства для изготовления деталей из тонколистового проката без заусенцев.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи исследования:

- определить диапазон изменения режимов реверсивной вырубки, влияющих на величину заусенцев, образующихся на кромках деталей;
- разработать испытательный стенд с управляемой величиной режимов реверсивной вырубки;
- разработать математическую модель процесса реверсивной вырубки в виде уравнения регрессии с экспериментальным подтверждением экстремальных значений целевой функции;
- разработать практические рекомендации применения режимов реверсивной вырубки в зависимости от механических свойств материала заготовки;

- разработать устройство для изготовления деталей из тонколистового проката без заусенцев, реализующее процесс реверсивной вырубки с заданными режимами в условиях серийного производства;
- испытать разработанное устройство с заданными режимами в условиях производства.

1.7 Основные положения, выносимые на защиту

По результатам проведенных исследований, на защиту выносятся следующие положения:

1. Результаты экспериментальных исследований влияния режимов реверсивной вырубки на образование заусенцев по контуру детали: а) влияние числа прямого и обратного деформирования на повышение прочности материала заготовки; б) влияние соотношения прямого и обратного деформирования;
2. Математическая модель, описываемая уравнением регрессии в виде полинома первой степени для различных материалов, адекватно описывающая влияние параметров формоизменения при реверсивной вырубки на высоту заусенцев и позволяющая устанавливать параметры, исключающие образование заусенцев.
3. Конструкция инструментальной оснастки (Патент на полезную модель №126270) к прессу МАГ 05 для реализации процесса реверсивной вырубки деталей из тонколистового проката без образования заусенцев.
4. Практические рекомендации по применению режимов реверсивной вырубки в зависимости от механических свойств материала заготовки.

2 Экспериментальное исследование процесса образования заусенцев в условиях применения реверсивной вырубки

2.1 Общая методика проведения экспериментальных исследований

В первой главе рассмотрено множество факторов влияющих на образование заусенцев во время холодной листовой штамповки. Для того чтобы оценить какие из этих факторов оказывают наибольшее влияние на величину заусенцев принимаем в качестве функции отклика Y . Для ее определения в качестве независимых факторов выбираем параметры обратной вырубки, которые, исходя из предварительного анализа априорной информации, оказывают наибольшее влияние на функцию отклика. Наибольшее влияние на величину заусенцев следует ожидать от следующих параметров процесса: скорости деформирования, соотношения прямого и обратного деформирования, которые и планируются как независимые факторы.

В экспериментах использовались образцы в виде ленты шириной 18 мм, длиной 400 мм, и толщиной 1.5 мм.

Результаты предварительных экспериментов, контролировались при помощи микроскопа модели УШМ – 1 и окулярного винтового микрометра модели МОВ – 1 – 15, а результаты основных экспериментов, оценивались описанной в пункте 2.4 измерительной аппаратурой. Экспериментальный образец, который представлен в виде шайбы, был разрезан посредством электро-эрозионной обработки. Измерение высоты заусенцев проводилось в сечении образца от плоскости шайбы до кромки образовавшегося заусенца и характеризовалось величиной пикселей. После чего полученное значение переводилось в микрометры: 1 мкм = 1.5 пикселя.

Оценка результатов экспериментов производилась по среднему значению из 5 образцов для каждого варианта нагружения.

Средняя высота заусенцев для каждого образца h_{cp} , вычислялась по 10 точкам, замеряя по 5 минимальных и максимальных значений высоты заусенцев, по следующей формуле:

$$h^{cp} = \frac{\sum_{j=1}^5 h_j^{\min} + \sum_{j=1}^5 h_j^{\max}}{10}, \quad (2.1)$$

где $\sum_{j=1}^5 h_j^{\min}$ - сумма значений высот заусенцев по 5 точкам с минимальными значениями, мм;

$\sum_{j=1}^5 h_j^{\max}$ - сумма значений высот заусенцев по 5 точкам с максимальными значениями, мм;

Затем определялось среднее значение высоты заусенцев h для 5 образцов каждого варианта нагружения по формуле:

$$h = \frac{\sum_{i=1}^5 h_i^{cp}}{5}, \quad (2.2)$$

где i – номер образца.

В экспериментах величины всех предварительных нагрузок Δ определяются с помощью зависимости:

$$\Delta = \frac{\Delta s}{s}, \quad (2.3)$$

где Δs – глубина внедрения режущей кромки в заготовку, мм;

s – толщина заготовки, мм;

Оценка средней высоты заусенцев позволяет оценить влияние исследуемых факторов и определить границы факторного пространства и интервалы их варьирования, для последующего проведения полного факторного эксперимента (ПФЭ) и разработки математической модели.

В результате проведения экспериментов планировалось:

- выделить основные факторы, влияющие на процесс образования заусенцев, установить границы факторного пространства и интервал их изменения;
- разработать адекватную математическую модель образования заусенцев на листовом материале при холодной вырубке листового металла с использованием знакопеременного нагружения, с оценкой воспроизводимости опытов по критерию Кохрана, значимости коэффициентов по критерию Стьюдента, адекватности модели по критерию Фишера, произвести оптимизацию целевой функции путем пошагового движения по градиенту.

2.2 Описание экспериментального оборудования

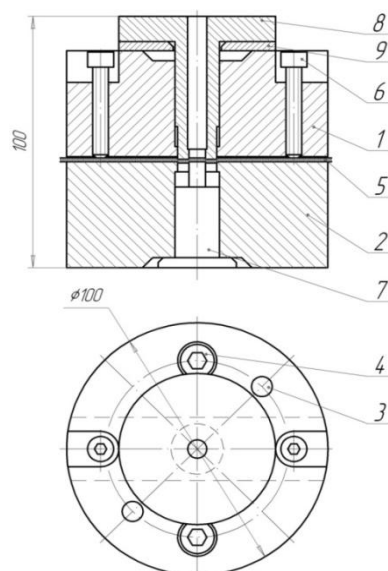
С целью экспериментального определения величин скорости вырубки, прямого и обратного деформирования, необходимых для минимизации заусенцев и отработки технологического процесса обратной вырубки было разработано и изготовлено экспериментальное оборудование.

При разработке и проектировании принципиальной и конструкционной схем учитывалось, что экспериментальное оборудование должно отвечать следующим требованиям:

1. Обеспечивать осуществление вырубки за необходимое количество нагружений (прямое деформирование, обратное деформирование, окончательная вырубка);
2. Обеспечивать регулирование величины прямого деформирования в диапазоне от 5 до 50% от толщины обрабатываемого материала;
3. Обеспечивать регулирование величины обратного деформирования в диапазоне от 5 до 50% от толщины материала;
4. Обеспечивать регулирование скорости вырубки.

Для удовлетворения требований пункта 1 была спроектирована и изготовлена экспериментальная установка, представленная на рисунках 2.1 и 2.2. Её конструкторская документация представлена в приложении 2.

Экспериментальная установка представляет собой штамп для вырубki шайб с внешним диаметром 16 мм и внутренним диаметром 8 мм. Экспериментальная установка работает следующим образом: матрица 1 ориентирована относительно матрицы 2 при помощи двух штифтов 3 и прикреплена к ней двумя винтами 4. В паз



1-матрица; 2-матрица; 3-штифт; 4-винт; 5-заготовка; 6-винт;
7-пуансон; 8-пуансон-матрица; 9-ограничительная шайба
Рисунок 2.1 – Экспериментальная установка (схема)



Рисунок 2.2 – Экспериментальная установка (фотография)

между матрицами 1 и 2 вручную подается заготовка 5, которая закрепляется винтами 6. На первом шаге проведения эксперимента пуансон 7 вставляется в матрицу 2, а пуансон-матрица 8 с тарированной шайбой 9 изображенной на

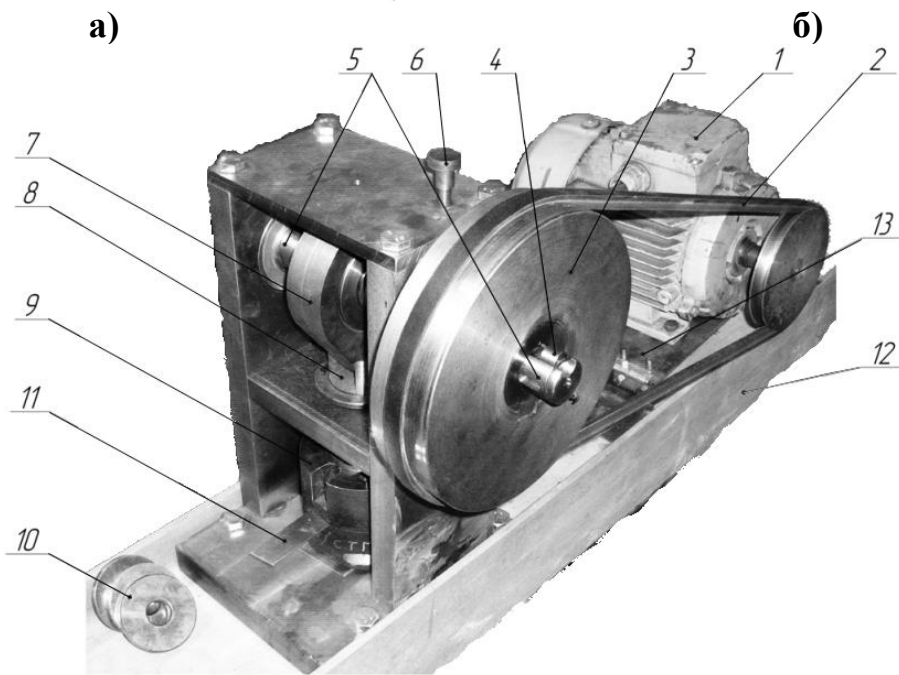
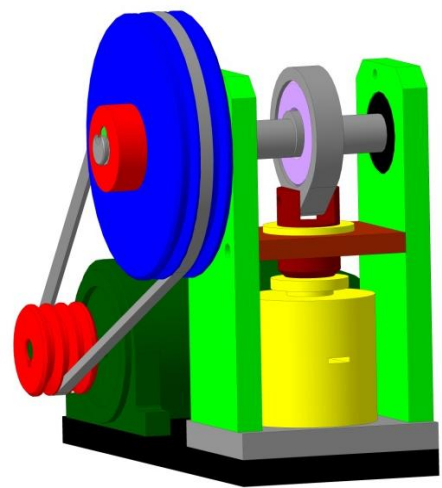
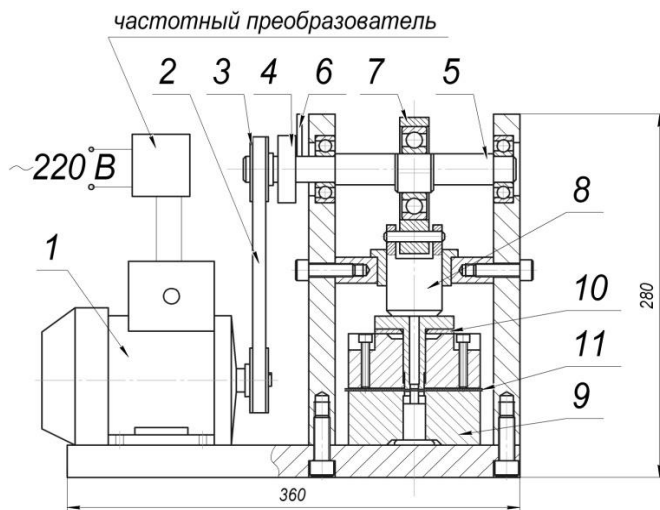
рисунке 2.3, которая обеспечивает необходимую величину прямой деформации, вставляется в матрицу 1.



Рисунок 2.3 – Ограничительные шайбы (позиция 9 на схеме)

Затем экспериментальная установка устанавливается на испытательный стенд (рисунок 2.4) и осуществляется прямое деформирование. На втором шаге проведения эксперимента меняется местами пуансон и пуансон-матрица, то есть пуансон 7 вставляется в матрицу 1, а пуансон-матрица 8 с регулировочной плиткой 9, которая обеспечивает необходимую величину обратной деформации, вставляется в матрицу 2. После чего установка переворачивается на 180 градусов, и устанавливается на испытательный стенд так, чтобы матрица 1 была снизу и осуществляется обратное деформирование. На третьем шаге проведения эксперимента снова меняется местами пуансон и пуансон-матрица, то есть пуансон 7 вставляется в матрицу 2, а пуансон-матрица 8, вставляется в матрицу 1. И снова установка переворачивается на 180 градусов и устанавливается на испытательный стенд так, чтобы матрица 2 была снизу и осуществляется окончательная вырубка.

Для обеспечения пунктов 2 и 3 требований ограничительная шайба 9 выполняется различной толщиной, обеспечивающей соотношение прямого и обратного деформирования, согласно заданному интервалу варьирования.



в)

1- электродвигатель, 2 - клинременная передача, 3 – маховик, 4- шпоночная муфта, 5 – вал с эксцентриситетом, 6- рычаг, 7 – шатун, 8- ползун, 9 - экспериментальная установка для обратной вырубке, 10 - ограничительные шайбы, 11 – заготовка лента Сталь 3, 12 – станина испытательного стенда, 13 – механизм натяжения ремня.

Рисунок 2.4 - Испытательный стенд – а) схема, б) пространственная модель,

в) фотография

Для обеспечения пункта 4 требований был разработан, смоделирован и изготовлен испытательный стенд (рисунок 2.4), и испытательный стенд на базе эксцентрикового прессы. Его конструкторская документация представлена в приложении 3.

Испытательный стенд работает следующим образом: двигатель 1 подключен к сети через частотный преобразователь, предназначенный для изменения частоты вращения двигателя, в результате чего будет варьироваться скорость вырубki, вал двигателя 1 через клиноременную передачу 2 связан с маховиком 3, который посредством шпоночной муфты 4 передает вращение на вал 5 при включенном рычаге 6. Рычаг 6 жестко закреплен на срезанной шпонке. Вал 5 имеет эксцентриситет и посредством шатуна 7 преобразует вращательное движение в возвратно-поступательное, тем самым осуществляет перемещение ползуна 8 с заданной скоростью. Ползун 8 давит на экспериментальную установку 9, осуществляя тем самым вырубку.

Усилие вырубki рассчитывалось по формуле [24]:

$$P = \frac{\sigma_{\epsilon}}{2 \cdot (1 - \psi_{ш})} \cdot \left(\frac{x}{s \cdot \psi_{ш}} \right)^{\frac{\psi_{ш}}{1 - \psi_{ш}}} \cdot (s - x) \cdot L, \quad (2.4)$$

где σ_{ϵ} - временное сопротивление, МПа;

$\psi_{ш}$ - относительное уменьшение площади поперечного сечения образца до начала образования шейки при испытании на растяжение;

x - глубина внедрения режущей кромки в заготовку толщиной s , мм;

L - длина линии реза, мм;

$$L = 2 \cdot \pi \cdot r, \quad (2.5)$$

где r - больший радиус вырубаемого готового изделия, мм.

2.3 Описание комплекса измерительной аппаратуры

Для измерения и контроля величины заусенцев, образующихся при обратной вырубке, использовался комплекс оптических и электронных приборов, показанных на рисунке 2.5, состоящий из персонального компьютера модели *emachines eM350* (далее ПК) с программным обеспечением *Scope Photo*, цифровая камера-окуляр модели *DCM510*, универсальный микроскоп МБС – 10 (оптический бинокулярный микроскоп).



а)



б)



в)

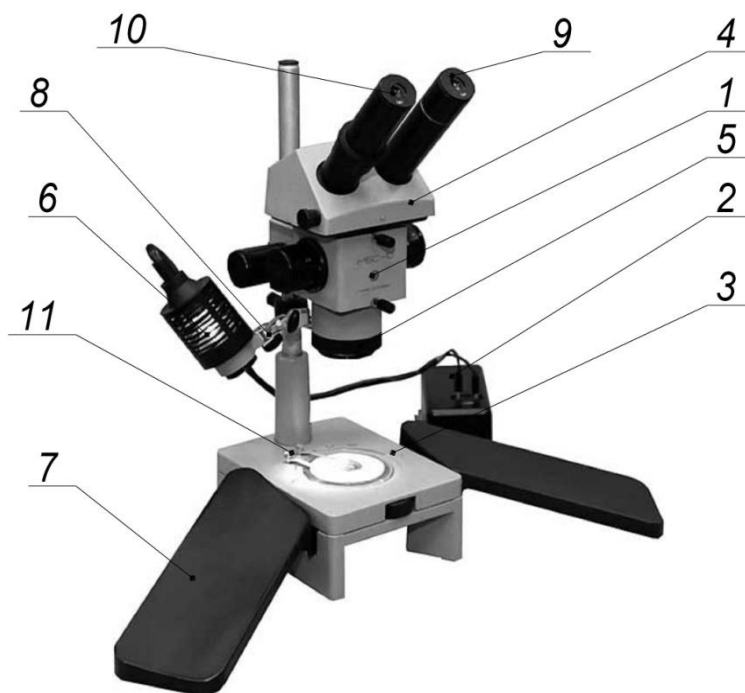


г)

а) персональный компьютер модели emachines eM350, б) цифровая камера-окуляр модели DCM510, в) универсальный микроскоп МБС – 10, г) программное обеспечение Scope Photo.

Рисунок 2.5 - Комплекс оптических и электронных приборов

Для фиксации результатов экспериментов использовалась цифровая камера-окуляр модели DCM510, которая была смонтирована в универсальный микроскоп МБС – 10, комплектация которого представлена на рисунке 2.6. Цифровая камера-окуляр передавала сигнал на ПК, на котором посредством специализированного программного обеспечения Scope Photo, проводилось измерение высоты заусенца, образовавшегося на кромках образцов.



1 - Корпус с барабаном, 2 - Блок питания, 3 - Столик для работы в отраженном свете, 4 - Биноккулярная насадка, 5 – Объектив Ø90мм, 6 - Осветитель, 7 – Подлокотник, 8 - Кронштейн для крепления осветителя, 9 - Окуляр 8-х, 10 - Окуляр 8-х со шкалой, 11 - Прижим.

Рисунок 2.6 - универсальный микроскоп МБС – 10

Таблица 2.1 – Технические характеристики универсального микроскопа МБС – 10

№п/п	Наименование	Размерность	Значение
1	Диапазон увеличения	-	4 ^x - 100 ^x
2	Линейное поле зрения, в пределах	мм	39 - 2,4
3	Рабочее расстояние, не менее	мм	95
4	Источник света	-	галогенная лампа 8В/20Вт
5	Общие габаритные размеры прибора	мм	265x160x475
6	Масса, не более	кг	8
7	Масса с упаковкой, не более	кг	11

Представленная измерительная аппаратура позволила фиксировать результаты экспериментов с точностью измерения высоты заусенцев до 0,001 мм.

Выводы по главе

1. По установленным критериям оценки процесса образования заусенцев в условиях реверсивной вырубki, разработана общая методика проведения эксперимента.

2. Разработаны и изготовлены экспериментальная установка с регулируемой величиной прямого и обратного деформирования и испытательный стенд, способный обеспечивать регулирование скорости вырубki.

3. Изготовленная установка была оснащена необходимыми измерительными приборами, обеспечивающими требуемую точность измерений.

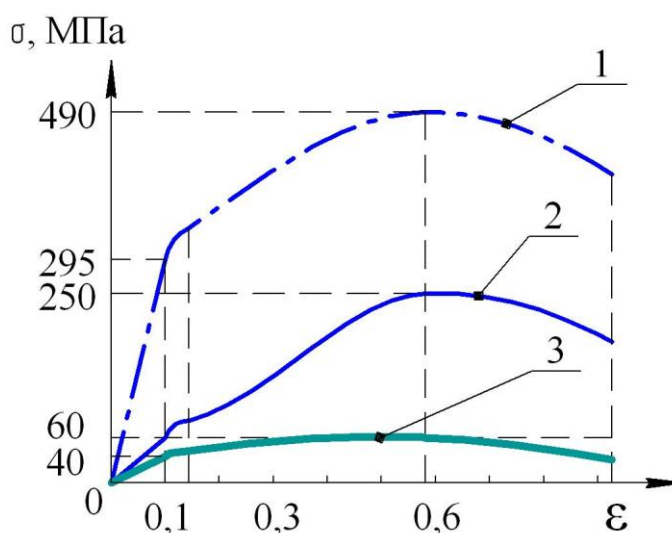
3 Исследование влияния знакопеременного деформирования на высоту заусенцев при реверсивной вырубке

3.1 Оценка параметров заусенцев и воспроизводимости опытов

Все эксперименты проводились на детали Шайба, толщиной 1,5 мм, получаемой из Стали 30, М1 и АД1, при зазоре между пунсоном и матрицей выбранном по справочнику (5% от толщины заготовки - 0,075 мм на сторону) и при комнатной температуре. Механические свойства материалов образцов представлены на Рисунке 3.1 и в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Механические свойства материалов образцов для проведения экспериментов

Механические характеристики	Материал заготовки		
	АД1	М1	Сталь 30
Временное сопротивление σ_b , МПа	60	220...250	490
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	40	60-75	295
Относительное удлинение δ , %	30	40...50	21



1- Сталь 30, 2 – медный сплав М1, 3 – алюминиевый сплав АД1

Рисунок 3.1 – диаграмма растяжения для материалов образцов

В первой серии предварительных экспериментов проводилось определение значений средней высоты заусенцев их структуры, формы и характера

распределения заусенцев по периметру контура шайбы при числе реверсов $n=0$, образующихся при холодной листовой вырубке, и оценка воспроизводимости.

Эксперименты проводились на испытательном стенде с экспериментальной установкой для вырубки шайб с внешним диаметром 16 мм и внутренним диаметром 8 мм. Порядок проведения экспериментов состоял в следующем:

- заготовка – лента из алюминиевого сплава АД1 шириной 20 мм, длиной 400 мм, толщиной 1.5 мм, закреплялась в пазу между двумя матрицами при помощи винтов экспериментальной установки;

- пуансон-матрица вставлялась в экспериментальную установку без ограничительных шайб, с целью осуществления вырубки шайбы за один удар испытательного стенда;

- экспериментальная установка помещалась в испытательный стенд, в котором посредством электродвигателя, частотного преобразователя и кривошипно-шатунного механизма вращательное движение преобразовывалось в возвратно-поступательное, и осуществлялась вырубка за один удар испытательного стенда, т.е. при числе реверсов $n=0$;

Скорость перемещения ползуна рассчитывалась следующим образом. При частоте сети 50 Гц, применяемый трехфазный электродвигатель имеет частоту вращения $n_d = 925$ об/мин. Передаточное отношение шкивов $b = 0.85$, соответственно частота вращения эксцентрикового вала:

$$n_b = n_d \times b = 925 \times 0.85 = 786 \text{ об/мин} = 13 \text{ об/сек}$$

Для вычисления скорости ползуна в точке начала вырубки воспользовались формулой:

$$V_C = r\omega \left(\sin\varphi \pm \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right), \quad (3.1)$$
$$\lambda = \frac{r}{l}$$
$$\omega = \frac{\pi n}{30}$$

где $r = 3$ мм – радиус кривошипа, в нашем случае величина эксцентриситета;

$l = 68$ мм – длина шатуна;

$\varphi = 290^\circ$ – угол поворота кривошипа для положения ползуна в момент начала вырубki.

Согласно формулы 3.1 скорость начала вырубki составляла:

$$V_C = 3 \times 1,37 \times (\sin 290^\circ \pm 0,022 \times \sin 2 \times 290^\circ) = 2,54 \text{ мм/с} = 0,254 \text{ см/с}$$

Критерием оценки результатов первой серии экспериментов являлась оценка средней высоты заусенцев.

Среднюю высоту заусенцев h_i^{cp} для каждого образца вычисляли по формуле (3.3), замеряя по 5 минимальных и 5 максимальных значений высот заусенцев по контуру наружной окружности $\varnothing 16$ мм, при помощи микроскопа модели УШМ – 1 и окулярного винтового микрометра модели МОВ – 1 – 15.

В ходе проведения первой серии экспериментов были получены средние значения высоты заусенцев h для 5 образцов каждого варианта нагружения и для каждого материала при числе реверсов $n=0$, которые представлены в таблице 3.1. В таблице П 1.4 в качестве примера представлены результаты замеров для алюминиевого сплава АД1.

Оценка воспроизводимости проводилась по критерию Кохрана для исключения резко выделяющихся значений [102].

Для исключения из результатов замеров грубых погрешностей для образцов из АД1 при числе реверсов $n=0$ полученные значения оценивались по \mathcal{G} критерию:

$$\mathcal{G}_{\max} = \frac{h_{\max} - h^{cp}}{s} < \mathcal{G}_{\text{табл}}, \quad (3.2)$$

$$\mathcal{G}_{\min} = \frac{h^{cp} - h_{\min}}{s} < \mathcal{G}_{\text{табл}}, \quad (3.3)$$

Табличное значение критерия для исключения резко выделяющихся значений для доверительной вероятности $p = 0,95$ и числе образцов каждого варианта нагружения $k = 5$ составляло $\mathcal{G}_{\max} = 1,87$ [102].

$$\mathcal{G}_{\max} = 0,93 < 1,87,$$

$$g_{\min} = 0,93 < 1,87 .$$

Сравнение полученных результатов с табличными значениями g_{\max} [102] показало выполнение условий формул (3.2) и (3.3), что означает отсутствие в результатах опытов грубых погрешностей.

Сводные результаты значений средних высот заусенцев для всех материалов, используемых при проведении экспериментов, при $n=0$, представлены в таблице 3.2.

Оценку случайной составляющей погрешности измерения проводили по критерию Стьюдента [102].

Случайную погрешность определили по формуле [102]:

$$\varepsilon = t_0 \cdot S_x^- , \quad (3.4)$$

где $t_0 = 2,571$ - критерий Стьюдента; при числе образцов каждого варианта нагружения $k=5$ и доверительной вероятности $p=0,95$.

Таблица 3.2 – Значения средней высоты заусенцев h и при числе реверсов $n=0$.

Материал	Средняя высота заусенцев h , мм
М1	0,2
латунь Л63	0,08
АД1	0,175
Сталь 30	0,053

Среднее квадратичное отклонение составило:

$$S_x^- = \sqrt{\frac{1}{k \cdot (k - 1)} \cdot \sum_{i=1}^k (h_i - h^{cp})^2} , \quad (3.5)$$

где $k = 5$ - число образцов каждого варианта нагружения;

h_i^{cp} - средняя высота заусенца i - го образца, мм;

h - средняя высота заусенца пяти образцов, мм.

В результате вычислений получили:

$$S_x = 0,0012 ,$$

$$\varepsilon = t_0 \cdot S_x = 0,0032 .$$

С учётом доверительной границы погрешности результатов измерения, то есть верхней и нижней границ интервала, доверительная средняя высота заусенцев h^d составит:

$$h^d = h \pm \sqrt{\varepsilon^2 + v^2} , \quad (3.6)$$

где $v = 0,002$ мм - инструментальная погрешность для индикатора часового типа.

В качестве примера вычислений h^d для медного сплава М1, составила:

$$h^d = (0,2 \pm 0,00373) \text{ мм.}$$

Расчеты показали, что доверительный интервал $< 2\%$ от величины средней высоты заусенцев, что свидетельствует о воспроизводимости результатов экспериментальных исследований и позволяет приступить к дальнейшим экспериментальным исследованиям.

3.2 Исследование влияния числа деформирований на образование заусенцев при вырубке

Во второй серии экспериментов проводилось исследование зависимости средней высоты заусенцев, образующихся при холодной листовой вырубке, от числа деформирований до окончательной вырубке, при котором наблюдается наибольшее снижение пластичности материала, что способствует уменьшению величины заусенцев.

Эксперименты, как и в первой серии экспериментов, проводились на испытательном стенде с экспериментальным устройством для вырубке шайб. Отличие от первой серии экспериментов состоит лишь в том, что пуансон-матрица вставлялась в экспериментальную установку с тарированной подкладной

шайбой обеспечивающей необходимую величину прямой и обратной деформации. Затем экспериментальная установка устанавливается на испытательный стенд и осуществлялась первичная деформация. После чего меняется местами пуансон и пуансон-матрица с тарированной подкладной шайбой, и установка переворачивается на 180 градусов, затем устанавливается на испытательный стенд для осуществления обратной деформации. Далее снова меняется местами пуансон и пуансон-матрица. После чего установка переворачивалась на 180 градусов и устанавливалась на испытательный стенд для осуществления следующей деформации, и так, в зависимости от необходимого числа реверсов n , до окончательной вырубки шайбы. На заключительном шаге цикла подкладная шайба снималась и осуществлялась окончательная вырубка.

При проведении экспериментов величины всех предварительных нагрузок были равны $(40 \div 50)\%$ от необходимой нагрузки для обычной вырубки шайб за один удар, а окончательное нагружение выбиралось с учётом обеспечения полной вырубки шайбы.

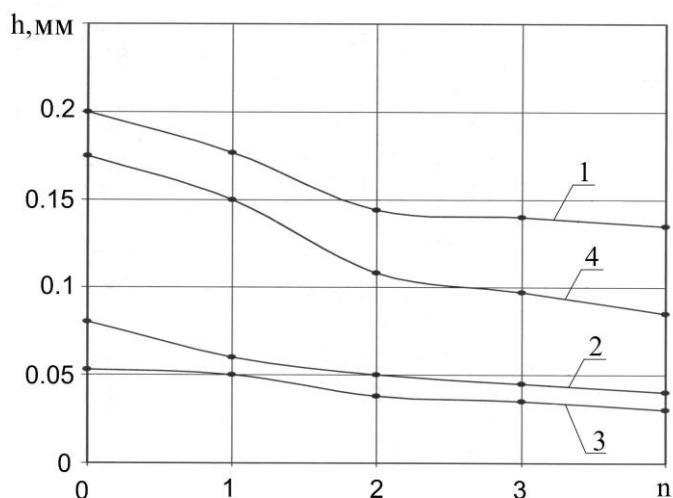
Критерием оценки результатов второй серии экспериментов, равно как и в первой, являлась оценка средней высоты заусенцев.

В ходе проведения экспериментов были вычислены значения средних высот заусенцев при различных числах реверсов n . Сводные результаты значений средних высот заусенцев для всех материалов, используемых при проведении второй серии экспериментов, при n от 0 до 4, представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Зависимость средней высоты заусенцев h от числа реверсов n .

Наименование измеряемых величин и единицы измерения	Материал	Число реверсов, n				
		0	1	2	3	4
Средняя высота заусенцев h , мм	М1	0,2	0,177	0,144	0,14	0,135
	латунь Л63	0,08	0,06	0,05	0,045	0,04
	АД1	0,175	0,15	0,108	0,097	0,085
	Сталь 30	0,053	0,05	0,038	0,035	0,03

Графические зависимости изменения средней высоты заусенцев h от числа реверсов n представлены на рисунке 3.2.



1 – М1, 2 – Латунь Л63, 3 – АД1, 4 – Сталь 30.

Рисунок 3.2 - Зависимость средней высоты заусенцев h от числа реверсов n .

Характер изменения графиков на рисунке 3.2 показывает, что с ростом числа деформирований n , средняя высота заусенцев h уменьшается для всех материалов. Кроме того, все кривые имеют зоны максимального уменьшения средней высоты заусенцев, например для медного сплава М1, эта зона находится в интервале n от 1 до 2 и составляет 50 % всего уменьшения величины заусенцев, а в остальных интервалах уменьшение составляет всего 6-7%. Для Стали 30 зоной максимального уменьшения величины заусенцев, которое составляет 60%, также является зона в интервале n от 1 до 2. Во всех остальных интервалах, для Стали 30, уменьшение составляет от 15 до 10%. Представленные результаты показывают, что при числе деформирований n больше 2, для всех испытываемых материалов величина заусенцев, уменьшается незначительно от 6 до 15%, это в несколько раз меньше чем при числе деформирований $n=2$ (50-60%). Отсюда следует, что влияние реверсирования снижается в связи со стабилизацией технологического процесса деформации, что подтверждает теоретические основы эффекта Баушингера [101].

Таким образом, по результатам второй серии экспериментов установлено, что для всех исследованных материалов наблюдается наибольшее снижение пластичности материала при числе деформирований до окончательной вырубки $n=2$, что означает вырубку за три перехода, то есть: первый переход Δ_1 – прямое деформирование на определенную величину; второй переход Δ_2 – обратное деформирование на определенную величину; третий переход Δ_3 – окончательная вырубка готовой детали. При дальнейшем увеличении до $n=4$ наблюдается не существенное снижение пластичности. Это свидетельствует о том, что материал заготовки имеет предел способности к наклепу, который достигается при числе деформирований до окончательной вырубки $n=2$, при дальнейшем увеличении числа n значительного увеличения наклепа не происходит.

3.3 Установление величины и интервалов варьирования доминирующих факторов

При выполнении третьей серии предварительных экспериментов определялось влияние скорости вырубки на среднюю высоту заусенцев при числе деформирований $n=2$.

Эксперименты, проводились на испытательном стенде с экспериментальным устройством для вырубки шайб. Отличие от второй серии экспериментов состоит лишь в том, что скорость вырубки регулировалась посредством частотного преобразователя модели SV 022 iC5-RUS показанном на рисунке 3.3.

Для производства наибольший интерес представляют изделия из цветных сплавов, при штамповке которых образуется недопустимая высота заусенцев, поэтому основные исследования и исследования зоны оптимизации проводились на образцах из алюминиевого сплава АД1. Вырубка производилась при различных соотношениях прямого и обратного деформирования. Результаты экспериментов представлены в таблице 3.4.

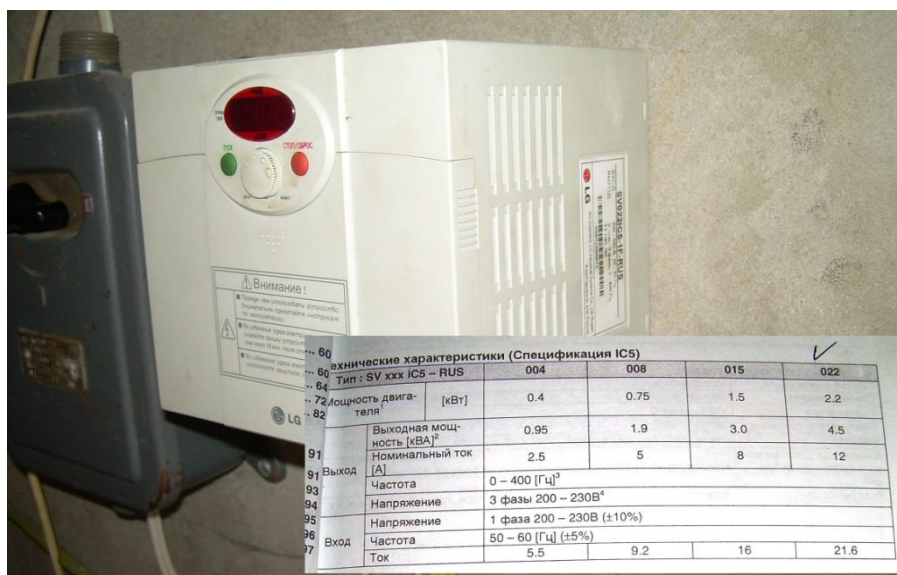


Рисунок 3.3 - Частотный преобразователь модели SV 022 iC5-RUS

Таблица 3.4 – Влияние скорости деформирования на среднюю величину заусенцев

№ опыта	Материал	Прямое деформирование %	Обратное деформирование %	Скорость вырубki V, мм/с	Высота заусенцев в мкм
1	АД1	10	33	1,54	190
2	АД1	10	33	2,04	167
3	АД1	10	33	2,54	133
4	АД1	20	40	0,5	170
5	АД1	20	40	1,04	170
6	АД1	20	40	1,54	140
7	АД1	20	40	2,04	33
8	АД1	20	40	2,54	17
9	АД1	0	0	2,54	230
10	АД1	0	33	2,54	170
11	АД1	0	50	2,54	220

Результаты третьей серии предварительных экспериментов показали, что при прямом деформировании 10% а обратном 33%, № опыта 1-3 таблица 3.4, с увеличением скорости величина заусенца уменьшается незначительно, всего на 57 мкм, тогда как при прямом деформировании 20% а обратном 40%, № опыта 4-8 таблица 3.4 с увеличением скорости величина заусенца уменьшается на 153 мкм,

что в три раза больше, по этому для дальнейших экспериментов такое сочетание прямого и обратного деформирования как 10 и 33% не представляет интереса.

На рисунке 3.4 показана графическая зависимость высоты заусенцев h от скорости вырубки V , построенная по опытам № 4-8, которые проводились при прямом деформировании 20% а обратном 40%. Из графика видно, что изменение скорости до 1,04 мм/с, не оказывает влияния на величину заусенцев, а с дальнейшем увеличением скорости, величина заусенцев значительно уменьшается. Представленная кривая имеет интервал значительного уменьшения заусенцев. При увеличении скорости начала вырубки от 1,54 до 2,04 мм/с, заусенцы уменьшаются на 107 мкм. Это объясняется тем, что при увеличении скорости вырубки материал заготовки не деформируется, а разрушается.

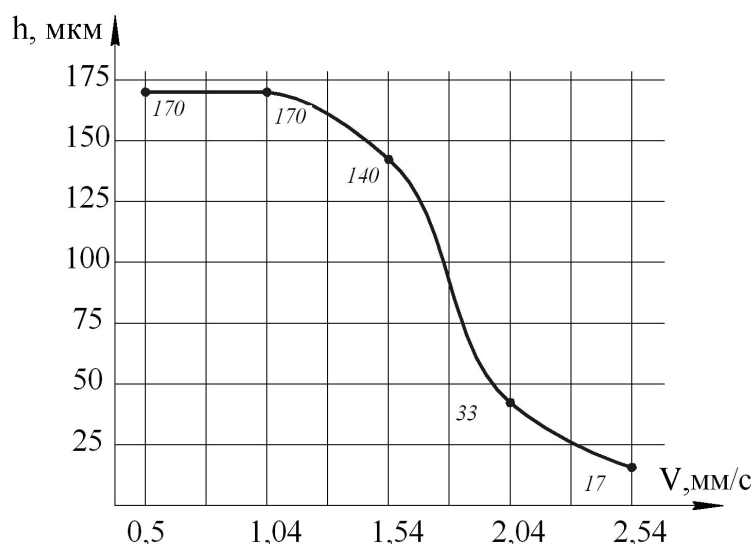


Рисунок 3.4 - Изменение величины заусенца h от скорости вырубки V при прямом деформировании=20% и обратном деформировании=40%.

Таким образом, по результатам третьей серии экспериментов установлено, что оптимальная скорость вырубки V при обратном нагружении, определяется в диапазоне от 2,04 до 2,54 мм/с, так как, в этом интервале кривая уменьшения заусенцев асимптотически приближается к оси изменения скорости. Дальнейшее увеличение скорости станет экономически не эффективным из-за применения

дополнительного или дорогостоящего оборудования для осуществления процесса вырубki с большей скоростью, чем 2,54 мм/с, поэтому дальнейшие экспериментальные исследования целесообразно проводить при скорости вырубki $V = 2,54$ мм/с.

Результаты экспериментов, представленные в таблице 3.4, показывают, что соотношение прямого и обратного деформирования оказывает существенное влияние на величину заусенцев, поэтому дальнейшие экспериментальные исследования проводились для определения соотношения прямого и обратного деформирования для каждого материала используемого в экспериментах по плану полного факторного эксперимента.

В четвертой серии предварительных экспериментов проводилось исследование влияния соотношения прямого и обратного деформирования на среднюю высоту заусенцев, а так же определение наиболее оптимального соотношения деформирований, при котором средняя высота заусенцев будет минимальной.

Эксперименты, как и в третьей серии экспериментов, проводились на испытательном стенде с экспериментальным устройством для вырубki шайб. Отличие от третьей серии экспериментов состоит в том, что скорость вырубki оставалась постоянной и равнялась $V = 2,54$ мм/с. А результаты экспериментов оценивались следующим образом:

- полученный экспериментальный образец (шайба) разрезалась диаметрально электроэрозионным методом, что исключало деформацию в зоне среза;

- разрезанный экспериментальный образец устанавливался на столик микроскопа и, при помощи цифровой камеры окуляра, изображение разреза образца, в четырехкратном увеличении, фиксировалось на ПК;

- при помощи специализированного программного обеспечения Scope Photo измерялось расстояние в мегапикселях от плоскости шайбы до кромки образовавшегося заусенца;

- полученное значение переводилось в микрометры: 1 мкм = 1.5 пикселя.

Выбор соотношения прямого и обратного деформирования осуществлялся в зависимости от предварительной оценки полученных результатов. В таблице 3.5 представлены результаты обратной вырубki, которая проводилась при прямом деформировании 10%, а обратное деформирование изменялась от 20 до 50% от толщины вырубаемой заготовки. Фотография полученного образца представлена на рисунке 3.6 а).

Таблица 3.5 – Влияние обратного деформирования на величину заусенца при прямом деформировании 10%

№ опыта	Материал	Прямое деформирование %	Обратное деформирование %	Скорость вырубki V, мм/с	Высота заусенцев в пикселах	Высота заусенцев в мкм
16	АД1	10	20	2,54	240	160
17	АД1	10	33	2,54	195	130
18	АД1	10	40	2,54	315	210
19	АД1	10	50	2,54	260	173

Как видно из таблицы 3.5, изменение величины обратного деформирования при прямом деформировании 10% оказывает не существенное влияние на величину заусенцев – изменение величины заусенцев составляет 80 мкм. И анализ изменения высоты заусенцев показывает, что высота заусенцев изменяется скачками и не прослеживается зависимости уменьшения величины заусенцев от увеличения обратного деформирования. А результаты экспериментов отраженные в таблице 3.6, которые были получены обратной вырубкой с первичным деформированием 20%, и изменении обратного деформирования в том же диапазоне, показывают уменьшение величины заусенцев на 150 мкм и зависимость значений высоты заусенцев от изменения обратного деформирования. Эта зависимость представлена на рисунке 3.5 кривой 1 и она имеет экстремум в точке соответствующей обратному деформированию 40%, что говорит о том, что для прямого деформирования 20 % обратное деформирование в 40% является оптимальным.

Таблица 3.6 – Влияние обратного деформирования на величину заусенцев при прямом деформировании 20%

№ опыта	Материал	Прямое деформирование %	Обратное деформирование %	Скорость вырубki V, мм/с	Высота заусенцев в пикселах	Высота заусенцев в мкм
20	АД1	20	20	2,54	275	183
21	АД1	20	33	2,54	150	100
22	АД1	20	40	2,54	50	33
23	АД1	20	50	2,54	100	67

В таблице 3.7, показаны результаты экспериментов, которые были получены обратной вырубкой с первичным деформированием 33%, и изменением обратного деформирования в том же диапазоне. Их анализ показывает, что уменьшение величины заусенцев зависит от изменения обратного деформирования. Эта зависимость представлена на рисунке 3.5 кривой 2 и также имеет экстремум в точке соответствующей обратному деформированию 40%, что говорит о том, что для прямого деформирования 33 % обратное деформирование в 40% является оптимальным.

Таблица 3.7 – Влияние обратного деформирования на величину заусенцев при прямом деформировании 33%

№ опыта	Материал	Прямое деформирование %	Обратное деформирование %	Скорость вырубki V, мм/с	Высота заусенцев в пикселах	Высота заусенцев в мкм
24	АД1	33	33	2,54	50	33
25	АД1	33	40	2,54	35	23
26	АД1	33	50	2,54	90	60

Полученные при прямом деформировании 40% результаты экспериментов отражены в таблице 3.8 и подтверждают, что величина заусенцев зависит от изменения обратного деформирования в том же диапазоне. Такая зависимость показана на рисунке 3.5 кривой 3, которая имеет экстремум в точке соответствующей обратному деформированию 40%, таким образом, в этой точке величина заусенцев равна $h = 0$.

Таблица 3.8 – Влияние обратного деформирования на величину заусенцев при прямом деформировании 40%

№ опыта	Материал	Прямое деформирование %	Обратное деформирование %	Скорость вырубki V, мм/с	Высота заусенцев в пикселах	Высота заусенцев в мкм
27	АД1	40	20	2,54	260	173
28	АД1	40	33	2,54	80	53
29	АД1	40	40	2,54	0	0
30	АД1	40	50	2,54	20	13

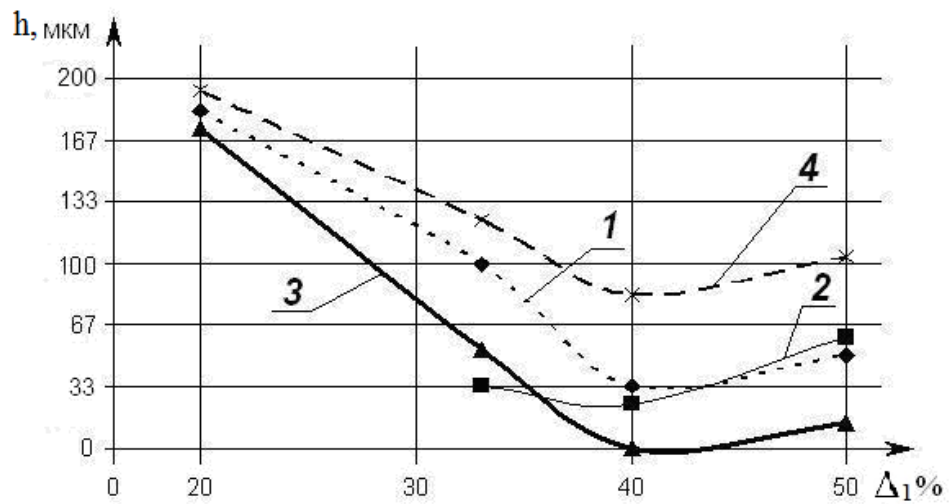
Результаты экспериментов показывают, что оптимальное соотношение прямого и обратного деформирования для алюминиевого сплава АД1 это 40% и 40%. При таких значениях деформирования заусенец на кромках изделий отсутствует – рисунок 3.6 б).

Дальнейшее увеличение прямого деформирования представлено в таблице 3.9 и на рисунке 3.5 результаты экспериментов с первичным деформированием 50% отражены кривой 4.

Таблица 3.9 – Влияние обратного деформирования на величину заусенцев при прямом деформировании 50%

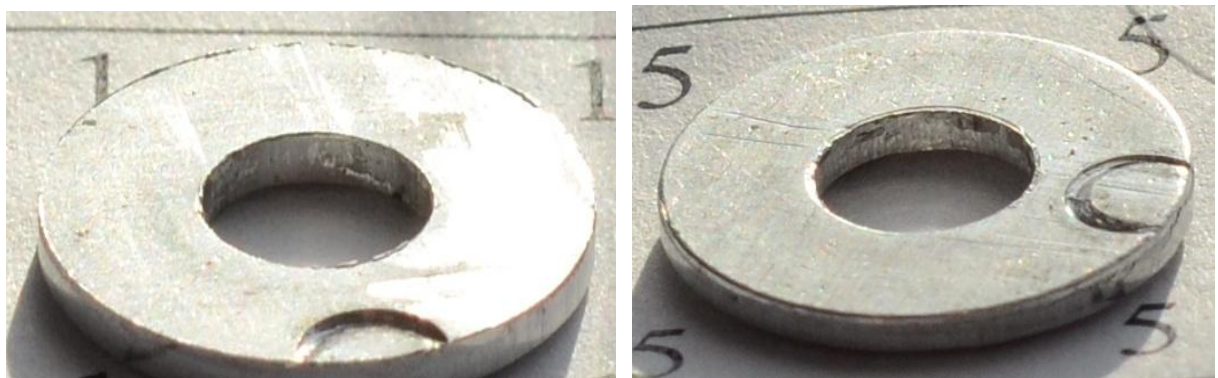
№ опыта	Материал	Прямое деформирование %	Обратное деформирование %	Скорость вырубki V, мм/с	Высота заусенцев в пикселах	Высота заусенцев в мкм
31	АД1	50	20	2,54	290	193
32	АД1	50	33	2,54	185	123
33	АД1	50	40	2,54	125	83
34	АД1	50	50	2,54	155	103

Из анализа кривой видно, что дальнейшее увеличение прямого деформирования приводит к увеличению значения величины заусенцев. Следовательно применение прямого деформирования более 40% для алюминиевого сплава АД1 является нецелесообразным.



Прямая деформация: 1 –20%; 2 –33%; 3 40%; 4 –50%

Рисунок 3.5 - Изменение величины заусенцев от величины обратной деформации при различной прямой деформации образцов из алюминиевого сплава АД1.



- а) при прямой деформации 10% и обратной деформации 20%;
 б) при прямой деформации 40% и обратной деформации 40%;

Рисунок 3.6 – снимок шайбы из алюминиевого сплава АД1, при сочетаниях прямой и обратной деформации

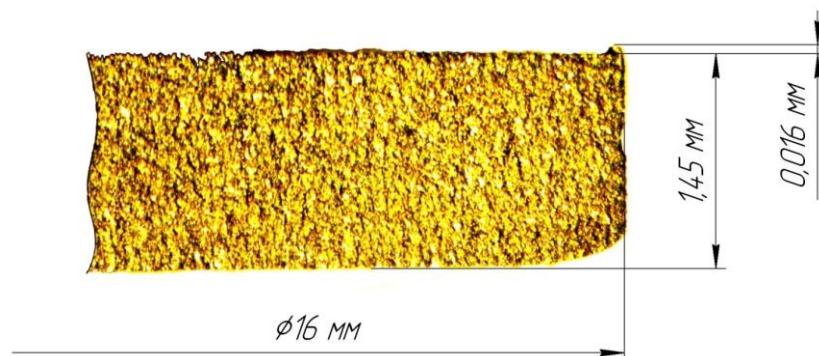


Рисунок 3.7 – Макрошлиф разреза шайбы из алюминиевого сплава АД1, при прямом деформировании 10% и обратном деформировании 20%.

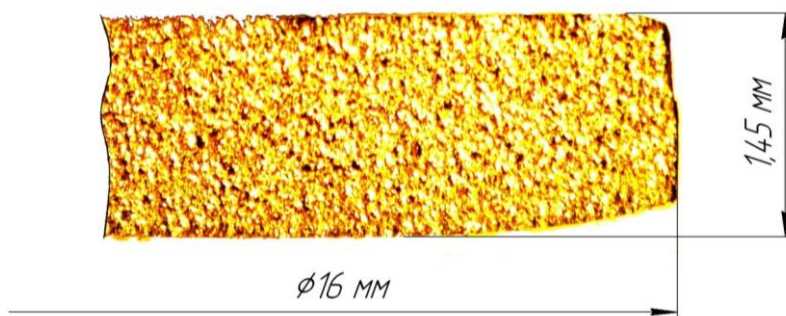


Рисунок 3.8 – Макрошлиф разреза шайбы из алюминиевого сплава АД1, при прямом деформировании 50% и обратном деформировании 50%.

Поперечное сечение образцов из алюминиевого сплава АД1, представленное на рисунке 3.7, хорошо виден заусенец величиной 0,016 мм или 160 мкм, а на рисунке 3.8 такой заусенец отсутствует, так как экспериментальный образец получен при оптимальном соотношении прямой и обратной деформации.

На рисунке 3.9 представлены микрошлифы, показывающие характер деформации зерен при различном соотношении прямой и обратной деформации.

Полученные зависимости, представленные графически на рисунке 3.5, наглядно показывают, что для всех значений прямой деформации реверсивная деформация 40% обеспечивает минимальное значение величины заусенцев, а дальнейшее увеличение обратной деформации до 50% во всех случаях приводит к ухудшению качества вырубki, то есть к росту значения величины заусенцев.



а)



б)

- а) Образец из Стали 30, полученный при прямом деформировании 10% и обратном 20%;
б) Образец из сплава М1, полученный при прямом деформировании 40% и обратном 40%

Рисунок 3.9 - Микрошлифы экспериментальных образцов.

Таким образом, установлена область оптимальных значений величины заусенцев для всех вариантов прямой деформации. При многократном деформировании снижается начальный предел текучести и увеличивается предел прочности, что приводит к получению деталей без заусенцев, но при избыточном увеличении предела прочности и снижении предела текучести наблюдается преждевременное разрушение материала заготовки. Результатом такого разрушения является наличие дефектов на кромках деталей в виде заусенцев.

3.4 План полного факторного эксперимента

Диапазоны и интервалы варьирования независимых факторов, определенных в результате проведения предварительных экспериментов, представлены в таблице 3.9.

Для оптимизации технологического процесса обратной вырубki была построена математическая модель в виде уравнения регрессии. Функция отклика Y представлена полиномом первой степени (3.7), содержащего кроме линейных членов, члены взаимного влияния факторов.

Таблица 3.9 – Факторы, интервалы и уровни варьирования.

№ п/п	Факторы	Уровни			Интервал варьирования \tilde{j}
		Min (-1)	Средн. (0)	Max (+1)	
1	\tilde{X}_1 – скорость вырубki, мм/с	0,5	1,5	2,5	0,5
2	\tilde{X}_2 – первичная деформация, %	10	30	50	10
3	\tilde{X}_3 – реверсивная деформация, %	20	35	50	10

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3, \quad (3.7)$$

Для реализации плана полного факторного эксперимента ПФЭ по методу Бокса-Уилстона была построена матрица типа 2^n , представленная в таблице 3.10

Таблица 3.10 – Матрица полного факторного эксперимента

№	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	Y_1	Y_2	Y_3	\bar{Y}	S^2
1	+	-	-	-	+	+	+	-	Y_{11}	Y_{21}	Y_{31}	Y_1	S_1^2
2	+	+	-	-	-	-	+	+	Y_{12}	Y_{22}	Y_{32}	Y_2	S_2^2
3	+	-	+	-	-	+	-	+	Y_{13}	Y_{23}	Y_{33}	Y_3	S_3^2
4	+	+	+	-	+	-	-	-	Y_{14}	Y_{24}	Y_{34}	Y_4	S_4^2
5	+	-	-	+	+	-	-	+	Y_{15}	Y_{25}	Y_{35}	Y_5	S_5^2
6	+	+	-	+	-	+	-	-	Y_{16}	Y_{26}	Y_{36}	Y_6	S_6^2
7	+	-	+	+	-	-	+	-	Y_{17}	Y_{27}	Y_{37}	Y_7	S_7^2
8	+	+	+	+	+	+	+	+	Y_{18}	Y_{28}	Y_{38}	Y_8	S_8^2
													$\sum_{i=1}^{n=8} S_i^2$

Вычисление дисперсии производилось по известной формуле:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^{n=8} (\bar{Y}_i - Y_{ij})^2}{N-1}, \quad (3.8)$$

Для оценки воспроизводимости опытов и равномерности дисперсий эксперименты проводились три раза ($N=3$) воспроизводимость оценивалась по критерию Крохана.

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum S_i^2} \leq G(\text{табл.}), \quad (3.9)$$

где S_{\max}^2 - максимальная дисперсия из таблицы 3.10.

Равномерность дисперсий оценивалась по критерию Фишера:

$$F = \frac{S_{\max}^2}{S_{\min}^2} \leq F(\text{табл.}), \quad (3.10)$$

где S_{\min}^2 - минимальная дисперсия из таблицы 3.10.

Средняя дисперсия экспериментов матрицы составляла:

$$S_y^2 = \frac{\sum S_i^2}{n=8}, \quad (3.11)$$

Среднеквадратичное отклонение, которое вычисляется по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{S_y^2}{n-1}}, \quad (3.12)$$

При положительном заключении о воспроизводимости опытов вычисляются все коэффициенты: $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$, и строится модель с учетом величины и знаков коэффициентов

Оценка значимости коэффициента производилось по критерию Стьюдента (t) по формуле.

$$|b_i| \geq tS, \quad (3.13)$$

Все коэффициенты, значения которых по модулю меньше значимых выбрасывались из модели, по окончательному виду рассчитывались аналитические значения $Y_{расч}$

Адекватность модели оценивается по критерию Фишера (F) путем сравнения дисперсии расчетных и экспериментальных значений полученных при заполнении таблицы 3.11.

Таблица 3.11 – Оценка адекватности модели

N°	\bar{Y}	$Y_{расч.}$	$\Delta Y = \bar{Y} - Y_{расч.}$	$S_{ad}^2 = \Delta Y^2$
1	Y_1	Y'_1	ΔY_1	S_{ad1}^2
2	Y_2	Y'_2	ΔY_2	S_{ad2}^2
3	Y_3	Y'_3	ΔY_3	S_{ad3}^2
4	Y_4	Y'_4	ΔY_4	S_{ad4}^2
5	Y_5	Y'_5	ΔY_5	S_{ad5}^2
6	Y_6	Y'_6	ΔY_6	S_{ad6}^2
7	Y_7	Y'_7	ΔY_7	S_{ad7}^2
8	Y_8	Y'_8	ΔY_8	S_{ad8}^2
				$\sum_{i=1}^n S_{adi}^2$

Дисперсия адекватности вычисляется по формуле:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum S_{ad}^2}{n-k-1}, \quad (3.14)$$

где k – количество значимых коэффициентов при независимых факторах;

n – количество опытов в матрице.

Адекватность оценивалась по формуле:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} \leq F_{табл}, \quad (3.15)$$

Если модель адекватна, можно начинать ее оптимизировать движением по градиенту по методу Бокса-Уилстона или использовать симплекс метод (ПСМ).

Полученные аналитические расчеты по оптимизации целевой функции целесообразно проверить непосредственным проведением нескольких контрольных экспериментов, или исследовать окрестности факторного пространства в области оптимума.

Выводы по главе

1. Выявлено, что повышение прочности и как результат уменьшение пластичности проявляется до значения числа деформирований $n=2$, в дальнейшем происходит стабилизация технологического процесса деформирования и повышение прочности заметно ослабевают.
2. Выявлено, что при реверсивной вырубке необходимо использовать скорость вырубки в диапазоне от 2,04 до 2,54 мм/с, так как именно в этом диапазоне, величина заусенцев образовавшихся при вырубке значительно снижается, а при дальнейшем увеличении скорости остается постоянным.
3. Определено, что для сплавов цветных металлов достаточное соотношение прямой и обратной деформации – 50%/50%, а для стальных сплавов 40%/40%;
4. Установленные диапазоны изменения факторов позволили спланировать полный факторный эксперимент и построена регрессионная модель.

4. Экспериментальное исследование параметров реверсивной вырубki

4.1 Оценка адекватности разработанной модели

В соответствии с методикой был реализован план полного факторного эксперимента для всех исследуемых материалов, которые представленные в таблице 4.1. В качестве функции отклика Y принята средняя величина заусенцев по контуру вырубki h_{cp} .

Таблица 4.1 – Матрица полного факторного эксперимента для Стали 30

№	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	$\bar{Y} = h_{cp}$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	63
2	+	+	-	-	-	-	+	+	57
3	+	-	+	-	-	+	-	+	72
4	+	+	+	-	+	-	-	-	70
5	+	-	-	+	+	-	-	+	50
6	+	+	-	+	-	+	-	-	42
7	+	-	+	+	-	-	+	-	64
8	+	+	+	+	+	+	+	+	60

Воспроизведение опытов проверялось на 5 образцах в режиме 1 строки матрицы (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Воспроизводимость опытов в режиме первой строки матрицы

№	Y_{1max}	Y_{1min}	$\bar{Y}_1 = h_{cp}$	ΔY	S^2
1	71	55	63	0	0
2	72	56	64	1	1
3	63	60	61,5	-1,5	2,25
4	69	58	63,5	0,5	0,25
5	70	56	63	0	0

$$\sum_{i=1}^{n=5} S_i^2 = 0,175, S_{icp} = \sqrt{\frac{S_i^2}{n}} = 0,19,$$

Вычисление дисперсии производилось по известной формуле:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n=8} (\bar{Y}_i - Y_{ij})^2}{n-1}, \quad (4.1)$$

Для оценки воспроизводимости опытов и равномерности дисперсий эксперименты проводились пять раз с последующей оценкой воспроизводимости по критерию Кохрана.

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum S_i^2} \leq G(\text{табл.}) \quad (4.2)$$

Вычислены значения коэффициентов уравнения регрессии

$$b_0 = 59.75, b_1 = -2.5, b_2 = 6.75, b_3 = -5.75, b_{12} = 1, b_{13} = -0.5, b_{23} = 1.25, b_{123} = 0.$$

Проверка значений коэффициентов по критерию Стьюдента

$$b_i \geq t \cdot S_i \geq 2,776 \cdot 0,019 = 0,52$$

По критерию Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0,05$ коэффициенты: b_{13}, b_{123} , являются незначимыми и поэтому они были исключены из модели.

Тогда модель принимает окончательный вид:

$$Y = 59.75 - 2.5X_1 + 6.75X_2 - 5.75X_3 + 1X_1X_2 + 1.25X_2X_3, \quad (4.3)$$

По формуле (3.9) были произведены вычисление расчетных значений функции отклика $h_p = Y_p$:

$$h_{p1} = 63.23, h_{p2} = 56.5, h_{p3} = 71.9, h_{p4} = 69.5,$$

$$h_{p5} = 49.5, h_{p6} = 42.5, h_{p7} = 63.5, h_{p8} = 60.5$$

Полученные данные занесены в таблицу 4.3 для проверки адекватности модели.

Таблица 4.3 – Проверка адекватности модели для Стали 30

№	$h_{экс}$	$h_{расч}$	Δh	S_{adi}^2
1	63	63,25	0,25	0,0625
2	57	56,5	0,5	0,25
3	72	71,49	0,51	0,26
4	70	69,5	0,5	0,25
5	50	49,5	0,5	0,25
6	42	42,5	0,5	0,25
7	64	63,5	0,5	0,25
8	60	60,5	0,5	0,25
				$\sum S_{adi}^2 = 1,8225$

Дисперсия адекватности составляет:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum S_{adi}^2}{n - k - 1} = \frac{1,8225}{2} = 0,91,$$

где $k=5$ число значимых коэффициентов.

Оценка адекватности модели по критерию Фишера:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_i^2} = \frac{0,91}{0,175} = 5,26 \leq 6,4, \quad (4.4)$$

подтвердила адекватность модели.

Проведённый анализ моделей по критериям Кохрана, Стьюдента и Фишера показал, что все коэффициенты линейной модели значимы, а коэффициенты взаимного влияния факторов оказывают слабые влияния или оказались незначимыми, поэтому оптимизация моделей была проведена только по линейной части моделей. Структура математических моделей показывает, что они однородны и характер влияния доминирующих факторов одинаков:

1. Сталь 30 - $Y = 59.75 - 2.5X_1 + 6.75X_2 - 5.75X_3;$
2. Алюминиевый сплав АД1 - $Y = 45.375 - 2.175X_1 + 3.375X_2 - 12.875X_3;$
3. Медь техническая М1 - $Y = 46.75 - 5.75X_1 + 4.25X_2 - 11.0X_3.$

Полученные выводы по анализу моделей хорошо подтверждаются во всех опытах. Так, для каждого из исследуемых материалов определено соотношение обратного и прямого деформирования.

Из проведенных экспериментов видно, что рост обратного деформирования (X_3), положительно влияет на уменьшение значения величины заусенцев, поэтому целесообразно провести мысленные опыты по увеличению доли обратного деформирования.

Для движения по градиенту по методу Бокса – Уилсона [103], с учетом проведенного анализа, было принято значение знака при факторе $X_2 = const(5\%)$ равном (-1) и его значение оставалось постоянным для проведения мысленных опытов. Тогда математические модели для проведения расчетов составили:

1. Сталь 30 - $Y = 53 - 2.5X_1 - 5.75X_3$;
2. Алюминиевый сплав АД1 - $Y = 42 - 2.175X_1 - 12.875X_3$;
3. Медь техническая М1 - $Y = 42.5 - 5.75X_1 - 11.0X_3$.

В качестве примера представлен расчет мысленных опытов при возрастании скорости нагружения и величины обратного деформирования на примере образцов из материала Сталь 30.

Оптимизация модели движением по градиенту по методу Бокса-Уилсона, предполагает установление величины шагов, которые зависят от величины коэффициента и интервала варьирования для каждого фактора $t_i = b_i Y_i$. Это приводит во многих случаях к получению значений фактора трудновыполнимых экспериментально, что повышает трудоемкость экспериментальной проверки мысленных опытов.

Пошаговое изменение величины кодированного фактора X_{ij} , проводилось экстраполяцией за область адекватности уравнения, и рассчитывалось для скорости вырубки (X_1) по следующей формуле:

$$X_{1i} = \frac{\tilde{X}_{1\max} - \tilde{X}_{1cp}}{\tilde{J}}, \quad (4.5)$$

Были исследованы изменение величины скорости с $\tilde{X}_{1\max}$ 0,5 до 3,5 ммс⁻¹ с исходным интервалом $\tilde{J} = 0,5$ ммс⁻¹, и переменным значением кодированного фактора X_{Ii} от 1 до 7.

$$\begin{aligned} \text{Шаг 1: } \tilde{X}_{1\max} &= 1 \text{ ммс}^{-1}, X_{11} = \frac{1,5-0,5}{0,5} = +2; \text{ шаг 2: } \tilde{X}_{1\max} = 1,5 \text{ ммс}^{-1}, \\ X_{12} &= \frac{2-0,5}{0,5} = +3; \text{ шаг 3: } \tilde{X}_{1\max} = 2 \text{ ммс}^{-1}, X_{13} = \frac{2,5-0,5}{0,5} = +4; \text{ шаг 4: } \tilde{X}_{1\max} = 2,5 \text{ ммс}^{-1}, \\ X_{14} &= \frac{3-0,5}{0,5} = +5; \text{ шаг 5: } \tilde{X}_{1\max} = 3 \text{ ммс}^{-1}, X_{15} = \frac{3,5-0,5}{0,5} = +6; \text{ шаг 6: } \tilde{X}_{1\max} = 3,5 \text{ ммс}^{-1}, \\ X_{16} &= \frac{4-0,5}{0,5} = +7; \end{aligned}$$

Аналогичные вычислительные опыты производили при изменении фактора X_3 – реверсивная деформация, в диапазоне от 15 до 30 % с исходным интервалом 2.5 %, и переменным значением X_{3i} от 1 до 4 с шагом 0,5.

Функция отклика Y_i , рассчитывается по формуле:

$$Y_i = 53 - 2.5X_{Ii} - 5.75X_{3i} \quad (4.6)$$

Суммарное воздействие факторов X_1 и X_3 на величину заусенцев при проведении мысленных опытов для стали 08 кп представлены в сводной таблице 4.4 на графике рисунок 4.1.

Таблица 4.4 – Значения величины функции отклика при движении по градиенту изменением факторов X_1 и X_3

№ Шага	факторы				параметр оптимизации \tilde{Y} , мкм
	X_1	\tilde{X}_1 см/с	X_3	\tilde{X}_3 %	
Исходн.	1	0,5	1	15	44.75
1	2	1	1.5	17.5	33.625
2	3	1,5	2.0	20	28.25
3	4	2	2.5	22.5	22.815
4	5	2,5	3.0	25	17.5
5	6	3	3.5	27.5	12.125
6	7	3,5	4.0	30	6.75

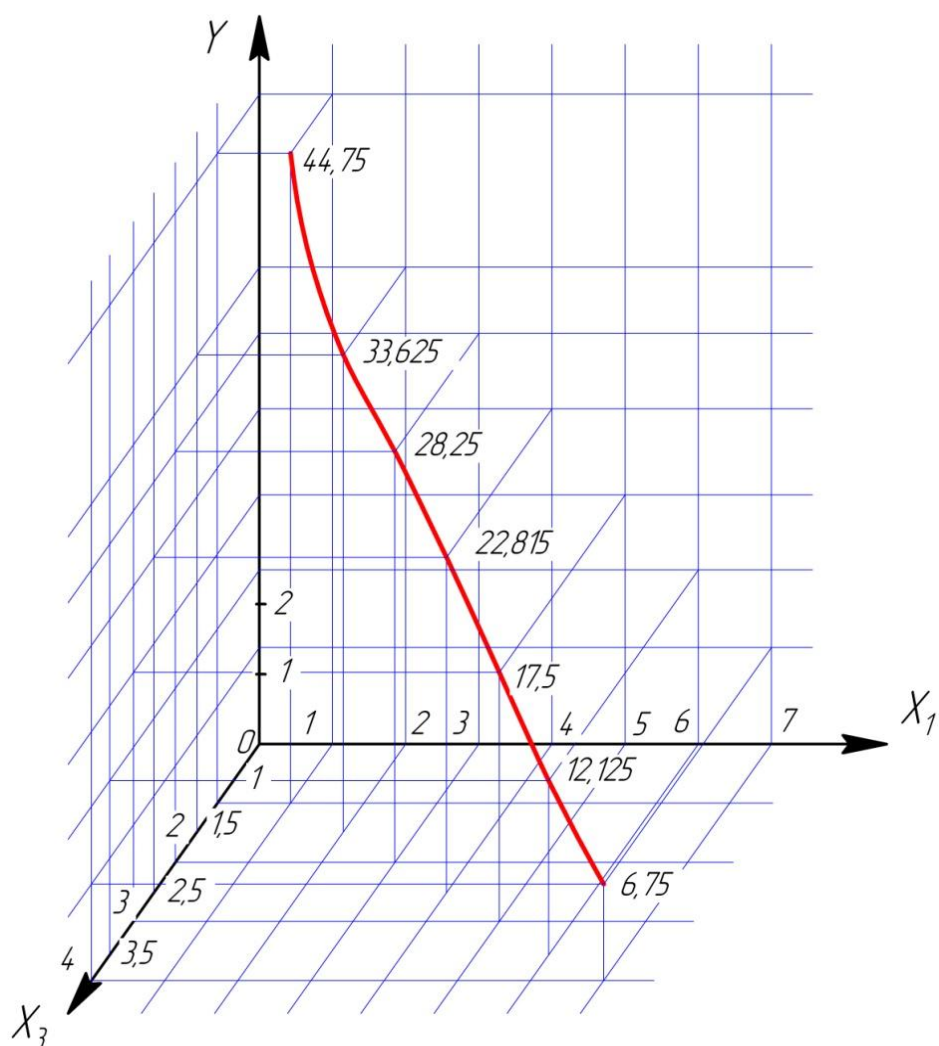


Рисунок 4.1 – Минимизация величины заусенцев при движении по градиенту изменением факторов X_1 и X_3 .

Полученные результаты мысленных опытов оптимизации целевой функции при движении по градиенту, позволил обеспечить уменьшение величины заусенцев для стали 08 кп более чем в 6.6 раза и получить среднее значение заусенцев порядка 6-7 мкм, т.е. уложиться в допуск $T = 0.01$ мм, что вполне соответствует производственному допуску.

Для исследования области оптимума, полученной в ходе проведения экспериментов, были построены две дополнительных матрицы ПФЭ при максимальной скорости $V = 2,54$ мм/с представленные в таблицах 4.5 и 4.6.

Таблица 4.5 – Матрица полного факторного эксперимента для АД1, при изменении прямого деформирования X_2 от 10 до 40%, а обратного X_3 от 20 до 40%

№	X_2	X_3	X_2X_3	№ опыта	$\bar{Y}_{экспер}$	$\bar{Y}_{расч.}$	$\bar{\Delta Y}$
1	10	20	+	16	160	160	0
2	40	20	-	27	173	173	0
3	10	40	-	18	210	210	0
4	40	40	+	29	0	0	0

Проведенные расчеты коэффициентов позволили построить математическую модель вида:

$$Y = 135,75 - 73,75X_2 - 46,25X_2 - 83,75X_2X_3, \quad (4.7)$$

Расчеты, проведенные по математической модели полностью совпали с экспериментальными данными, что свидетельствует об адекватности модели.

Таблица 4.6 – Матрица полного факторного эксперимента для АД1, при изменении прямого деформирования X_2 от 20 до 50%, а обратного X_3 от 33 до 50%.

№	X_2	X_3	X_2X_3	№ опыта	$\bar{Y}_{экспер}$	$\bar{Y}_{расч.}$	$\bar{\Delta Y}$
1	20	33	+	21	100	99.5	0,5
2	20	50	-	23	50	49.95	0,05
3	50	33	-	32	123	122.95	0,05
4	50	50	+	34	103	102.95	0,05
$\frac{\sum \Delta Y}{i} = \frac{0.65}{4} = 0.16$							

Проведенные расчеты коэффициентов позволили построить математическую модель вида:

$$Y = 93,84 + 28,75X_2 - 26,25X_2 + 11,25X_2X_3, \quad (4.8)$$

Оценка адекватности модели по критерию Фишера не целесообразна, так как отклонение составляет всего 0,01%, что свидетельствует об адекватности математической модели.

4.2 Исследование образцов на каждой стадии деформирования

По результатам проведения полного факторного эксперимента было получено уравнение регрессии и проведена оптимизация целевой функции, что позволило установить значения доминирующих факторов: число циклов и величину скорости деформирования, соотношение и величину прямого и обратного деформирования.

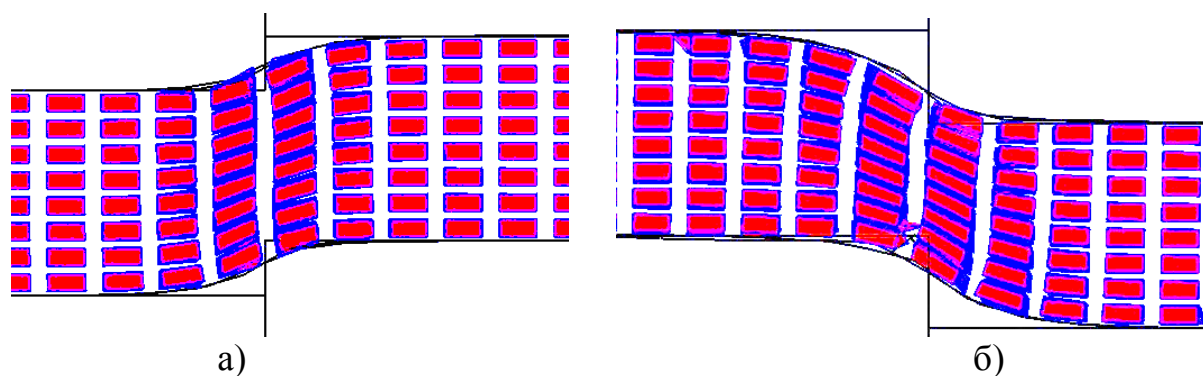
Рассчитанные и экспериментально подтвержденные технологические параметры процесса были положены в основу моделирования деформационных процессов в зоне среза с использованием сетки Лагранжа.

Постадийное исследование различных соотношений величин прямого и обратного деформирования позволило установить изменения, происходящие в зоне деформирования.

При использовании меньших значений технологических параметров прямого и обратного деформирования изменения в строении сетки Лагранжа показывают, что пластичность материала снижается незначительно, сохраняя знак растягивающих напряжений, что не препятствует появлению заусенцев по контуру среза при вырубке (Рисунок 4.2).

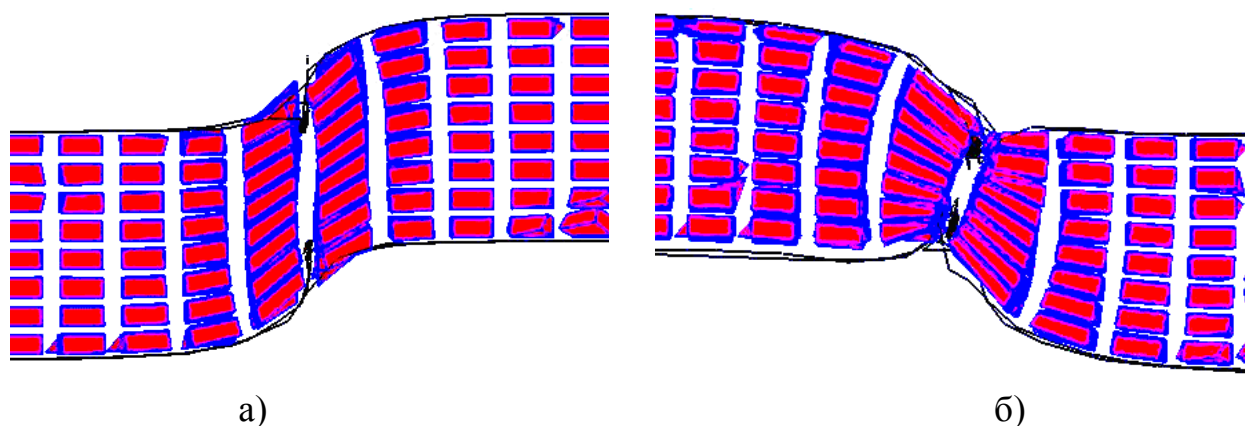
При расчетных значениях прямого деформирования сетка Лагранжа начинает растягиваться (Рисунок 4.3 а), а при деформировании в обратную сторону сетка сжимается и снова растягивается (Рисунок 4.3 б).

Полученные модели показали, что, при обратной листовой штамповке с оптимальными значениями величины и соотношением прямого и обратного деформирования, имеют место не только сдвиг, но и растягивающие и сжимающие напряжения, что наглядно подтверждается наложением сетки Лагранжа на деформируемый образец.



а) прямое деформирование 25%, б) обратное деформирование 45%.

Рисунок 4.2 - Вид искаженной сетки Лагранжа при недостаточном соотношении прямого и обратного деформирования



а) прямое деформирование 50%, б) обратное деформирование 50%.

Рисунок 4.3 - Вид искаженной сетки Лагранжа при достаточном соотношении прямого и обратного деформирования

Для подтверждения результатов моделирования деформационных процессов в зоне среза были изготовлены образцы для каждой стадии деформирования на экспериментальном оборудовании. Образцы из медного сплава М1, представляющие собой сечение шайб с наружным диаметром 20 мм, внутренним 5мм и толщиной 1,5 мм. Микрошлифы были протравлены с выделением границ зерен, что позволило производить замеры микротвердости в зонах с различной стадией деформирования. Результаты замеров после прямого и обратного деформирования представлены на рисунках 4.4, 4.5 и в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Значения микротвердости в зонах изменения структуры зерен при постадийном деформировании медного сплава М1

Наименование зоны касания инструмента	Значение микротвердости при прямом деформировании на величину $\Delta_1=50\%$, HV (номер точки)	Значение микротвердости при прямом деформировании на величину $\Delta_1=50\%$ и обратном деформировании на величину $\Delta_2=50\%$, HV (номер точки)
не деформированная зона (исходная)	87,6 (5)	85,4 (5)
левая граница зоны деформирования	95,8 (1); 107 (2)	142 (1)
центральная зона деформирования	143 (3); 134 (6)	160(2); 160(3); 150(6); 174(7)
правая граница зоны деформирования	118(4) 119(7)	133(4)



Рисунок 4.4 - Макрошлиф образца из медного сплава М1 в 100 кратном увеличении подвергнутого прямому деформированию при $\Delta_1=50\%$ с обозначением точек касания инструмента для измерения микротвердости.



Рисунок 4.5 - Макрошлиф образца из медного сплава М1 в 100 кратном увеличении подвергнутого обратному деформированию при $\Delta_1=50$ и $\Delta_2=50\%$ с обозначением точек касания инструмента для измерения микротвердости.

Результаты измерения микротвердости показывают, что рост микротвердости при прямом деформировании локализуется в центральной части зоны деформирования в точках 3, 6 (Рисунок 4.4) и составляет 134-143 HV, убывая до 107-118 HV в точках 2 и 4 на границах зоны деформации при исходной твердости основного материала 87,6 HV (точка 5). При последующем обратном деформировании происходит дальнейшее повышение микротвердости и достигает в центре зоны деформирования в точках 2 и 7 (Рисунок 4.5) значений 160 и 174 HV, убывая до 142 и 133 HV на границе зоны в точках 1 и 4 (Рисунок 4.5) при твердости основного материала 85,4 HV. Таким образом, поэтапное исследование изменения микротвердости зерен в зоне деформирования показало, что при прямом деформировании микротвердость в центральной зоне возрастает в 1,6 раз по сравнению с исходной твердостью материала, а при обратном деформировании увеличивается еще в 1,3 раз по сравнению с первичным деформированием. При суммарном прямом и обратном деформировании

микротвердость в зоне среза увеличивается в 2 раза. Аналогичные исследования зоны деформирования, проведенные на образцах из стали 30 показали увеличение микротвердости с 128 до 330 HV, т.е. Более чем в 2 раза.

В рассматриваемом процессе деформирования наблюдается обобщенный (суммарный механизм) потери ресурса пластичности при любом виде пластического деформирования, включая сдвиговую и изгибающую деформацию зерен в зоне среза, что исчерпывает ресурс пластичности и при окончательной вырубке способствует развитию трещин, направленных навстречу друг другу, позволяющих сформировать поверхность среза без образования заусенцев по контуру среза.

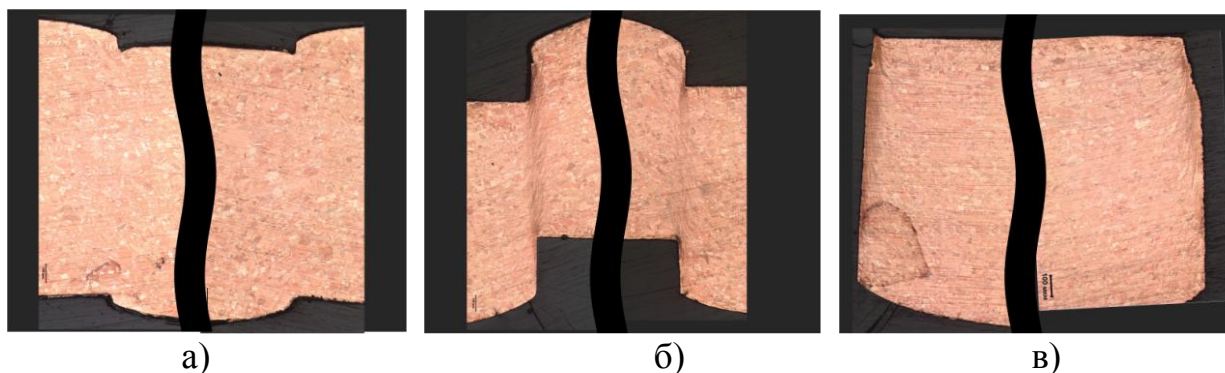
Экспериментальные данные, полученные в результате измерения микротвердости, показывают, что при теоретически рассчитанном соотношении прямого и обратного деформирования, микротвердость в зонах деформирования достигает максимальных значений. Это наблюдение свидетельствует о повышении прочности и снижении пластичности материала заготовки. Таким образом, на основании экспериментальных данных установлено, что величину прямого и обратного деформирования необходимо определять в зависимости от пластичности материала заготовки. Мерой пластичности является относительное удлинение δ , чем больше δ , тем более пластичным считается материал. При относительном удлинении δ от 27% и выше, что характерно для сплавов из цветных металлов, применима величина прямого и обратного деформирования равная 50% от толщины заготовки. При относительном удлинении δ до 26%, что характерно для Конструкционных углеродистых сталей, применима величина прямого и обратного деформирования равная 40% от толщины заготовки.

Чтобы оценить влияние технологических параметров обратного деформирования были изготовлены образцы для каждой стадии деформирования с окончательной вырубкой.

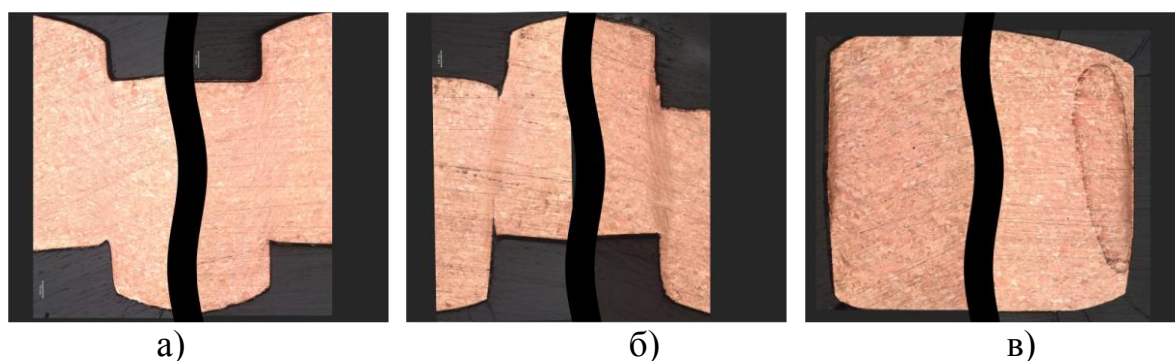
На поперечном срезе образцов в 30-и кратном увеличении видно, что при недостаточном соотношении (Рисунок 4.6) прямого и обратного деформирования пластичность не уменьшается и на готовой детали образуется заусенец, а при

избыточном соотношении (Рисунок 4.8) прямого и обратного деформирования скалывающиеся трещины не идут навстречу друг другу и образуется рваная кромка на детали. При использовании прямого и обратного деформирования, с теоретически рассчитанными по математической модели, технологическими параметрами достигается получение листовой детали с полным отсутствием заусенца и наличием с обеих кромок образца характерного завала от вырубki (Рисунок 4.7), в результате того что при деформировании с обратным знаком на определенную величину происходит уменьшение пластичности материала.

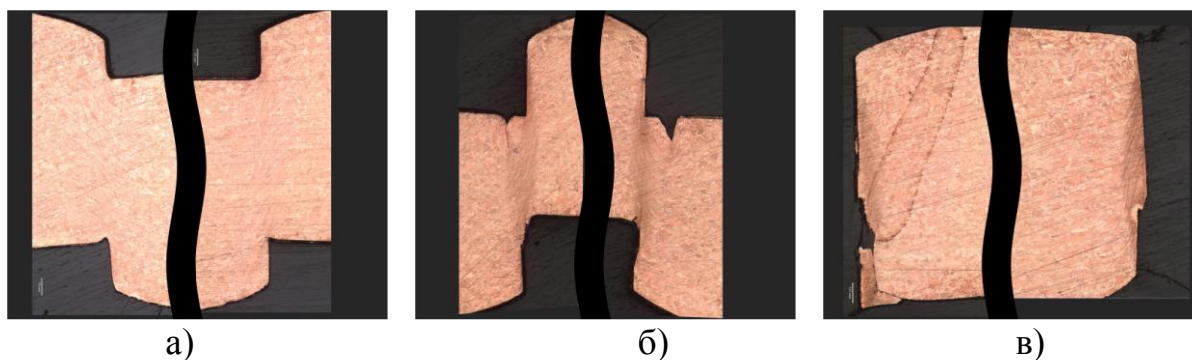
Произведенное моделирование и эксперименты подтверждают, что в процессе листовой штамповки появляются растягивающие напряжения.



а) прямое деформирование 10%, б) обратное деформирование 30%, в) окончательная вырубка
 Рисунок 4.6 - Недостаточное соотношение прямого и обратного деформирования на макрошлифе образцов из медного сплава М1 (30-и кратное увеличение)



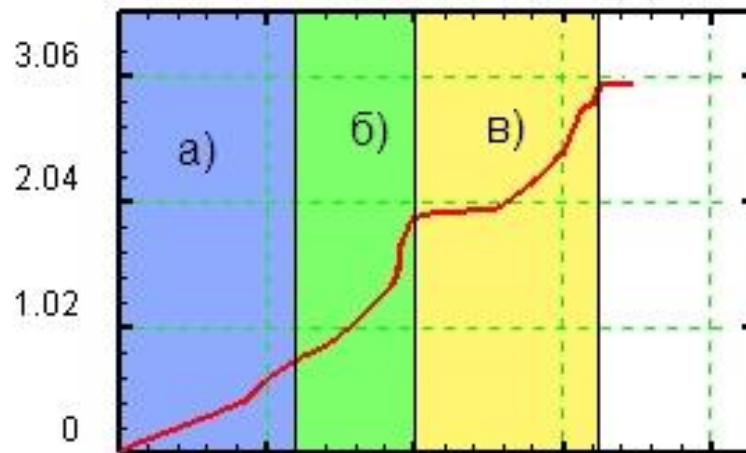
а) прямое деформирование 50%, б) обратное деформирование 50%, в) окончательная вырубка
 Рисунок 4.7 - Достаточное соотношение прямого и обратного деформирования на макрошлифе образцов из медного сплава М1 (30-и кратное увеличение)



а) прямое деформирование 50%, б) обратное деформирование 65%, в) окончательная вырубка
 Рисунок 4.8 - Избыточное соотношение прямого и обратного деформирования на макрошлифе образцов из медного сплава М1 (30-и кратное увеличение)

При наложении обратного деформирования растягивающие напряжения сменяются сжимающими, оси главных напряжений поворачиваются, появляются касательные напряжения и возникают зоны с растягивающими напряжениями. Это свидетельствует, что происходит снижение ресурса пластичности в зоне среза как при возникновении растягивающих, так и при возникновении сжимающих напряжений.

На Рисунке 4.9 представлено изменение накопленной деформации в зависимости от абсолютного перемещения деформируемой части заготовки из материала М1. В диапазоне а) происходит прямое деформирование, деформация материала равномерно накапливается. Затем в диапазоне б) происходит возвращение заготовки в исходное положение и обратное деформирование, в конце этого диапазона наблюдается скачек накопления деформации, что свидетельствует о повышении прочности материала образца. После чего, в диапазоне в) происходит возвращение заготовки в исходное положение и осуществляется окончательная вырубка. Представленная зависимость позволяет сделать вывод о том, что с увеличением числа и величины деформирований увеличивается прочность материала.



а)-прямое деформирование, б) обратное деформирование, в)-окончательная вырубка

Рисунок 4.9 - Зависимость накопленной деформации от абсолютного перемещения деформируемой части заготовки.

Суммарный эффект снижения пластичности в зоне среза при листовой штамповке снижает вероятность появления заусенцев по периметру среза.

Проведенные эксперименты позволили получить образец детали холоднолистовой штамповкой с полным отсутствием заусенцев, внешний вид которой представлен на рисунке 4.9.



Рисунок 4.9 –Внешний вид шайбы после обратной вырубki. Увеличение 7х.

Деталь соответствует техническим требованиям производства тонколистовых деталей, обладающих высокой точностью.

4.3 Подбор технологических материалов

Согласно, нашим рекомендациям использование обратной вырубki целесообразно для материалов, имеющих высокую степень пластичности. Подбор сталей осуществлялся по параметру относительного поперечного сужения ψ и представлен в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Перечень сталей

№п/п	Марка материала	Сортамент	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
1	35Г2	ГОСТ 4543-71 [104]	620	13	40
2	20Х	ГОСТ 4543-71 [104]	780	11	40
3	40Х	ГОСТ 4543-71 [104]	980	10	45
4	40ХН	ГОСТ 4543-71 [104]	980	11	45
5	15ХФ	ГОСТ 4543-71 [104]	740	13	50
6	ШХ15	ГОСТ 4543-71 [104]	590-730	20	45
7	30ХМА	ГОСТ 4543-71 [104]	930	12	50

Для цветных сплавов подбор осуществлялся по параметру относительного удлинения δ и представлен в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Перечень цветных сплавов

№п/п	Марка материала	Сортамент	σ_B , МПа	δ , %
1	Латунь Л68	ГОСТ 5362-78 [105]	290-340	50
2	Л63	ГОСТ 931-90 [106]	290-400	38
3	Л90	ГОСТ 931-90 [106]	230-340	36
4	ЛМц58-2	ГОСТ 931-90 [106]	380-470	30
5	ЛС59-1	ГОСТ 931-90 [106]	340-470	25
6	БрБ2	ГОСТ 1789-70 [107]	390-590	20-30
7	АМц	ГОСТ 13726-97 [108]	100	10
8	АД1	ГОСТ 13726-97 [108]	335	12
9	Д16	ГОСТ 13726-97 [108]	235	10

Для вырубki материалов с исходными свойствами, полученные в виде холоднокатаной полосы с низкими значениями относительного удлинения не целесообразно использовать реверсивную вырубку, поскольку их ресурс пластичности исчерпан. Вырубка таких материалов возможна и обычным

способом за одно нагружение. В качестве примера ряд таких материалов представлен в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Перечень материалов склонных к упрочнению

№п/п	Марка материала	Сортамент	$\sigma_{в}$, МПа	δ , %
1	Л90	Полоса холоднокатан. тверд., [106]	350	3
2	ЛМц58-2	Полоса холоднокатан. тверд., [106]	590	3
3	БрБ2	Полоса холоднокатан., тверд., [107]	590-930	2.5

В качестве материалов для экспериментов выбирались те материалы, которые представляют наибольший интерес для производства. Это изделия из цветных сплавов, при штамповке которых образуется недопустимая высота заусенцев, поэтому основные исследования и исследования зоны оптимизации проводились на образцах из стали 08кп, алюминиевого сплава АД1, медного сплава М1 и Л63.

4.4 Схема разделения материала при реверсивной вырубке

В ходе проведения экспериментов было установлено, что усилие необходимое для разделения металла при использовании обратной вырубке гораздо меньше, чем при использовании вырубке за один переход. Это объясняется тем, что максимальное усилие вырубке и пробивки возникает при определенной глубине внедрения пуансона в заготовку, а не в самом начале деформирования, когда ее толщина наибольшая.

Для определения усилия вырубке был проведен анализ сил действующих в зоне среза, представленный на рисунке 4.10.

Усилие необходимое для разделения заготовки, при использовании вырубке за один переход рассчитывается по формуле:

$$P = 0,83\sigma_{ср}Ls , \quad (4.9)$$

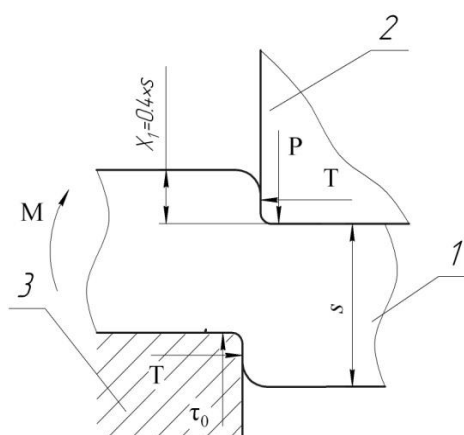
где $\sigma_{ср}$ – сопротивление срезу, для Стали 30 $\sigma_{ср} = 260$ МПа;

L – длинна отделяемого контура, $L = 50,24$ мм;

s – толщина отделяемого металла, $s = 1,5$ мм.

Подставив данные в формулу (4.9) получим значение усилия вырубki $P=0,83 \times 260 \times 50,24 \times 1,5=16262,7$ Н.

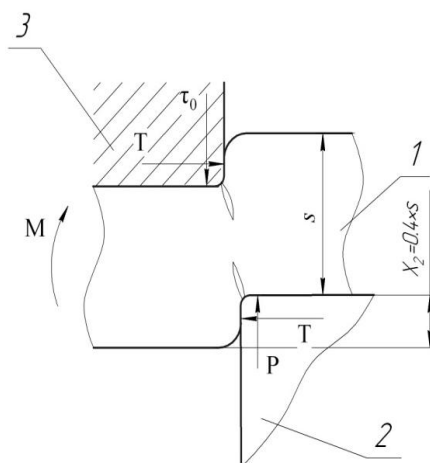
На рисунке 4.8 представлена схема разделения материала при прямом нагружении обратной вырубki, из которого видно, что усилие необходимое для такого нагружения будет меньше, так как вырубka осуществляется только на величину $0.4s$. Подставив в формулу (4.9) определенное значение толщины, получим: $P=0,83 \times 260 \times 50,24 \times 0,4 \times 1,5=6505$ Н.



1 - заготовка; 2 – режущая кромка пуансона; 3 – режущая кромка матрицы.

Рисунок 4.10 – Схема разделения материала при окончательной вырубке.

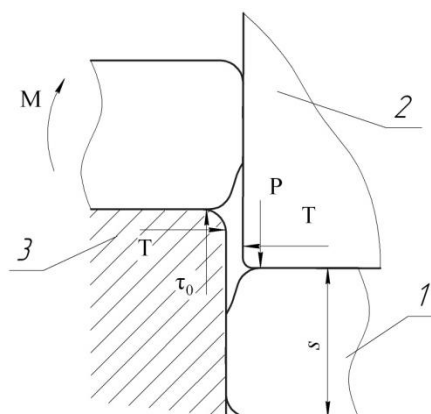
На рисунке 4.10 представлена схема разделения материала при обратном нагружении обратной вырубki, из которого видно, что усилие необходимое для нагружения будет увеличена на некоторую величину, так как вырубka осуществляется только на глубину $0.4s$. Подставив в формулу (4.9) определенное значение толщины, получим: $P=0,83 \times 260 \times 50,24 \times 0,4 \times 1,5= 6505$ Н.



1 - заготовка; 2 – режущая кромка пуансона; 3 – режущая кромка матрицы.

Рисунок 4.11 – Схема разделения материала при обратном нагружении.

На рисунке 4.12 представлена схема окончательного нагружения обратной вырубке. Усилие, необходимое для нагружения, будет рассчитываться для оставшейся толщины $0,2s$, поэтому оно будет значительно меньше усилия, необходимого для осуществления прямого нагружения.



1 - заготовка; 2 – режущая кромка пуансона; 3 – режущая кромка матрицы.

Рисунок 4.12 – Схема разделения материала при обратном нагружении.

Ив результате, исходя из выше представленных расчетов, применение знакопеременного нагружения, обеспечит снижение усилия необходимого для вырубке деталей из медного сплава М1 в 2.5 раза, что в определенной степени увеличит стойкость пуансона и матрицы штампа.

Выводы по главе.

1. Подтверждена адекватность разработанной математической модели.
2. В результате анализа каждого деформирования экспериментального образца, обоснована возможность получения деталей листовой штамповкой без заусенцев.
3. Произведен подбор материалов, для которых целесообразно применение реверсивной вырубки.
4. Установлено, что применение реверсивной вырубки, обеспечит снижение усилия необходимого для вырубки деталей из медного сплава М1 в 2.5 раза.

5 Разработка технологических рекомендаций и оборудования для реверсивной вырубки

5.1 Технологические параметры процесса реверсивной вырубки

Холодная листовая вырубка применяется практически на любом производстве. В связи с этим разработанная в главе 3 математическая модель образования заусенцев имеет большое практическое значение.

На основании результатов, полученных при проведении этой работы, можно выделить следующие рекомендации с целью оптимальной минимизации размеров заусенцев, образующихся на кромках вырубленного изделия при холодной вырубке из листового металла:

1. Использовать знакопеременное нагружение целесообразно для стальных сплавов, у которых величина относительного сужения ψ превышает 10%, и для сплавов цветных металлов, у которых величина относительного удлинения δ превышает 10%;

2. Использовать знакопеременное деформирование при вырубке с числом реверсов $n=2$, то есть осуществлять вырубку за три перехода; прямое деформирование, обратное деформирование, окончательная вырубка. Так как экспериментально установлено, что пластичность снижается при числе реверсов $n=2$, в дальнейшем происходит стабилизация технологического процесса деформирования и уменьшение пластичности значительно снижается.

3. Использовать скорость вырубки в диапазоне от 2,04 до 2,54 мм/с, так как именно в этом диапазоне, величина заусенцев образовавшихся при вырубке значительно снижается, а при дальнейшем увеличении скорости остается постоянным.

4. Определено, что для сплавов из цветных металлов оптимальное соотношение прямого и обратного деформирования – 50%/50%, а для стальных сплавов 40%/40%;

5.2 Разработка схемы работы серийного устройства реализующего новый технологический процесс обратной вырубки

Для внедрения представленных в разделе 5.1 рекомендаций в серийное производство было разработано и запатентовано «Устройство обратной вырубки» [109].

Изобретение относится к технологической оснастке для обработки листового металла и может быть использовано в машиностроении, приборостроении и других отраслях промышленности для чистовой вырубки деталей.

Задача изобретения – минимизация величины заусенцев, образующихся на кромках вырубленной детали, на основании оптимизации соотношения знакопеременного нагружения.

Эта задача достигается устройством, содержащим узлы относительного перемещения в виде двух согласованно вращающихся кулачков с двойными профилями, и обеспечивающих первичную и реверсивную деформацию заданной величины.

Устройство для обратной вырубки деталей отображенное на рисунке 5.1а), содержит верхний двойной кулачок, который имеет большой профиль с выступами 1 и 2, и малый профиль с выемкой 3. Большой профиль с выступами 1 и 2 контактирует с верхней пуансон-матрицей 4, которая вмонтирована в неподвижную матрицу 5, а малый профиль с выемкой 3 контактирует с верхним пуансоном 6. Заготовка 7 находится на подвижном прижиме 8. Нижний двойной кулачок, имеющий большой профиль с выступами 9 и 10, контактирует с нижней пуансон-матрицей 11 и малый профиль с выемкой 12, который контактирует с нижним пуансоном 13.

Устройство работает следующим образом. В начале цикла как показано на рисунке 4.1б) заготовку-ленту 7 подают в рабочую зону штампа специальным шаговым устройством (на рисунке не показано) и зажимают между неподвижной

матрицей 5 и подвижным прижимом 8. Прижим осуществляется с усилием P , которое подчиняется следующей зависимости:

$$P = L \cdot s \cdot g_{\text{прж}} \quad (5.1)$$

где L -периметр контура вырубki, мм;

s -толщина штампуемого материала, мм;

$g_{\text{прж}}$ – удельное усилие, Н/мм².

Усилие прижима достигают любым устройством, например клиновым (на рисунке не показано) и определяют по нормативам, например «Справочник конструктора штампов: Листовая штамповка / Под общ. ред. Л.И. Рудмана, - М.: Машиностроение, 1988 - 496 с.: ил.» с. 57.

Верхний и нижний кулачки синхронно вращаются и малым профилем перемещают пуансоны 6 и 13 в нижнюю точку, таким образом, происходит фиксация отхода (отверстие в вырубаемой шайбе).

На следующем шаге цикла, показанном на рисунке 5.1в) происходит прямое деформирование. Верхняя пуансон-матрица 4 попадает между выступами 2 и 1 большого профиля верхнего кулачка, в результате чего отводится вверх от заготовки (так как она подпружинена). После этого пуансон-матрица 11 попадает на выступ 9 и внедряется в заготовку 7 на рассчитанную величину прямого деформирования.

В очередном шаге цикла, отображенном на рисунке 5.1г) происходит обратное деформирование. Нижняя пуансон-матрица 11 попадает между выступами 9 и 10 большого профиля нижнего кулачка, в результате чего отводится вниз от заготовки. После этого верхняя пуансон-матрица 4 попадает на выступ 1 большого профиля верхнего кулачка и внедряется в заготовку в противоположном направлении на рассчитанную величину.

Затем происходит окончательная вырубка, изображенная на рисунке 5.1д). Верхняя пуансон-матрица 4 попадает между выступами 1 и 2 большого профиля верхнего кулачка, после чего отводится вверх от заготовки. Затем нижняя

пуансон-матрица 11 попадает на выступ 10 большого профиля нижнего кулачка и внедряется в заготовку на величину a , подчиняющуюся следующей зависимости:

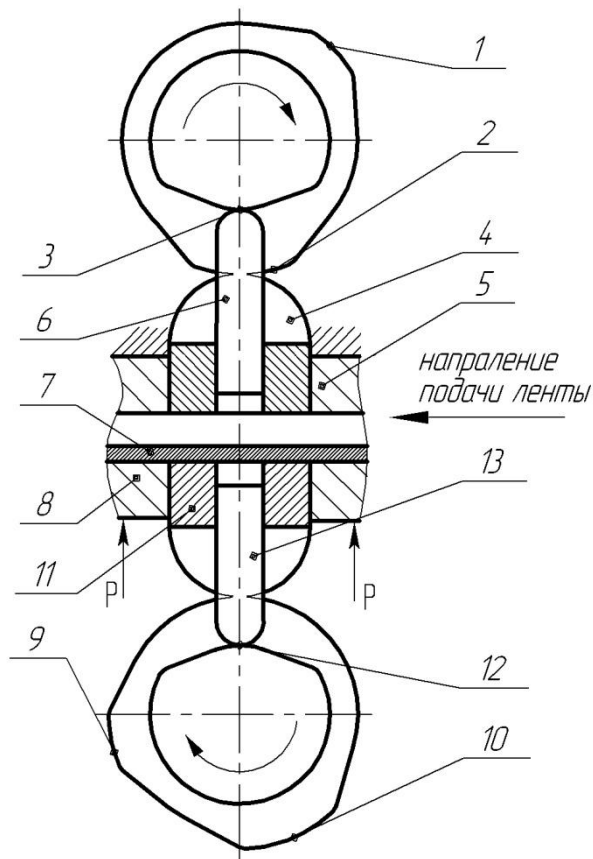
$$a > s + (0.01-0.05) \text{ мм} \quad (5.2)$$

где a – величина внедрения пуансона, мм,

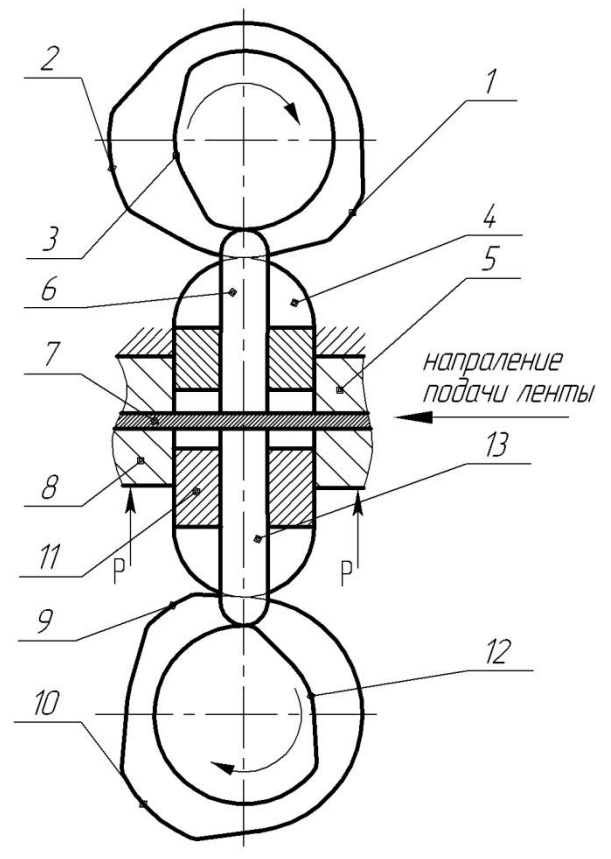
s – толщина заготовки, мм.

Последний шаг цикла показан на рисунке 5.1е). Здесь происходит выталкивание заготовки из матрицы. Верхний пуансон 6 попадает во впадину 3 на малом профиле верхнего пуансона, в результате чего отводится вверх от заготовки. В это же время нижний пуансон 13 попадает во впадину 12 малого профиля нижнего пуансона и отводится вниз от заготовки. Отход освобождается и выдувается воздухом из рабочей зоны устройства. В это же время заготовка-лента 7 разжимается путем отвода подвижного прижима 8. Затем верхний пуансон-матрица 4 попадает на выступ 2 большого профиля верхнего кулачка и выталкивает готовую деталь из матрицы 5, после чего она выдувается из рабочей зоны устройства. После этого шаговое устройство подает ленту 7 на величину шага и цикл повторяется.

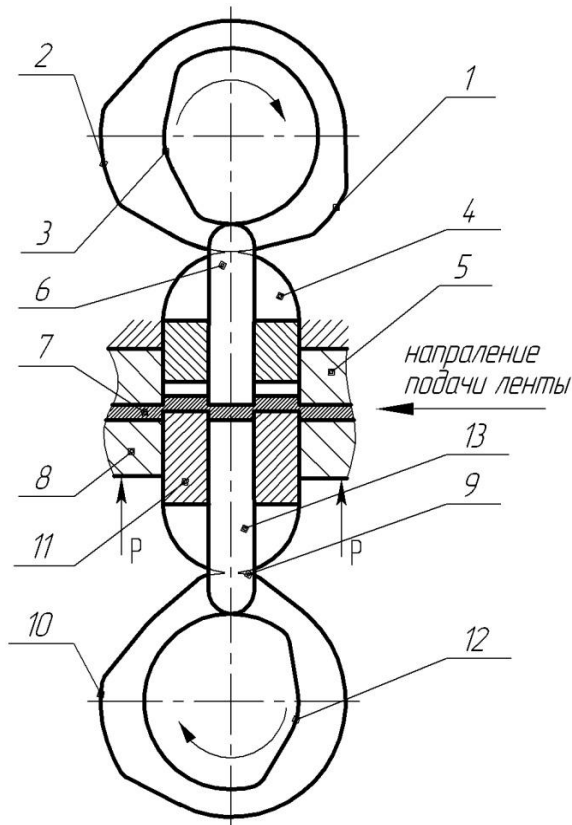
Ранее Донцовым В.И был запатентован штамп для чистовой обратной вырубki деталей и пробивки в них отверстий [110], содержащий узел относительного перемещения в виде подпружиненных ползушек, взаимодействующих с ними клиньев и упругих элементов. Однако он имеет сложную для изготовления и обслуживания конструкцию.



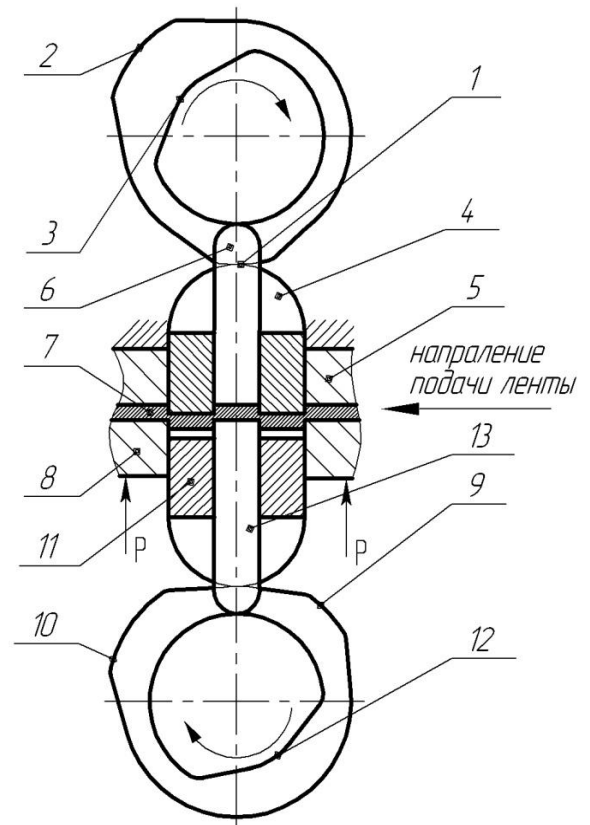
а)



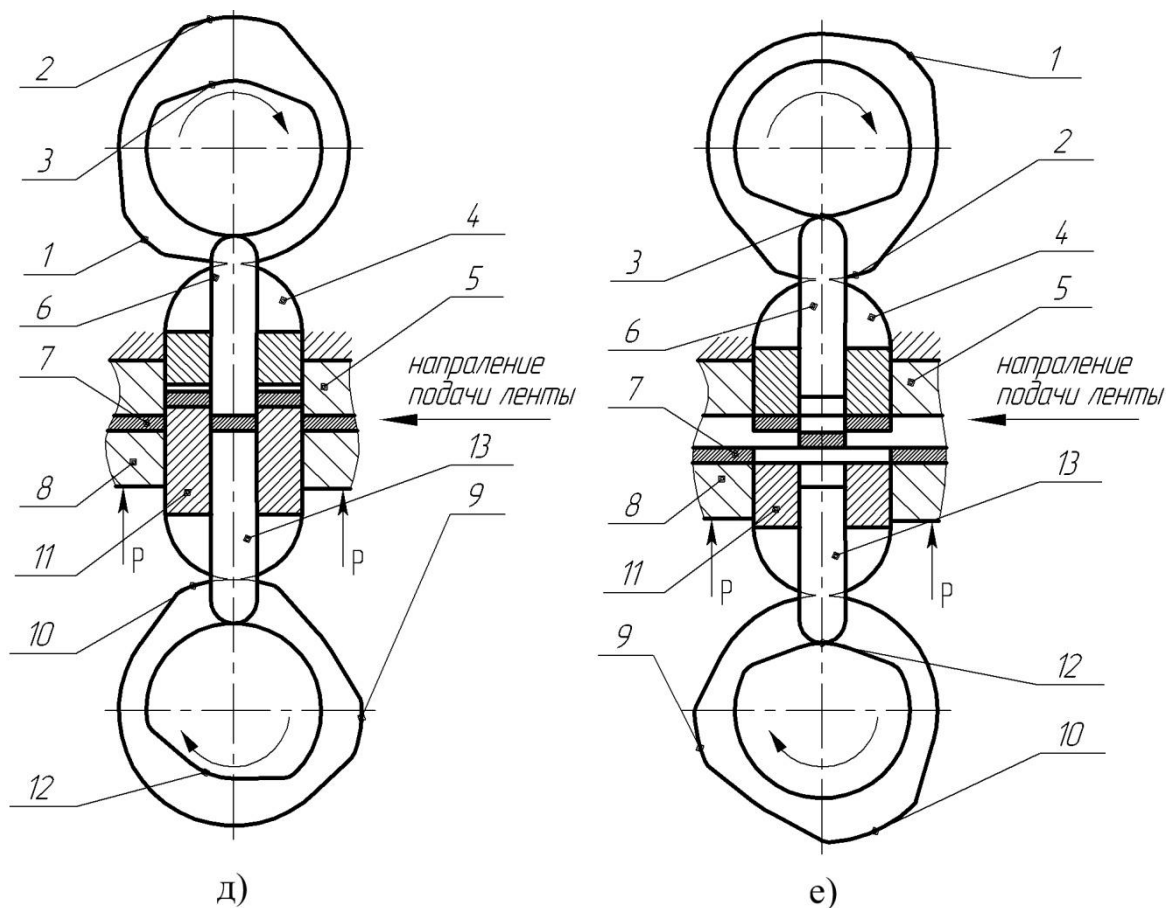
б)



в)



г)



- а) подача заготовки - ленты; б) закрепление заготовки-ленты; в) первичная деформация;
 г) реверсивная деформация; д) окончательная вырубка;
 е) сьем детали.

Рисунок 5.1 – пошаговая схема обратной листовой вырубке

Запатентованное нами устройство для обратной вырубке деталей из листового материала, содержащее штамповочные инструменты в виде пуансонов и пуансон-матриц, синхронно вращающиеся многопрофильные кулачки, предающие движение штамповочным инструментам, отличается тем, что с целью получения деталей с минимальной величиной заусенцев и снижения усилия вырубке, профиль синхронно вращающихся кулачков, за один оборот, обеспечивает знакопеременную деформацию за три шага нагружения. Все элементы устройства расположены в доступном и удобном для обслуживания месте.

5.3 Проектирование серийной оснастки, реализующей новый технологический процесс обратной вырубki

С целью реализации представленного в разделе 5.2 патента на изобретение, согласно техническому заданию ЗАО СОАТЭ, было выполнено моделирование инструментальной оснастки для вырубki шайбы толщиной 1.5 мм, с наружным Ø15 и внутренним Ø6.3 мм из полосы медного сплава М1, результат которого показан на рисунке 5.2.

А также разработана конструкторская документация для изготовления инструментальной оснастки, которая представлена в приложении 4.

Технологические требования к проектируемой оснастке, которые были выполнены:

1. Установочные размеры инструментальной оснастки были выполнены таким образом, чтобы осуществить ее монтаж на стол, применяемого на многих машиностроительных предприятиях (например, на ЗАО СОАТЭ), многоползункового пресса автомата модели МАГ 05;

2. Механизмы инструментальной оснастки спроектированы так чтобы работа по обратной вырубке деталей осуществлялась в автоматическом режиме;

3. Многопрофильные кулачки рассчитаны и изготовлены так чтобы было обеспечено прямое и обратное деформирование в 40% от толщины вырубаемой детали, согласно рекомендациям, представленным в пункте 5.1.

На спроектированную оснастку был получен патент на полезную модель «Устройство обратной вырубki листовых деталей» [111].

На рисунке 5.3 представлена спроектированная и запатентованная инструментальная оснастка.

Инструментальная оснастка (рисунок 5.3 а) содержит верхний двойной кулачок 1, который имеет большой профиль с выступами 2 и 3 и малый профиль с выемкой 4. Большой профиль с выступами 2 и 3 через ролик 5 и ползун 6 в направляющей 7 контактирует с верхней пуансон-матрицей 8, которая скользит в неподвижной вставке 9, а малый профиль с выемкой 4 через ролик 10 и ползун 11

контактирует с верхним пуансоном 12. Заготовка-лента 13 находится на подвижном прижиме 14. Нижний двойной кулачок 15 имеет большой профиль с выступами 16 и 17, который через ролик 18 и ползун 19 в направляющей 20 контактирует с нижней пуансон-матрицей 21, и малый профиль с выемкой 22, который через ролик 23 и ползун 24 контактирует с нижним пуансоном 25. Обратный ход ползунов 6 и 11 обеспечивается парными пружинами 26 и 27, а ползунов 19 и 24 соответственно парными пружинами 28 и 29.

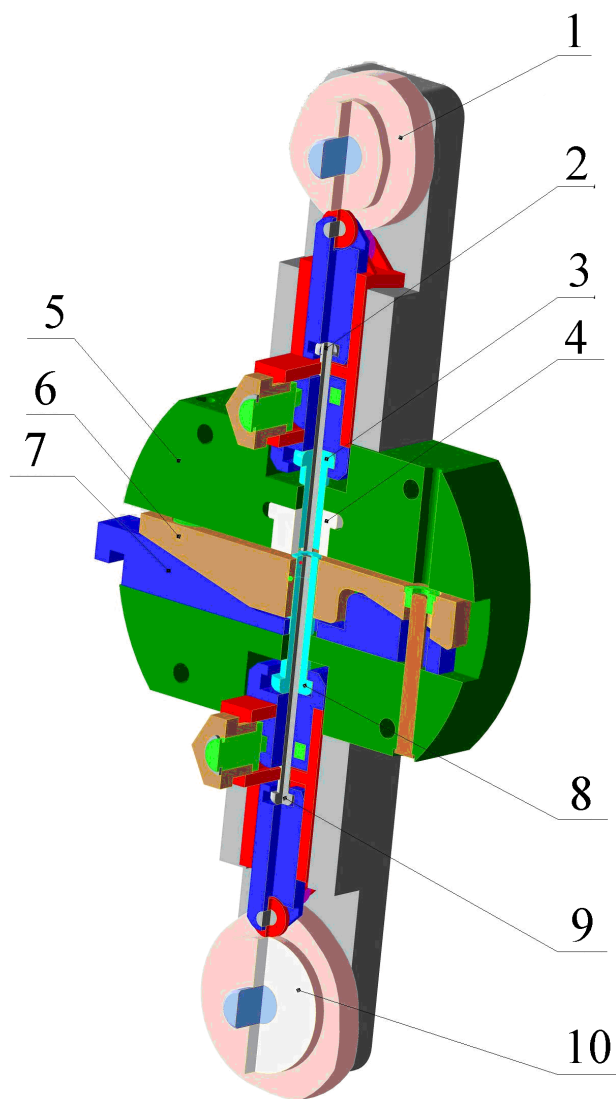
В конструкции многоползункового прессы, на который монтируется инструментальная оснастка, имеется зубчатое колесо 30, отображенное на рисунке 5.3 б), которое посредством зубчатого зацепления с меньшими колесами 31 и 32, одновременно передает вращение верхнему 1 и нижнему 15 кулачкам с двойным профилем.

Инструментальная оснастка работает следующим образом. В начале цикла заготовку-ленту 13 подают в рабочую зону штампа специальным шаговым устройством (не показано) и зажимают между неподвижной вставкой 9 и подвижным прижимом 14.

Верхний 1 и нижний 15 кулачки синхронно вращаются и малым профилем 4 и 22 соответственно перемещают пуансон 12 в нижнюю точку, а пуансон 25 в верхнюю точку, таким образом, происходит фиксация отхода (отверстие в вырубленной шайбе).

На следующем шаге цикла происходит первичная деформация. Верхняя пуансон-матрица 8 попадает между выступами 2 и 3 большого профиля верхнего кулачка, в результате чего отводится вверх от заготовки при помощи парных пружин 26. После этого пуансон-матрица 21 попадает на выступ 16 и внедряется в заготовку 13 на рассчитанную величину прямой деформации.

На очередном шаге цикла происходит реверсивная деформация. Нижняя пуансон-матрица 21 попадает между выступами 16 и 17 большого профиля нижнего кулачка, в результате чего отводится вниз от заготовки при помощи парных пружин 28.



1-верхний кулачек с двойным профилем, 2-верхний пуансон, 3-верхняя пуансон-матрица, 4-вставка-матрица, 5-основание, 6-матрица прижимная, 7-прижим, 8-нижняя пуансон-матрица, 9-нижний пуансон, 10-нижний кулачек с двойным профилем.

Рисунок 5.2 - Общий вид инструментальной оснастки для многоползункового автоматического прессы МАГ-05.

После этого верхняя пуансон-матрица 8 попадает на выступ 2 большого профиля верхнего кулачка и внедряется в заготовку в противоположном направлении на рассчитанную величину.

Затем происходит окончательная вырубка. Верхняя пуансон-матрица 8 попадает между выступами 2 и 3 большого профиля верхнего кулачка, после чего отводится вверх от заготовки при помощи парных пружин 26. Затем нижняя пуансон-матрица 21 попадает на выступ 17 большого профиля нижнего кулачка и

внедряется в заготовку, совершая перемещение достаточное для полной вырубki заготовки.

В конце цикла происходит выталкивание заготовки из матрицы. Верхний пуансон 12 попадает во впадину 4 на малом профиле верхнего пуансона, в результате чего при помощи парных пружин 27 отводится вверх от заготовки. В это же время нижний пуансон 25 попадает во впадину 22 малого профиля нижнего пуансона и отводится вниз от заготовки при помощи парных пружин 29. Отход освобождается и выдувается воздухом из рабочей зоны устройства. В это же время заготовка-лента 13 разжимается путем отвода подвижного прижима 14. Затем верхняя пуансон-матрица 8 попадает на выступ 3 большого профиля верхнего кулачка и выталкивает готовую деталь из вставки 9, после чего она выдувается из рабочей зоны устройства. После этого шаговое устройство подает заготовку - ленту 13 на величину шага и цикл повторяется.

Такая оснастка устанавливается на стол уже имеющегося в производстве пресса (Рисунок 5.3, а) и не требует приобретения дорогостоящего оборудования для реверсивной вырубki. В конструкции пресса (Рисунок 5.3, б) имеется зубчатая передача, которая обеспечивает синхронное вращение всех кулачков, что позволяет реализовать рассчитанную программу деформирования.



а) вид спереди



б) вид сзади

Рисунок 5.3 Многоползунковый пресс-автомат МАГ

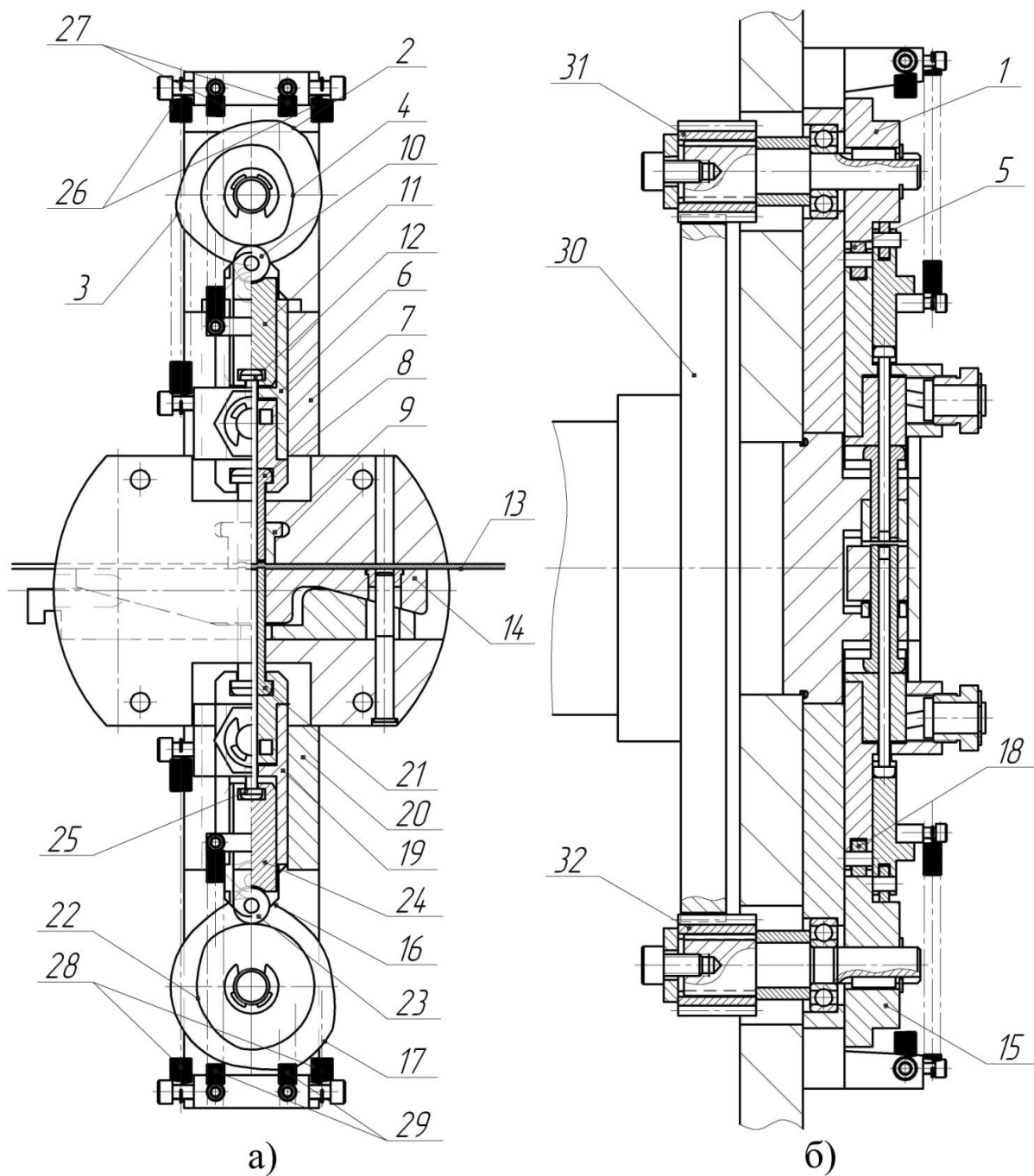


Рисунок 5.4 – инструментальная оснастка для многоползункового пресса МАГ 05

Применение инструментальной оснастки в серийном производстве характеризуется автоматическим циклом работы, высоким качеством изготовленных деталей без дополнительной механической обработки и снижением усилия вырубки в несколько раз, что обеспечит более высокую

стойкость рабочих частей оснастки в сравнении с оснасткой обеспечивающей вырубку деталей за одно деформирование.

Выводы по главе

1. Даны рекомендации по выбору параметров формоизменения при реверсивной вырубке деталей из листового проката: принцип определения целесообразности использования реверсивной вырубки; использовать реверсивную вырубку за три перехода; назначать скорость вырубки в диапазоне от 2,04 до 2,54 мм/с; выбирать необходимые значения прямого и обратного деформирования в зависимости от материала заготовки.

2. Разработано и запатентовано устройство, позволяющее осуществить реверсивную вырубку при оптимальном числе реверсов n и получить листовые изделия с минимальными заусенцами с учётом экономического фактора.

3. Спроектирована и запатентована инструментальная оснастка, предназначенная для реализации процесса реверсивной вырубки в условиях серийного производства.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Установлены режимы реверсивной вырубки, обеспечивающие получение деталей из листового проката без заусенцев:

- скорость деформирования в диапазоне от 2,04 до 2,54 мм/с.;
- прямое деформирование в диапазоне от 30 до 50% от толщины заготовки;
- обратное деформирование от 40 до 50% от толщины заготовки;
- количество деформирований до окончательной вырубки $n=2$.

2. Разработан и изготовлен испытательный стенд, позволяющий изменять такие режимы тонколистовой реверсивной вырубки как скорость деформирования, количество деформирований до окончательной вырубки, величины прямого и обратного деформирования.

3. По результатам полного факторного эксперимента разработана математическая модель процесса реверсивной вырубки, описываемая уравнением регрессии в виде полинома первой степени, позволяющая установить параметры технологического процесса, обеспечивающие получение изделий из сталей и сплавов цветных металлов без заусенцев.

4. Разработаны практические рекомендации определения режимов реверсивной вырубки:

- при относительном удлинении δ от 27% и выше, применима величина прямого и обратного деформирования равная 50% от толщины заготовки;
- при относительном удлинении δ до 26%, применима величина прямого и обратного деформирования равная 40% от толщины заготовки.

5. Разработано и запатентовано устройство для реверсивной вырубки листовых деталей, которое обеспечивает внедрение процесса реверсивной вырубки в производство посредством установки его на пресс МАГ 05. Запатентованное устройство обеспечивает: изменение скорости деформирования в диапазоне от 2,04 до 2,54 мм/с; изменение величины прямого и обратного деформирования в диапазоне от 30 до 50%, за счет моделирования профиля кулачка.

6. Разработанный процесс реверсивной вырубки был апробирован в производственных условиях ЗАО «СОАТЭ» и рекомендован к внедрению (справка об одобрении от 31.07.2013 №02/8220).

7. Результаты диссертационного исследования используются при чтении лекций и проведении практических занятий по дисциплинам «Математическое моделирование в машиностроении» и «Организация и планирование эксперимента» (справка о внедрении результатов научных исследований в учебный процесс).

Библиографический список

1. Dornfeld D. Intelligent Deburring of Precision Components / D. Dornfeld, - 3 rd International Conference on Precision Surface Finishing and Burr Technology, 1994,-p. 25-38.
2. Кодзава Т. Способы удаления заусенцев, образующихся при вырубке при штамповке (прессовании) / Т. Кодзава; ТПП СССР. №115. - Краснодарское отделение. - №115. - 40с., фотокоп.ориг. Пурэсу гидзюцу, 1978. - т.16. - №13. - с.85-89.
3. Аверкиев А.Ю. Технология холодной штамповки / А.Ю. Аверкиев, Ю.А. Аверкиев - Л.: Машиностроение, 1989. - 304 с.
4. Беклемищев Н.Н. Исследование процесса высокоскоростной вырубki листовых деталей. Механические взаимодействия в сильных магнитных полях / Н.Н. Беклемищев, В.В. Грибков, Э.Н. Понамарев и др. - Л.: Машиностроение, 1974.- с. 82-86.
5. Бобров В.Ф. Развитие науки о резании металлов / В.Ф.Бобров, Г.И. Грановский, Н.Н. Зорев, и др. - М.: Машиностроение, 1967. - 416 с.
6. Брикс А.А. Резание металлов / А.А. Брикс - Санкт-Петербург, 1986 г.
7. Вдовин С.И. Исследование очага пластической деформации при вырубке листового материала / С.И. Вдовин, Н.А. Акастелов; изв. вузов: Машиностроение, 1989. - №8. - с. 90-92.
8. Торопов А.А. Прогнозирование и минимизация заусенцев при обработке резанием моделированием процессов их образования: дис. канд. технич. наук / А.А. Торопов; СПб.гос.техн.ун-т - СПб, 1999 г.
9. Попов Е.А. Технология и автоматизация листовой штамповки: учебник для вузов / Е.А. Попов, В.Г. Ковалев, И.Н. Шубин. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. - 480 е., ил.
10. STD-01.WBTC. 1996, draft.- Deburring Technology International, Inc., Kansas City, MO.

11. Таказава К. Удаление заусенцев с изделий / К. Таказава - Кикай-нокэнкю, 1977. - т.29. - №12. Т. - с.1481-1465.
12. Galinowski Y. Стандартизация высоты заусенцев на деталях, изготавливаемых путём вырубки / Y. Galinowski - Normalizacja, 1978. - v.46. - №1. - p.14-19.
13. Гордон М.Б. Исследование трения и смазки при резании металлов: сб. Трение и смазка при резании металлов / М.Б. Гордон - Чебоксары: Изд-во ЧГУ, 1992. - 165 с.
14. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. - Учебник для вузов. М.: Металлургия, 1986. - 688 с.
15. Колмогоров В.Л. Напряжение, деформация, разрушение. В.Л. Колмогоров. - М.: Металлургия, 1970. - 229 с.
16. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания / А.Д. Макаров - М.: Машиностроение, 1976. -278 с.
17. Попов Е.А. Основы листовой штамповки / Е.А. Попов. - М.: Машиностроение, 1977. - 278 с.
18. Розенберг А.М. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания / А.М. Розенберг, О.А. Розенберг - Киев: Наук.. Думка, 1990. - 320 с.
19. Сато Масанобу. Образование заусенцев при точении \ Сато Масанобу, Хигасимура Йосихиро, Такано Кэнсукэ. Сэймицу кикай, 1979. - т. 45. - №8. - с. 932-937.
20. Северденко В.П. Листовая штамповка с ультразвуком / В.П. Северденко, В.С. Пашенко, Б.С. Кособуцкий. - Минск, «Наука и техника», 1975. - 192 с.
21. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: Справочник / Под общей ред. С.Г. Энтелиса, Э.М.Берлинера. - 2-е изд., перераб. и доп. М.-Машиностроение, 1995 - 496 с.: ил.
22. Дальский А.М. Технология конструкционных материалов: учебник для вузов. А.М. Дальский - М.: «Машиностроение», 1977. - 664 с.

23. Листовая штамповка: Справочник конструктора штампов / под общ. ред. Л.И. Рудмана, - М.: Машиностроение, 1988 - 496 е.: ил.
24. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке / В.П. Романовский. - Д.: Машиностроение, 1979. - 520 с.
25. Коидэ С. Меры по обеспечению штамповки без послеоперационной обработки: Технология удаления заусенцев / С. Коидэ; ВЦП. №В - 46557. Пурэсу гидзюцу, 1979. - т.17. - №6. - с.33-38.
26. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов / С.И. Губкин - т. 2. «Металлургиздат», 1961.
27. Аоки Исаму. Способы чистовой вырубki / Аоки Исаму - Пурэсу гидзюцу: Press Work, 1986. - 24. - №5. - с. 1820.
28. Чистяков А.В. Теоретические основы операций вырубki-пробивки: дис. ... канд. технич. наук / А.В. Чистяков; ТулГУ - Тула, 2001 г.
29. Bauschinger J. Mittheilungen aus dem mechanisch technischen Laboratorium der Technischen Hochschule in Munchen / J. Bauschinger — 1886, 1887. — Н. XV.
30. Т. А. Лебедев, Т. К. Маринец, А. И. Ефремов, И. Е. Колосов, В. А. Жуков / «Кинетика разрушения металлов при циклических нагрузках» // Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР ленинградский ордена Ленина политехнический институт имени М. И. Калинина - машиностроение труды ЛПИ № 282 издательство «Машиностроение» Ленинград 1967.
31. Ратнер С.И. Изменение пределов пропорциональности и текучести при повторном нагружении / С.И. Ратнер, Ю.С. Данилов. - «Заводская лаборатория», 1950, №4.
32. Хван Д.В., Бочаров В.Б. Исследование эффекта Баушингера при линейном напряженном состоянии.// Проблемы прочности. 1989. №7 - с. 112-114.
33. Талыпов Г.Б Исследование эффекта Баушингера // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. 1964. №6. С. 131-137.

34. Кроха В. А. Влияние предварительного наклепа на истинное сопротивление деформированию при холодной объемной штамповке. - Кузнечно-штамповочное производство, 1960. №11, с. 27-30.
35. Басалаев Э.П. Новые подходы к проектированию технологических процессов холодной штамповки //Кузнечно-штамповочное производство. 1995. №6. с. 17-19.
36. Васильев Д.М. О природе эффекта Баушингера // Некоторые проблемы прочности твердого тела. М. 1959. С. 37-48.
37. Дель Г.Д. Технологическая механика. М.: Машиностроение, 1978. 180 с.
38. Колмогоров Г.Л. Гидродинамическая смазка при обработке металлов давлением / Г.Л. Колмогоров - М.: Металлургия», 1986. - 168 с.
39. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. - М.: Машиностроение, 1968. -480 с.
40. Справочник конструктора штампов: Листовая штамповка / Под общ. ред. Л.И. Рудмана, - М.: Машиностроение, 1988 - 496 с.
41. Малинин Н.Н. Технологические задачи теории пластичности и ползучести / Н.Н. Малинин - М.: Высшая школа, 1979. - 119 с.
42. Михаленко Ф.П. Стойкость разделительных штампов / Ф.П. Михаленко - М.: Машиностроение, 1986. - 224 с.
43. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В.А.Огородников, - Киев.: Высшая школа, 1983. - 176 с.
44. Розенберг А.М. Расчет сил при резании пластичных металлов. Сверхтвердые материалы / А.М. Розенберг, О.А. Розенберг, 1987. - №4. - с. 48-54.
45. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. Теория пластичности / Г.Я. Гун - М.: Металлургия, 1980. - 456 с.
46. Пат. 2060078 Российская Федерация, МПК⁶ В 21 В 28/16. Способ вырубки и зачистки / Матеев М.М.; заявитель и патентообладатель. № 93040434/08; заявл. 10.08.93; опубл. 20.05.96, Бюл. № 14.

47. Пат. 1171154 Союз Советских Социалистических республик, МПК⁶ В 21 D 28/14. Способ обратной вырубki и штамп для его осуществления / Полещук Д.Д.; заявитель и патентообладатель.
48. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды / А.А. Ильюшин - М.: Изд-во МГУ, 1978. - 287с.
49. Качанов Л.М. Основы теории пластичности / Л.М. Качанов. - М.: Высш. школа, 1969.-420 с.
50. Клушин М.И. Резание металлов / М.И. Клушин. - М.: Машгиз, 1958. - 543 с.
51. Пат. 716675 Союз Советских Социалистических республик, МПК⁶ В 21 D 28/14. Штамп для чистовой обратной вырубki деталей и пробивки в них отверстий / Донцов В.И., Рыскин Н.Н.; заявитель и патентообладатель. № 2516593/25-27; заявл. 08.08.77; опубл. 28.02.80, Бюл. № 7.
52. Гун Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением / Г.Я. Гун - М.: Металлургия, 1983. - 352 с.
53. Vibrationsgleitschleifen beim Entgraten von Mahfingern /Нем. ст., 1982, - с. 481-484.
54. Тимощенко В.А. Нарастание деформации и разрушение заготовки при разрядке / В.А. Тимощенко - Машиностроение: Изв. вузов, 1989.- №8 - с. 87-90.
55. Попов Е.А. Разрезка трубы двухосным сдвигом / Е.А. Попов, Д.А. Жакенов - Машиностроение: Изв. вузов, 1988. - №2.- с. 124-128.
56. Гнучий Ю.Б. Методика численного моделирования процесса вырубki-пробивки листового материала / Ю.Б. Гнучий, В.М. Смирягин. - Киев: Вестник киевского политехнического института, 1985. - вып. 22.- с. 9-15.
57. Гнучий Ю.Б. Анализ результатов численного моделирования' процесса вырубki-пробивки / Ю.Б. Гнучий, В.М. Смирягин. - Киев: Вестник киевского политехнического института, 1986. - вып. 23.- с. 17 - 22.
58. Rao R.S. An upper-bound solution for tube cropping / R.S. Rao, P.K. Wright. - Trans Asme J.ENG., IND, 1985. - 107. - №4. - с. 365 - 371.

59. Жакенов Д.А. Экспериментальное определение показателей качества заготовок при разрезке труб в штампах / Д.А. Жакенов. - Машиностроение: Изв. вузов, 1990. - №2.- с. 109-113.
60. Вдовин С.И. Исследование очага пластической деформации при вырубке листового материала / С.И. Вдовин, Н.А. Акастелов. - Машиностроение: Изв. вузов, 1989. - №8. - с. 90 - 92.
61. Холин Н.Н. Неоднородность поля деформаций при вырубке-пробивке / Н.Н. Холин, Т.З. Османов. - М.: Автоматизация и моделирование в производстве приборов, 1989.- с.3 - 8.
62. Головащенко С.Ф. Математическое моделирование процессов разрушения заготовок при выполнении разделительных операций импульсной штамповки / С.Ф. Головащенко, А.Г. Овчинников. - Вестник машиностроения, 1995. - №4. - с.25 - 29.
63. Popat P.B. Finite-element analysis of the blanking process / P.B. Popat, N.N. Kishore Journal mesh. Work technol, 1989. - 18. - №3. - p. 269 - 282.
64. Brokken D. Numerical modeling of the metal blanking process / D. Brokken, W.A.M. Brekelmans, F.P.T. Baaijens / Journal of materials processing technology, 1998.-№83.-p. 192- 199.
65. Щеглов Б.А. Теоретические расчёты инженерного расчёта динамических осесимметричных процессов пластического формоизменения тонколистовых металлов: дис. ...д-ра. техн. наук/Б.А. Щеглов.- Москва, 1978. - 389с.
66. Щеглов Б.А. Определение критических скоростей удара применительно к импульсным процессам вырубки / Б.А. Щеглов, Б.Ф. Власов. - Кузнечно- штамповочное производство, 1973. - №2. - с.1 - 4.
67. Грушевский А.В. Определение динамического предела текучести листовых материалов по данным испытания полосы на поперечный удар / А.В. Грушевский, Б.А. Щеглов, Т.А. Верина. - Машиноведение, 1967. - №3. - с. 96- 103.

68. Щеглов Б.А. Пластическая деформация гибкой полосы под действием силы энергии / Б.А. Щеглов. - М.: Исследование пластического течения металлов, 1970. - с. 49 - 66.
69. Гребёнкин Н.Б. Исследование электрогидроимпульсной вырезки, пробивки круглых деталей и отверстий: дис. ...канд.техн.наук / Н.Б. Гребёнкин. - Ленинград, 1978. - 249 с.
70. Пухов А.К. Разработка, исследование и внедрение технологического процесса электрогидроимпульсной пробивки, вырубки деталей из плоских заготовок: автореф. дис. ...канд. техн. наук / А.К. Пухов. - Ленинград, 1984. - 16 с.
71. Мамутов В.С. Исследование вырубки и разрушения тонколистовых материалов давлением импульсного магнитного поля с применением передающей среды: автореф. дис. ...канд.техн.наук / В.С. Мамутов. - Ленинград, 1976. - 16 с.
72. Шапошников И.А. Вырубка-пробивка тонколистовых материалов на электроимпульсных установках с применением эластичных сред: автореф.дис. канд.техн.наук / И.А. Шапошников. - Ленинград, 1986.-16 с.
73. Шелестеев А.М. Разработка, исследование и внедрение технологического процесса электрогидроимпульсной отбортовкиотверстий на деталях из плоских заготовок: автореф.дис. ...канд.техн.наук / А.М. Шелестеев. - Ленинград, 1983. - 12 с.
74. Журавский А.Ю. Исследование процесса пробивки отверстия жидкостью высокого давления, создаваемого электрическим разрядом: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.Ю. Журавский. - Минск, 1981. - 20 с.
75. Лимберг Э.А. Исследование процесса вырубки тонколистовых заготовок ударом эластичной среды / Э.А. Лимберг, М.М. Новаковская, И.М. Лысенко и др. - Харьков: Обработка металлов давлением в машиностроении, 1990.- Вып.26. - с. 55 - 58.
76. Богоявленский К.Н. Магнитно-импульсная штамповка с применением промежуточных эластичных сред / К.Н. Богоявленский, В.Б. Гиндин, В.С. Мамутов и др. - Л.: ЛДНТП, 1982. - 32 с.

77. Богоявленский К.Н. Гидропластическая обработка материалов / К.Н. Богоявленский, В.А. Вагин, А.Н. Кобышев и др. - М.: Машиностроение, 1988.-256 с.
78. Зайцев К.И. Исследование взрывной пробивки отверстий: дис. ... канд. техн. наук / К.И. Зайцев. - Харьков, 1962. - 190 с.
79. Беклемищев Н.Н. Исследование процесса высокоскоростной вырубки листовых деталей / Н.Н. Беклемищев, В.В. Грибков, Э.Н. Пономарёв и др., Л.: Механические взаимодействия в сильных магнитных полях, 1974. - с. 82 - 86.
80. Пономарёв Э.Н. Исследование высокоскоростной штамповки-вырубки тонколистовых деталей эластичной средой: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Э.Н. Пономарёв. - Москва, 1973. - 19 с.
81. Грибков В.В. Исследование динамического процесса вырубки конструкционных элементов летательных аппаратов из тонких листов энергией импульсного магнитного поля: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.В. Грибков. - Москва, 1976. - 13 с.
82. Электроимпульсная обработка материалов в машиностроении / под ред. В.Н. Чачина, К.Н. Богоявленского, В.А. Вагина и др. - Минск: Наука и техника, 1987.-231 с.
83. Степанский Л.Г. Прогнозирование надёжности деформирующего инструмента: учебное пособие / Л.Г. Степанский - М.: МГТУ «Станкин», 1995.-99 с., ил.
84. Феофанова А.Е. Повышение интенсивности и надёжности формоизменяющих операций листовой штамповки: дис. ... д-ра.техн.наук / Е. Феофанова - Москва, 2004. - 289 с.
85. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / Р. Галлагер; Перевод с английского В.М. Картвелишвили. - М.: «Мир», 1984. - 430 с.
86. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. Л. Сегерлинд - М.: Мир, 1979.-392 с.
87. Головащенко С.Ф. Математическое моделирование процессов динамического деформирования труб в канавки с частичным разделением на

кромках / С.Ф. Головащенко. - М.: Машиностроение; Изв.вузов, 1990. - №3. - с. 109-114.

88. Третьяков А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением / А.В.Третьяков, В.И. Зюзин - М.: Metallургия, 1973. - 224 с.

89. Унксов Е.П. Теория пластической деформации металлов / Е.П. Унксов, У. Джонсон, В.Л. Колмогоров и др.; под ред. Е.П. Унксова, А.Г.Овчинникова. М.: Машиностроение, 1983. - 598 с.

90. Физические основы процесса резания металлов / Коллектив авторов; под ред. проф. В.А. Остафьева. - Киев: Высшая школа, 1976. - 136 с.

91. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов / Я.Б. Фридман. - 2-е изд. М.: Машиностроение, 1952.

92. Холин Н.Н. Неоднородность поля деформаций при вырубке - пробивке / Н.Н. Холин, Т.З. Османов.

93. Рудман Л.И. Справочник конструктора штампов / Л.И. Рудман - М.: Машиностроение; Листовая штамповка, 1988 -496 с.: ил.

94. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов / А.Д. Томленов - М.: Машиностроение, 1972. - 408 с.

95. Кабалдин Ю.Г. Жестко-пластическая модель процесса резания металлов / Ю.Г. Кабалдин, А.И. Хромов, Ю.Г. Егорова. - Вестник машиностроения, 1998.-№2.-с. 9-11.

96. Соколовский В.В. Теория пластичности / В.В.Соколовский - М.: Высш. шк., 1969.-608 с.

97. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н.В. Талантов - М.: Машиностроение, 1992. - 320 с.

98. Кузнецов В.Д. Физика твердого тела / В.Д. Кузнецов. - Томск: Красное знамя, 1941.-т.2. - 771 с.

99. Резников А.Н. Теплофизика резания / А.Н. Резников - М.: Машиностроение, 1969. -288 с.

100. Розенберг А.М. Элементы теории процесса резания металлов / А.М. Розенберг, А.Н. Еремин. - Машгиз, 1956. - 320 с.
101. Краткий технический справочник / под общ. ред. В.А. Зиновьева, ч. 2. - М.: Изд-во Техничко-Теоретической литературы, 1949-1950-532с.+768с.
102. Справочник по производственному контролю в машиностроении; под ред. А.К. Кутая, Л.: Машиностроение, 1974г. - 975 с.
103. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров - М.: Машиностроение, 1975. - 343 с.
104. ГОСТ 4543-71. Прокат из легированной конструкционной стали. - Москва; ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 63 с.
105. ГОСТ 5362-78. Полосы латунные. – Взамен ГОСТ 5362-50; введ. 01.01.1980. – Москва; ИПК Изд-во стандартов, 01.07.1998. – 7 с.
106. ГОСТ 931-90. Листы и полосы латунные. - Взамен ГОСТ 931-78; введ. 01.01.1992. – Москва; ИПК Изд-во стандартов, 01.12.2002. – 16 с.
107. ГОСТ 1789-70. Полосы и ленты из бериллиевой бронзы. - Взамен ГОСТ 1789-60; введ. 01.07.1970. – Москва; ИПК Изд-во стандартов, 01.12.1986. – 26 с.
108. ГОСТ 13726-97. Ленты из алюминия и алюминиевых сплавов. - Взамен ГОСТ 13726-78; введ. 01.01.1999. – Минск; Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 01.04.2005. – 20 с.
109. Патент №2399451 МПК В 21 D 28/14 Устройство для обратной вырубке шайбы из листовой заготовки./ А.П. Сергиев, А.А. Проскурин, В.Н. Логачев.
110. Пат. 716675 Союз Советских Социалистических республик, МПК⁶ В 21 D 28/14. Штамп для чистой обратной вырубке деталей и пробивки в них отверстий / Донцов В.И., Рыскин Н.Н.; заявитель и патентообладатель. № 2516593/25-27; заявл. 08.08.77; опубл. 28.02.80, Бюл. № 7.
111. Патент №126270 МПК В 21 D 28/14 Устройство обратной вырубке листовых деталей./ А.П. Сергиев, А.А. Проскурин.

112. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением / Н.П. Громов; - М.: Металлургия, 1978. - 360 с.
113. Хироми Йосида. Виды брака и способы его предупреждения при вырубке-пробивке / Хироми Йосида, Ямагути Фумио - Пурэсу гидзюцу: Press Work, 1987. - 25. - №2. - с.29-48.
114. Даниелян А.М. Теплота и износ в процессе резания металлов / А.М. Даниелян - М.: Машгиз, 1954. - 276 с.
115. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов / Зорев Н.Н. - М.: Машгиз, 1956.-319 с.
116. Зубцов М.Е. Листовая штамповка / М.Е. Зубцов - Москва, 1958.
117. Мещерин В.Т. Листовая штамповка: атлас схем / В.Т. Мещерин. - 3-е изд.
118. Сторожев М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов - М.: Машиностроение, 1977. - 423 с.
119. Таказава К. Технология удаления заусенцев / К. Таказава - Кикай-но-кэнкю, 1978. -т.30 - №1. - с.43-48.
120. Такадзава Т. Образование заусенцев при обработке резанием / Т. Такадзава - Кикай-но-кэнкю, 1978. - т.30. - №92. - с. 329 - 332.
121. Такадзава Т. Исследование образования заусенцев на кромках деталей после их механической обработки / Т. Такадзава - Кикай-но-кэнкю, 1978. - т.30. - №3.-с.441-447.
122. Такая К. Современная технология удаления заусенцев / Такая К. - Кикай- но-кэнкю, 1977. - т.29. -№11.- с.1343-1348.
123. Трент Е.М. Резание металлов / Трент Е.М.; пер. с англ. Г.И. Айзенштока - М.: Машиностроение, 1980. - 263 с.
124. Якушев А.И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения / А.И.Якушев, Л.Н. Воронцов, Н.М. Федотов - М.: «Машиностроение», 1986. - 352 с.
125. Зейтц Ф. Физика металлов / Ф.Зейтц. - М.-Л: ОГИЗ, 1947г. - 150 с.

126. Веников В.А. Теория подобия и моделирования / В.А. Веников - М.: Высшая школа, 1976. - 479 с.
127. Вирченко Н. А. Графики функций: справочник / Н. А. Вирченко, И.И. Ляшко, К.И. Швецов.-2-е изд., стер - Киев: Наук, думка, 1979. - 320с.
128. Проф. д-р О'Нейль Г. Твёрдость металлов и её измерение / Проф. д-р Г.О'Нейль. - Л.:ГНТИ. М., 1940 - 376 с.
129. Сергиев, А.П. Влияние эффекта Баушингера на механизм формирования заусенцев при холодной листовой вырубке / А.П. Сергиев, Логачев В.Н., Проскурин А.А. // Кузнечно-штамповочное производство. - 2008. - №1. - С. 18-20.
130. Сергиев, А.П. Способы устранения заусенцев при листовой штамповке / Сергиев А.П., Логачев В.Н. // Молодые ученые - науке, образованию и производству (к 25-летию Старооскольского технологического института (филиала) Московского государственного института стали и сплавов (Технологического университета): Сборник научных трудов региональной научно-практической конференции: Старый Оскол, 2004 г. - с. 160-166.
131. Сергиев, А.П. Влияние эффекта Баушингера на высоту заусенцев и высоту блестящего пояска при вырубке листового металла / Сергиев А.П., Логачев В.Н. // Образование, наука, производство и управление: Сборник трудов международной научно-практической конференции: В 4-х т. - Старый Оскол: ООО «ТНТ», 2006. - Т.1. с. 396-398.
132. Сергиев, А.П. К вопросу заусенцеобразования / Сергиев А.П., Логачев В.Н. // Образование, наука, производство и управление: Сборник трудов международной научно-практической конференции: В 4-х т. - Старый Оскол: ООО «ТНТ», 2006. -Т.1. с. 399-400.
133. Сергиев, А.П. Влияние знакопеременного нагружения на параметры среза при вырубке листового металла / Сергиев А.П., Логачев В.Н. // Молодые ученые - науке и производству: Сборник трудов региональной научно-практической. Старый Оскол: СТИ МИСиС, 2007.- Т. 2. с. 187-193.

134. Сергиев, А.П. Исследование влияния соотношения прямой и обратной деформаций на высоту заусенцев / Сергиев А.П., Логачев В.Н. // Сборник научных и научно-методических докладов международной научно- практической конференции преподавателей, сотрудников и аспирантов. Старый Оскол: СТИ НИТУ МИСиС, 2009.- Т. 2. с. 262-264.

135. Логачев В.Н. Математическая модель процесса заусенцеобразования /Логачев В.Н. // Сборник научных и научно-методических докладов международной научно-практической конференции преподавателей, сотрудников и аспирантов. Старый Оскол: СТИ НИТУ МИСиС, 2009.- Т. 3. с. 197-200.

136. Сергиев, А.П. Экспериментальное исследование математической модели процесса заусенцеобразования / Сергиев А.П., Логачев В.Н., Проскурин А.А. // Материалы 4 Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научный потенциал студенчества в 21 веке». Естественные и технические науки. Ставрополь: СевКавГТУ, 2010.-Т. I.e. 299-303.

137. Проскурин А.А., Взаимосвязь пластических свойств материалов с эффективностью применения обратной вырубki / девятая Всероссийская научно-практическая конференция студентов и аспирантов. г. Старый Оскол; СТИ НИТУ МИСиС, 2013. – Т1. – С. 143-147 Старооскольский технологический институт.

138. Шапошников Н.А. Механические испытания металлов. – М.: Л.: Машгиз, 1954, - 443 с.

139. Давыденков Н.Н. Некоторые проблемы механики материалов. – Л.: Лениздат, 1943, - С 86-108.

140. Машиностроение. Энциклопедический справочник. Том 2. М. 1947 г. С.275.

141. Körber F. Mitt K. – W. Inst.f. Eisenforsch. 3.1. 1922 Stahl und Eisen. 42.365.1922/

142. Körber F., Rohland W. Mitt K. – W. Inst.f. Eisenforsch. 5.37.1924.5.55.1924.

143. Stead J., JISI (1923) 1, 377.



ЗАО «СОАТЭ», 309507, Россия, Белгородская обл., г. Старый Оскол, ул. Ватутина, 54
 Тел. (4725) 22-55-33, факс: (4725) 24-10-15, 22-42-88, email: info@soate.ru, www.soate.ru
 ИНН 3128000673 КПП 312801001
 р/с 40702810807070101110 в Отделении №8426 Сбербанка России г. Старый Оскол
 к/с 30101810100000000633
 БИК 041403633 Отделение №8592 Сбербанка России г. Белгород

Дата 31.07.2019 № 02/18220

Справка о внедрении
 результатов научных исследований
 аспиранта СТИ НИТУ МИСиС
 Проскурина А.А.

Авторские научно-методические разработки Александра Александровича Проскурина, заключающиеся в применении технологического процесса реверсивной вырубке листовых деталей посредством запатентованного устройства реверсивной вырубке, обеспечивающем получение листовых деталей с минимальной величиной заусенца, теоретически обоснованы, и имеют большое практическое значение.

Представленный технологический процесс был испытан в производственных условиях для получения детали Н 50.21.01. Результаты испытаний подтвердили представленные в работе А.А. Проскурина теоретические разработки. Они были рассмотрены специалистами ЗАО «СОАТЭ», а предлагаемый технологический процесс реверсивной вырубке листовых деталей рекомендован к применению на предприятии.

Главный технолог
 ЗАО «СОАТЭ»

 Морозов С.В.
 31.07.2019г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
СТАРООСКОЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. А.А. УГАРОВА
(филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(СТИ НИТУ «МИСиС»)
309516, Старый Оскол, мкр. им. Макаренко, 42 Тел. (4725)45-12-00, тел./факс: (4725)32-43-61
<http://www.sf-misis.ru> E-mail: 451222@sf-misis.ru
ИНН/КПП 7706019535/ 312802001

21.12.2015 № 1703/16-09

На № _____

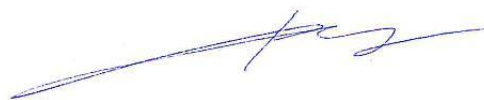
В диссертационный Совет Д212.132.09 при
ФГАОУ ВПО «НИТУ «МИСиС»

СПРАВКА

о внедрении результатов научных исследований по диссертации аспиранта СТИ НИТУ «МИСиС» Проскурина А.А. на тему: «Разработка устройства и исследование режимов реверсивной вырубки деталей из тонколистового проката без заусенцев» представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 «Технологии и машины обработки давлением».

Настоящим письмом СТИ НИТУ «МИСиС» подтверждает, что результаты диссертационного исследования Проскурина А.А. используются преподавателями кафедры «Технологии и оборудование в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта» для проведения лекционных и практических занятий по дисциплинам «Математическое моделирование в машиностроении» и «Проектирование и производство заготовок».

Заместитель директора
по науке и стратегическому
развитию



Н.И. Репников

Заведующий кафедрой
«Технологии и оборудование
в металлургии и машиностроении
им. В.Б. Крахта»



А.В. Макаров

Стандартизированные значения высоты заусенцев.

Прочность материала на растяжение σ_b , МПа		Точность исполнения деталей	Толщина листового материала s , мм							
			до 0,4	0,4-0,63	0,63-0,1	1-1,6	1,6-2,5	2,5-4	4-6,3	6,3-10
свыше	ДО		Высота заусенцев h , мкм							
100	250	высокая	20-50	30-80	30-120	40-170	50-250	70-360	100-600	140-950
		средняя	30-70	40-110	40-170	50-250	70-370	100-540	150-900	210-1420
		низкая	40-100	50-150	60-230	70-340	100-500	140-720	200-1200	250-1900
250	400	высокая	20-40	20-50	30-90	30-120	50-180	60-250	80-360	110-500
		средняя	20-50	30-70	40-130	40-180	70-260	90-370	120-540	170-750
		низкая	30-70	40-100	50-170	60-240	80-350	120-500	170-730	230-1000
400	630	высокая	20-30	20-40	30-50	30-70	40-110	50-200	70-220	90-320
		средняя	20-40	30-50	40-70	40-110	60-160	70-300	100-330	130-480
		низкая	30-50	40-70	50-100	60-150	80-220	100-400	140-450	180-650
630	>	высокая	10-20	10-20	20-30	30-40	40-60	50-90	60-130	70-170
		средняя	10-20	20-30	30-40	40-60	50-90	70-130	80-190	100-260
		низкая	20-30	20-40	40-50	50-80	70-120	90-180	110-260	130-350

Таблица П 3.2

Значения коэффициента A .

Инструмент	Значения коэффициента A при вырубке
пуансон	2,4
матрица	2,9

Значения относительной глубины пластического внедрения режущей кромки до начала образования скалывающих трещин k_0 .

Материал		k_0
Медь, латунь, цинк, алюминий	отожжённые	0,5
	наклёпанные	0,35
Сталь мягкая C = (0,1-0,2)%	отожжённые	0,45
	наклёпанные	0,35
Сталь средней твёрдости C = (0,2 - 0,4) %	отожжённые	0,3
	наклёпанные	0,2
Сталь твёрдая C = (0,5 - 0,8) %	отожжённые	0,2
	наклёпанные	0,1

Значения высоты заусенцев h для алюм. сплава АД1 при числе реверсов $n=0$

№ образца	max и min в 10 точках	Значение высоты заусенцев в max и min, мм	Средняя высота заусенцев в max h_{max}^{cp} и min h_{min}^{cp} , мм	Средняя высота заусенцев	$ \Delta h = h^{cp} - h_i $, мм	$S_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^{10} (h^{cp} - h_i)^2}{n-1}$
				$h_j^{cp} = (h_{max}^{cp} + h_{min}^{cp}) / 2$ мм		
1	max 1	0,27	0,254	0,201	0,069	0,0034
	max 2	0,25			0,049	
	max 3	0,26			0,059	
	max 4	0,24			0,039	
	max 5	0,25			0,049	
	min 1	0,14	0,148	0,061		
	min 2	0,16		0,041		
	min 3	0,13		0,071		
	min 4	0,14		0,061		
	min 5	0,17		0,031		
2	max 1	0,23	0,25	0,2	0,03	0,0031
	max 2	0,27			0,07	
	max 3	0,24			0,04	
	max 4	0,26			0,06	
	max 5	0,25			0,05	
	min 1	0,15	0,15	0,05		
	min 2	0,16		0,04		
	min 3	0,12		0,08		
	min 4	0,14		0,06		
	min 5	0,18		0,02		
3	max 1	0,21	0,244	0,197	0,013	0,002734
	max 2	0,25			0,053	
	max 3	0,24			0,043	
	max 4	0,26			0,063	
	max 5	0,26			0,063	
	min 1	0,14	0,15	0,057		
	min 2	0,16		0,037		
	min 3	0,14		0,057		
	min 4	0,14		0,057		
	min 5	0,17		0,027		
4	max 1	0,23	0,248	0,198	0,032	0,0027
	max 2	0,26			0,062	
	max 3	0,24			0,042	
	max 4	0,25			0,052	
	max 5	0,26			0,042	
	min 1	0,15	0,148	0,048		
	min 2	0,16		0,038		
	min 3	0,14		0,058		
	min 4	0,13		0,068		
	min 5	0,16		0,038		
5	max 1	0,25	0,252	0,204	0,046	0,00265
	max 2	0,25			0,046	
	max 3	0,26			0,056	
	max 4	0,26			0,056	
	max 5	0,24			0,036	
	min 1	0,15	0,156	0,054		
	min 2	0,16		0,044		
	min 3	0,14		0,064		
	min 4	0,16		0,044		
	min 5	0,17		0,034		
Среднее значение высоты заусенцев для заданного режима вырубки				$h^{cp} = \frac{\sum_{j=1}^5 h_j^{cp}}{5} = 0,2$		$S_{cp}^2 = \frac{\sum_{j=1}^5 S_j^2}{5} = 0,0029$

КОМПЛЕКТ ЧЕРТЕЖЕЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.

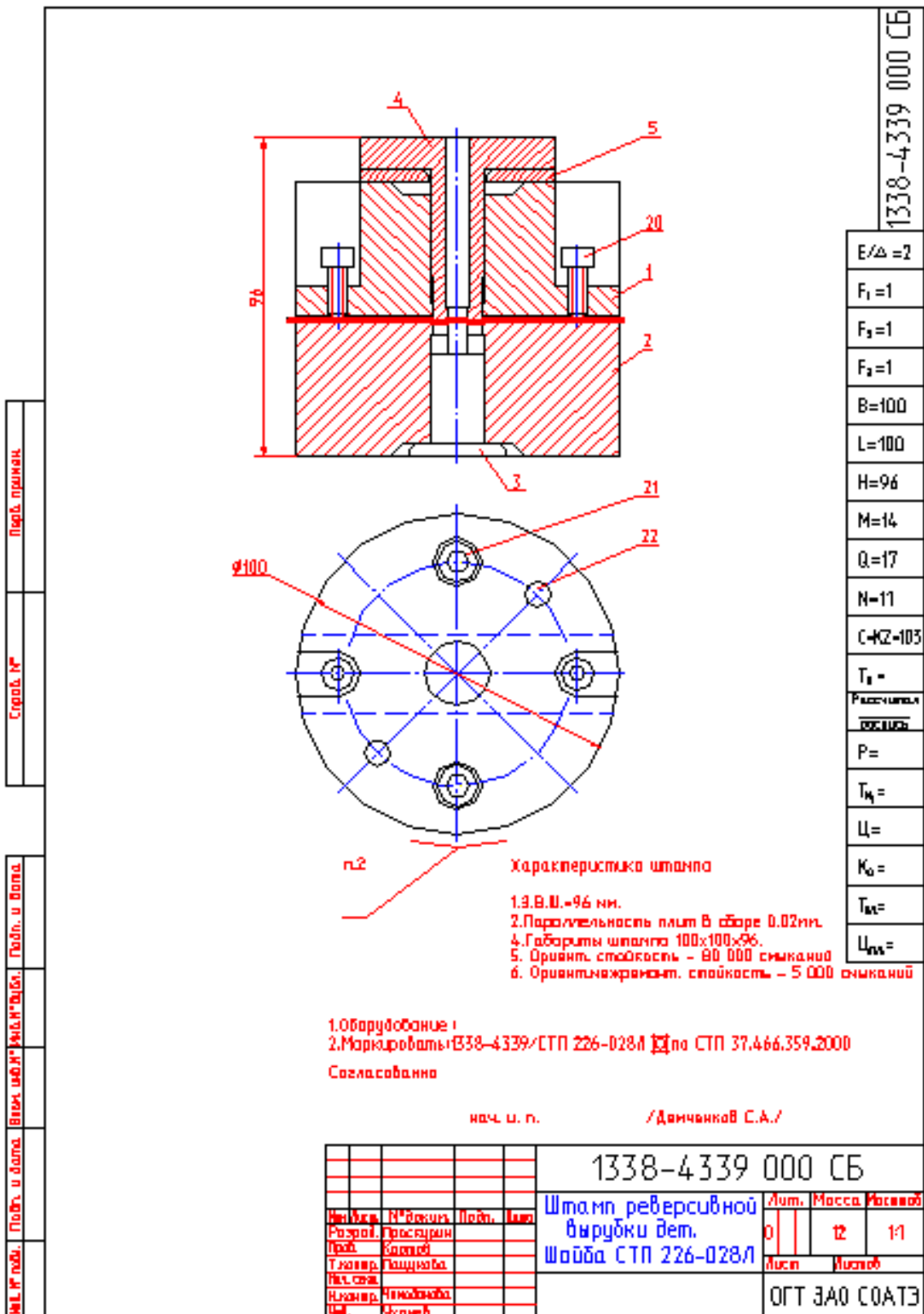


Рисунок 1. Сборочный чертеж экспериментальной установки

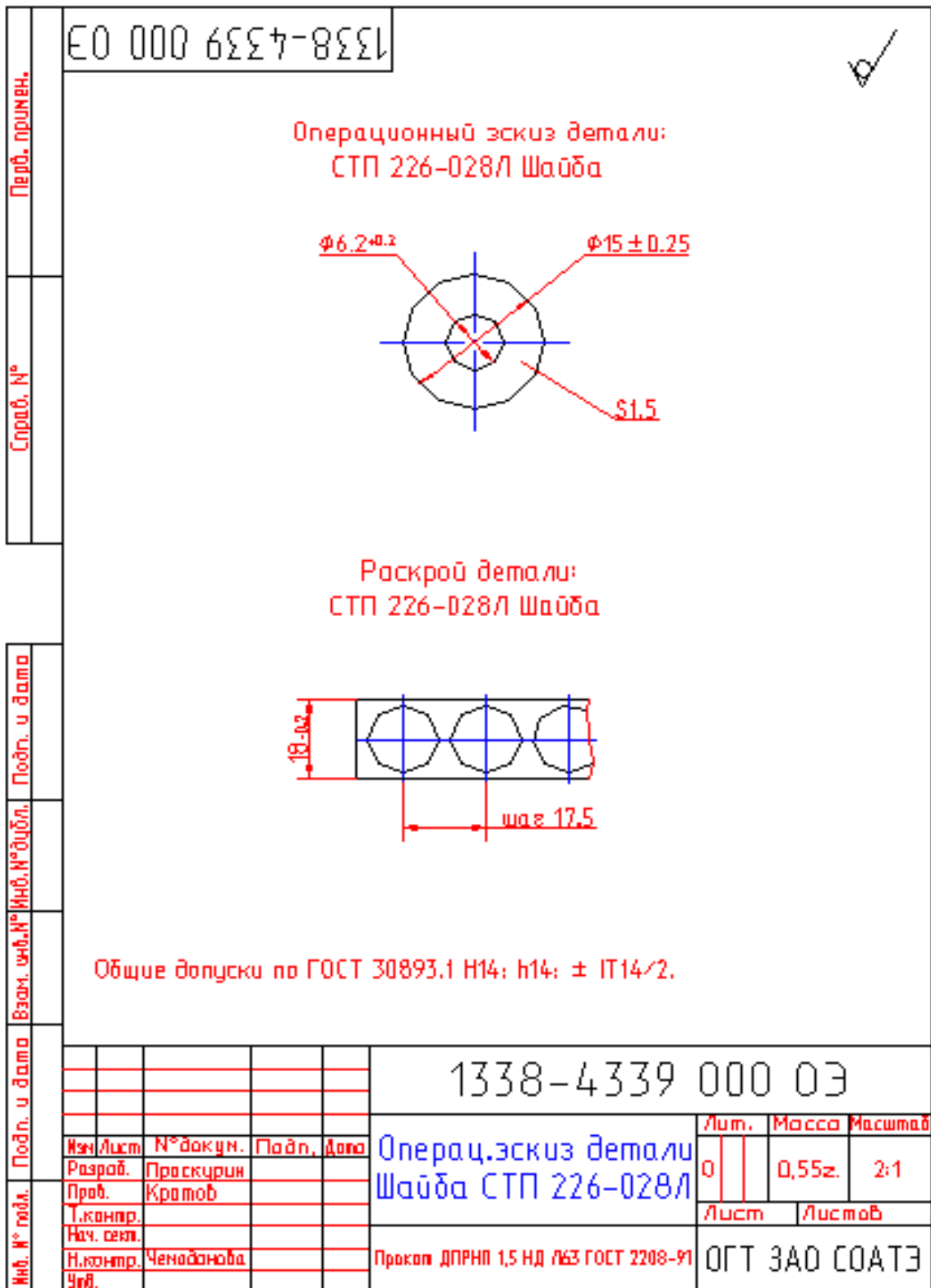


Рисунок 2. Операционный эскиз вырубаемой на экспериментальной установке детали (опытного образца)

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
<u>Документация</u>						
A3			1338-4339 000 СБ	Сборочный чертеж	1	
A4			1338-4339 000 ОЭ	Операционный эскиз	1	
<u>Детали</u>						
A4	1		1338-4339 001	Матрица верхняя	1	
A4	2		1338-4339 002	Матрица нижняя	1	
A4	3		1338-4339 003	Пуансон	1	
A4	4		1338-4339 004	Пуансон-матрица	1	
A4	5		1338-4339 005	Плитка для 20%-ого внедрения	1	
A4	6		1338-4339 006	Плитка для 40%-ого внедрения	1	
A4	7		1338-4339 007	Плитка для 27%-ого внедрения	1	
A4	8		1338-4339 008	Плитка для 33%-ого внедрения	1	
<u>Стандартные изделия</u>						
		20		Винт М6-6dх14 ГОСТ 17475-80	2	
		21		Винт М8-6dх45 ГОСТ 1491-80	2	
		22		Штифт Φ 8х75 ГОСТ 3128-70	2	
1338-4339 000						
Инв. № табл.	Изм.	Лист	ИТданун.	Подп.	Дата	
	Разраб.	Праскурин				
	Проб.	Кратов				
	Н.контр	Ченоданова				
Чтб.						
				Штамп реверсивной вырубki дет.		Лит. Лист Листов
				Шайба СТП 226-028Л		1 2
				ЗАО СОАТЭ ОГТ		

Рисунок 3. Спецификация

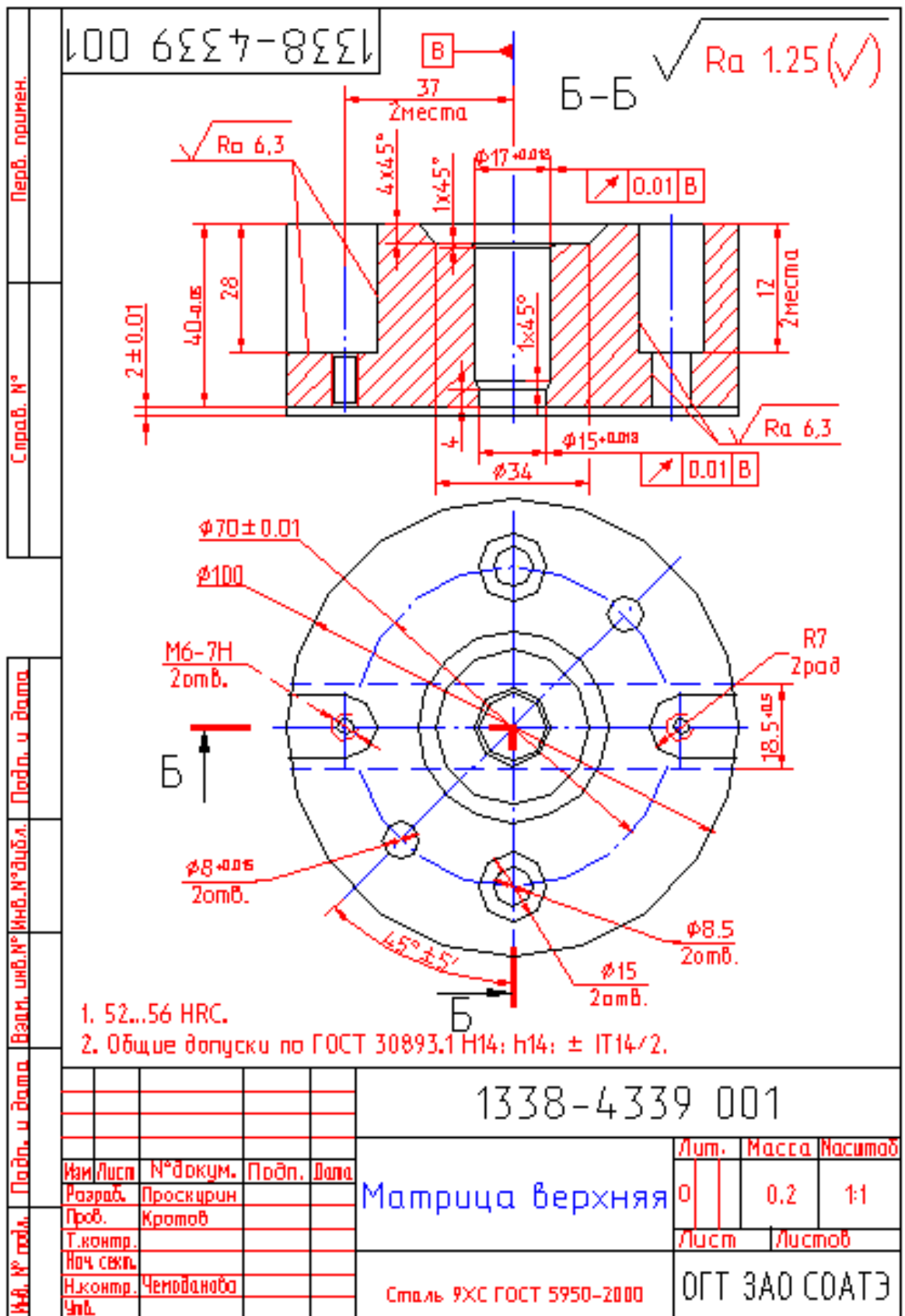


Рисунок 4. Деталь экспериментального устройства Матрица верхняя

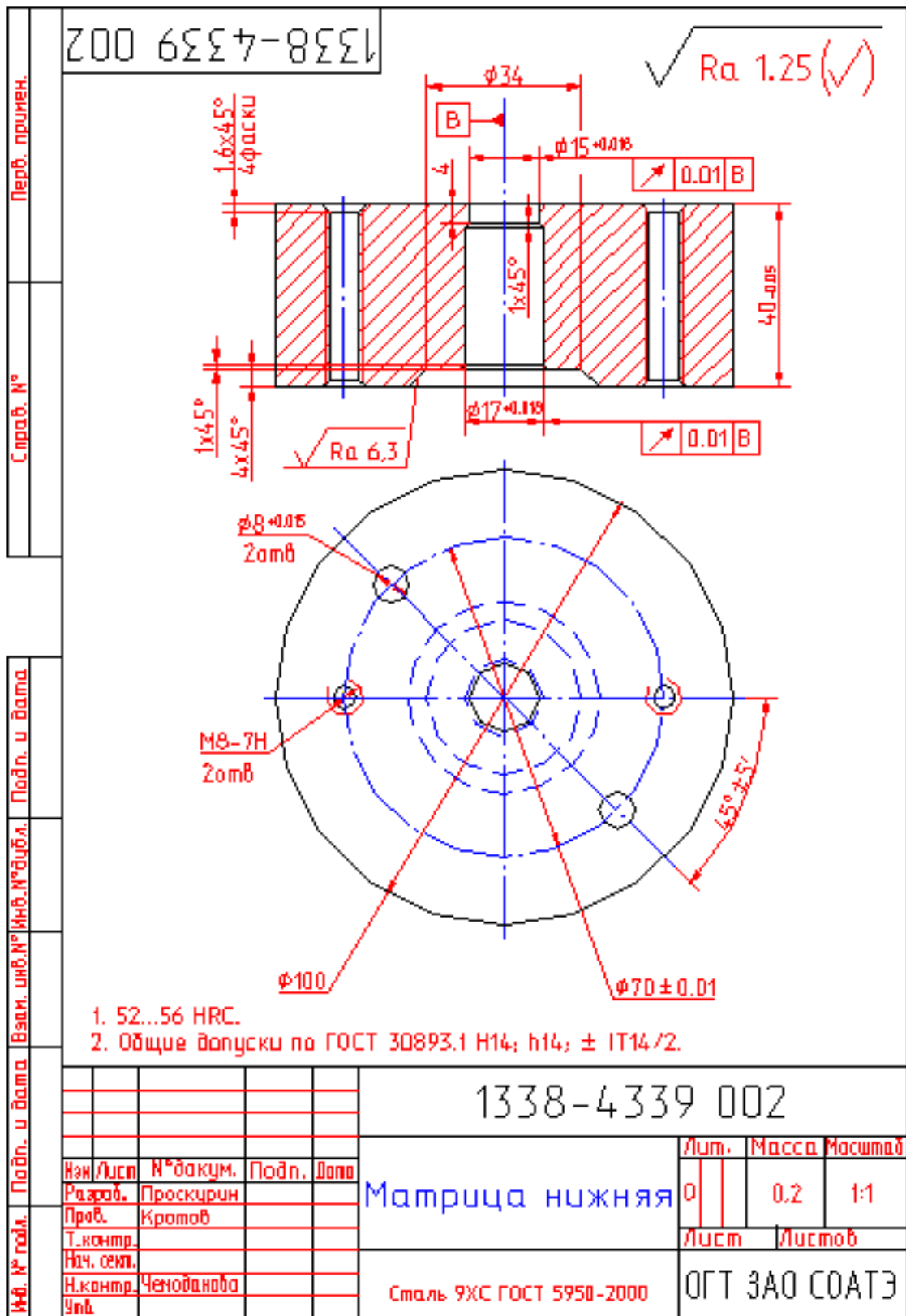


Рисунок 5. Деталь экспериментального устройства Матрица нижняя

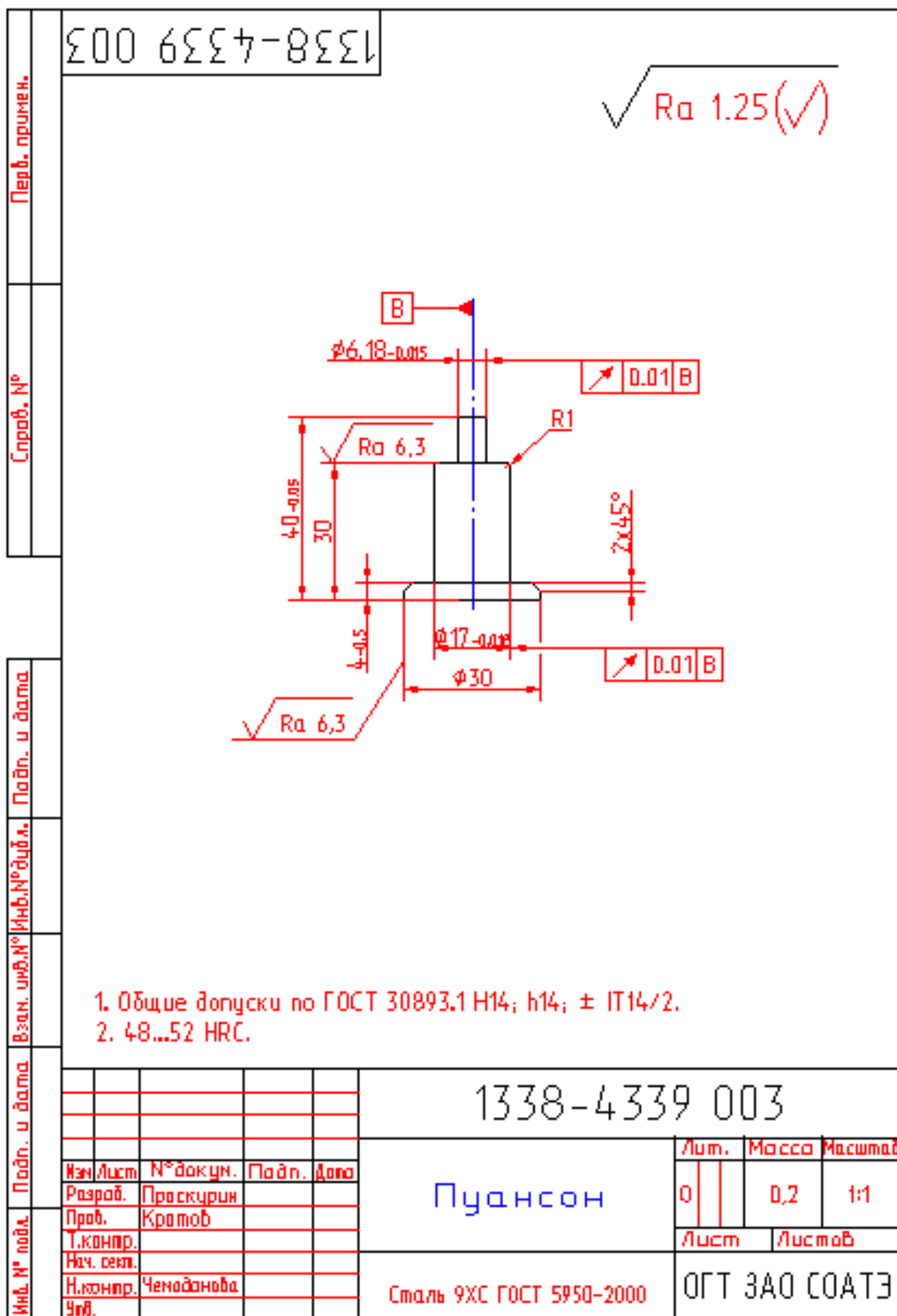


Рисунок 6. Деталь экспериментального устройства Пуансон

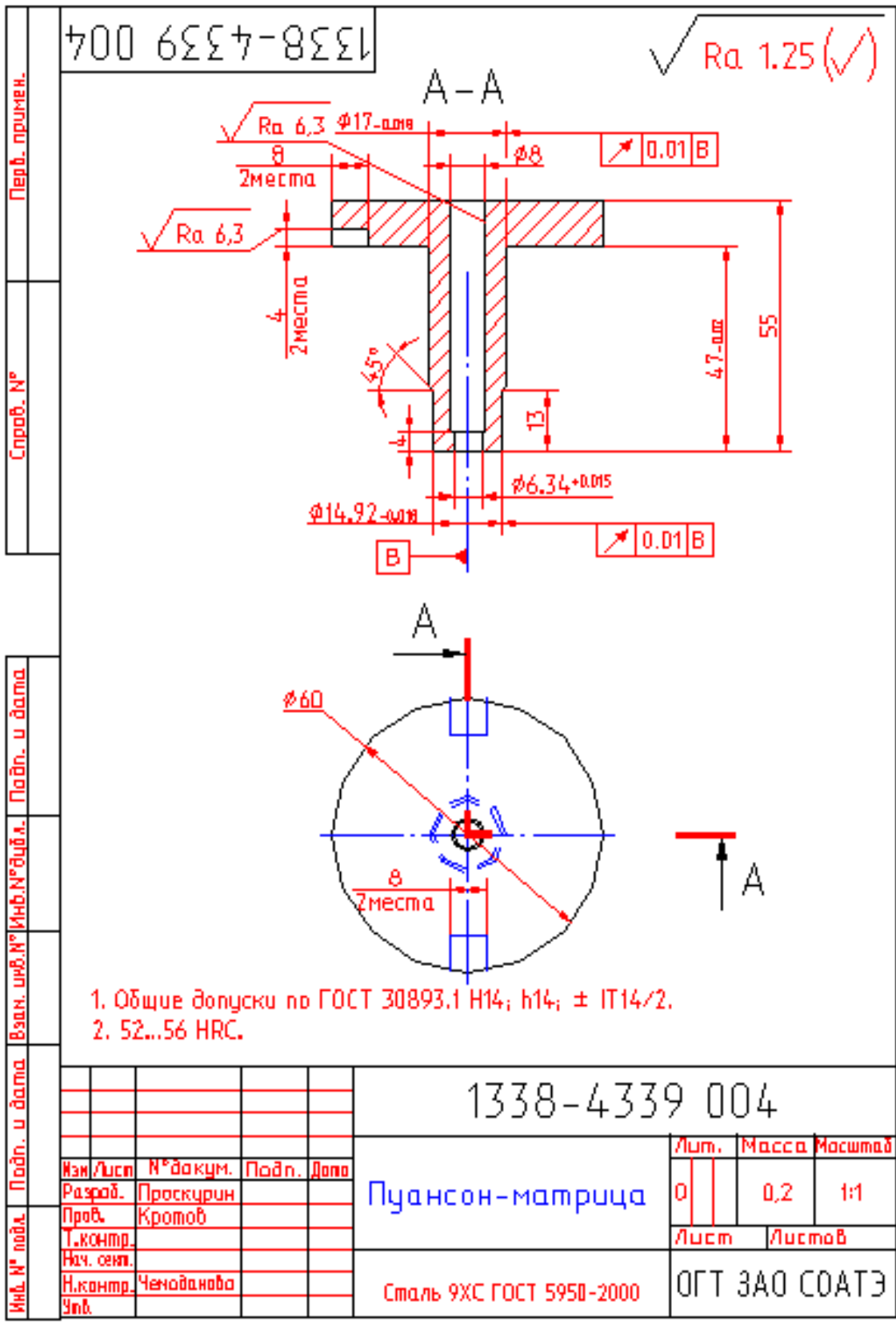


Рисунок 7. Деталь экспериментального устройства Пуансон-матрица

Перв. примен.

500 6554-8551

√ Ra 1.25 (√)

1. Общие допуски по ГОСТ 30893.1 H14; h14; ± IT14/2.
2. 45...48 HRC.
3. Маркировать: 6.2

Взят, увб. №	Инв. №	Инв. №	Инв. №	1338-4339 005						
Подп.	и	дата	Подп.	и	дата					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Плитка для 20%-ого внедрения			Лист	Масса	Насытка
Разраб.	Проскурин							0	0,2	1:1
Проб.	Кротов							Лист		Листов
Т.контр.										
Нач. сект.										
Н.контр.	Ченованова				Сталь 40X ГОСТ 4543-71			ОГТ ЗАО СОАТЭ		
Чтб.										

Рисунок 8. Деталь экспериментального устройства, тарированная Плитка, которая обеспечивает внедрение Пуансон-матрицы в заготовку на 20% от толщины заготовки

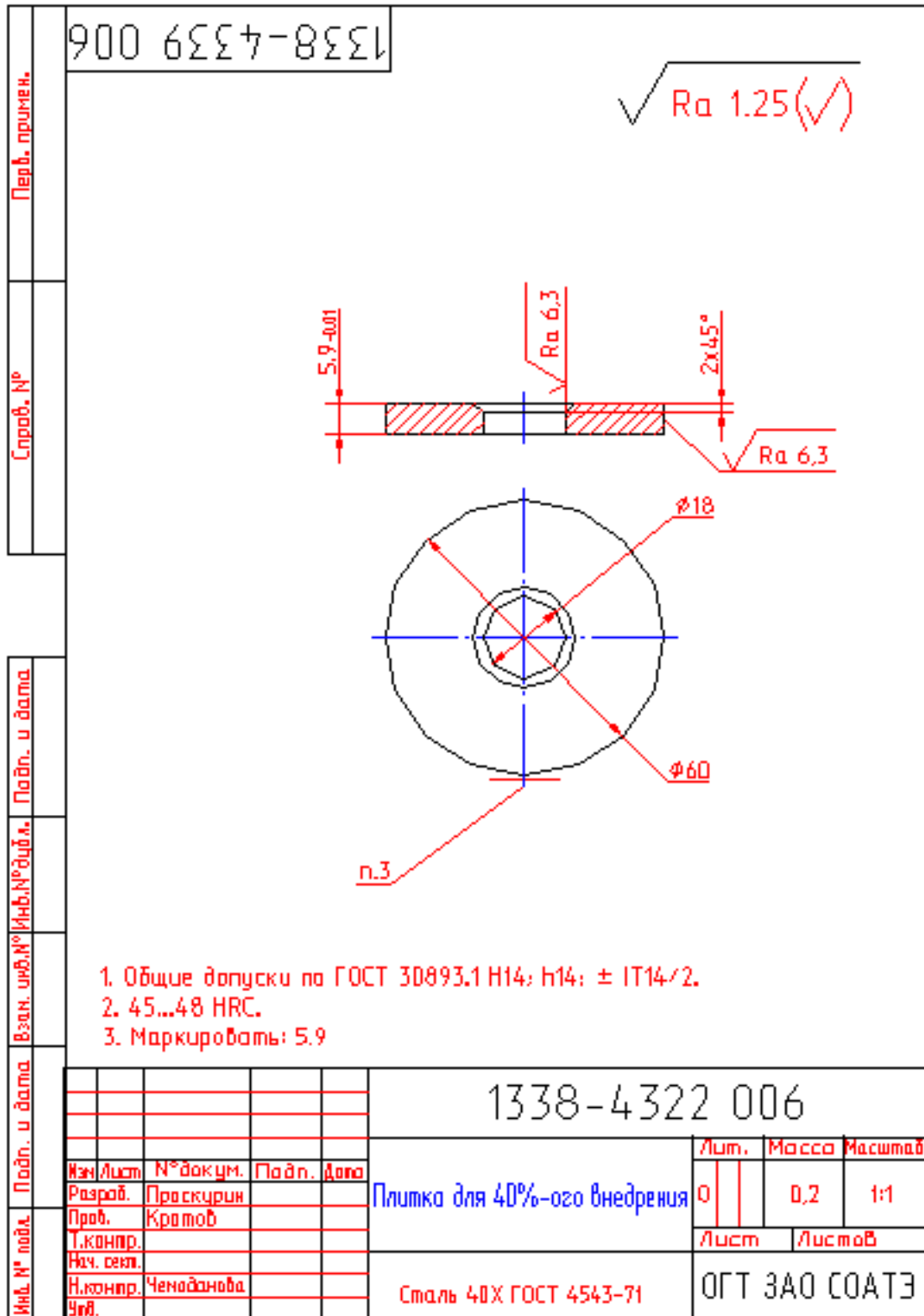


Рисунок 9. Деталь экспериментального устройства, тарированная Плитка, которая обеспечивает внедрение Пуансон-матрицы в заготовку на 40% от толщины заготовки

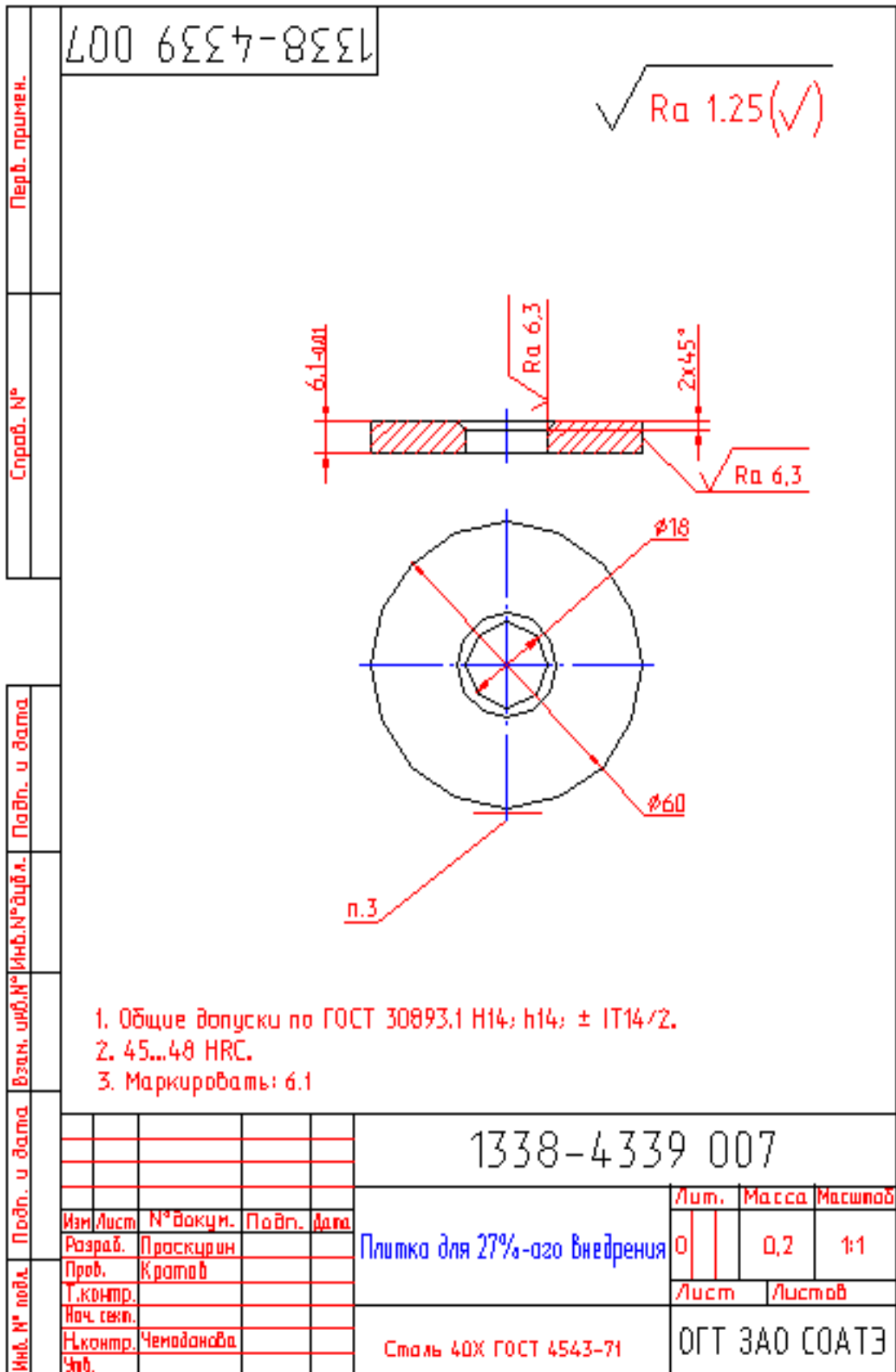


Рисунок 10. Деталь экспериментального устройства, тарированная Плитка, которая обеспечивает внедрение Пуансон-матрицы в заготовку на 27% от толщины заготовки

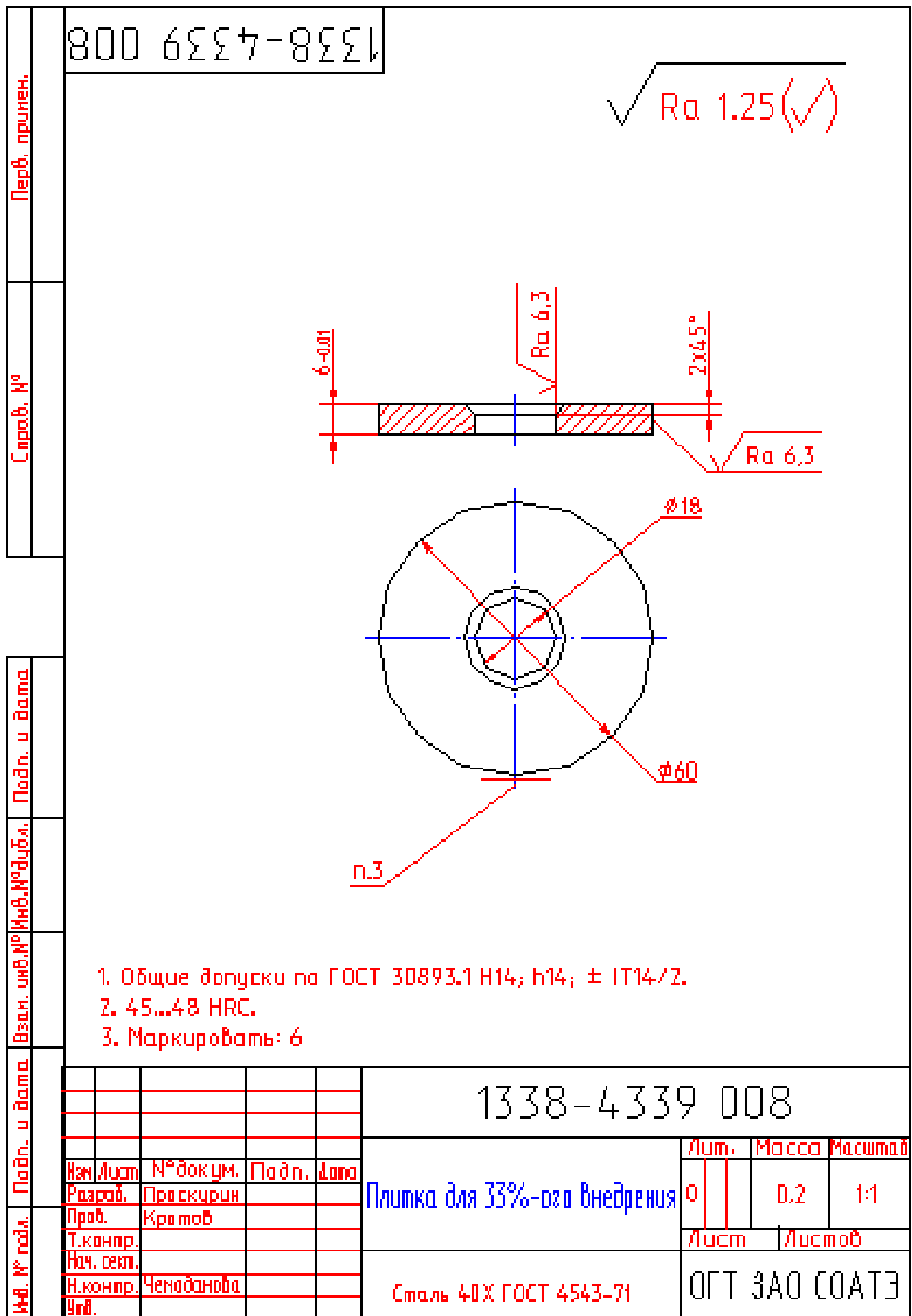


Рисунок 11. Деталь экспериментального устройства, тарированная Плитка, которая обеспечивает внедрение Пуансон-матрицы в заготовку на 33% от толщины заготовки

КОМПЛЕКТ ЧЕРТЕЖЕЙ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА.

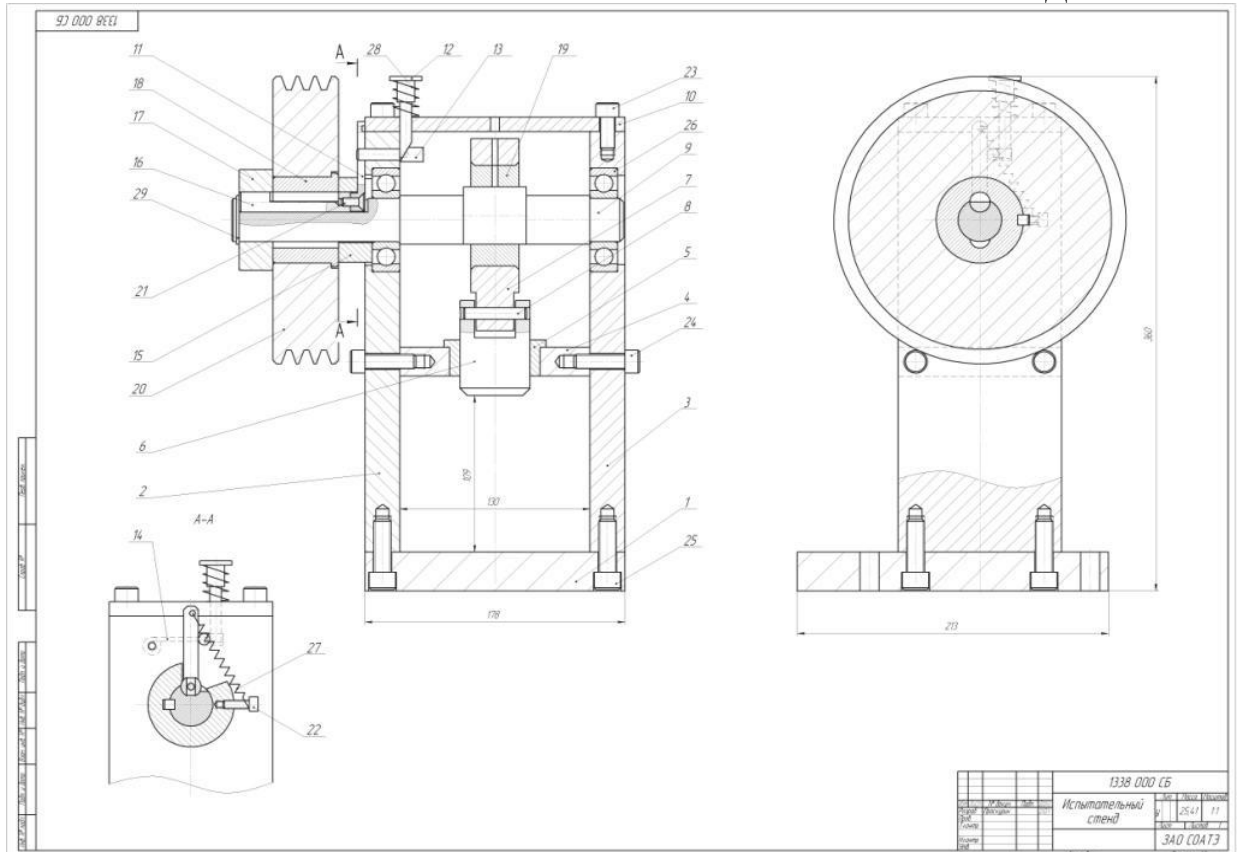
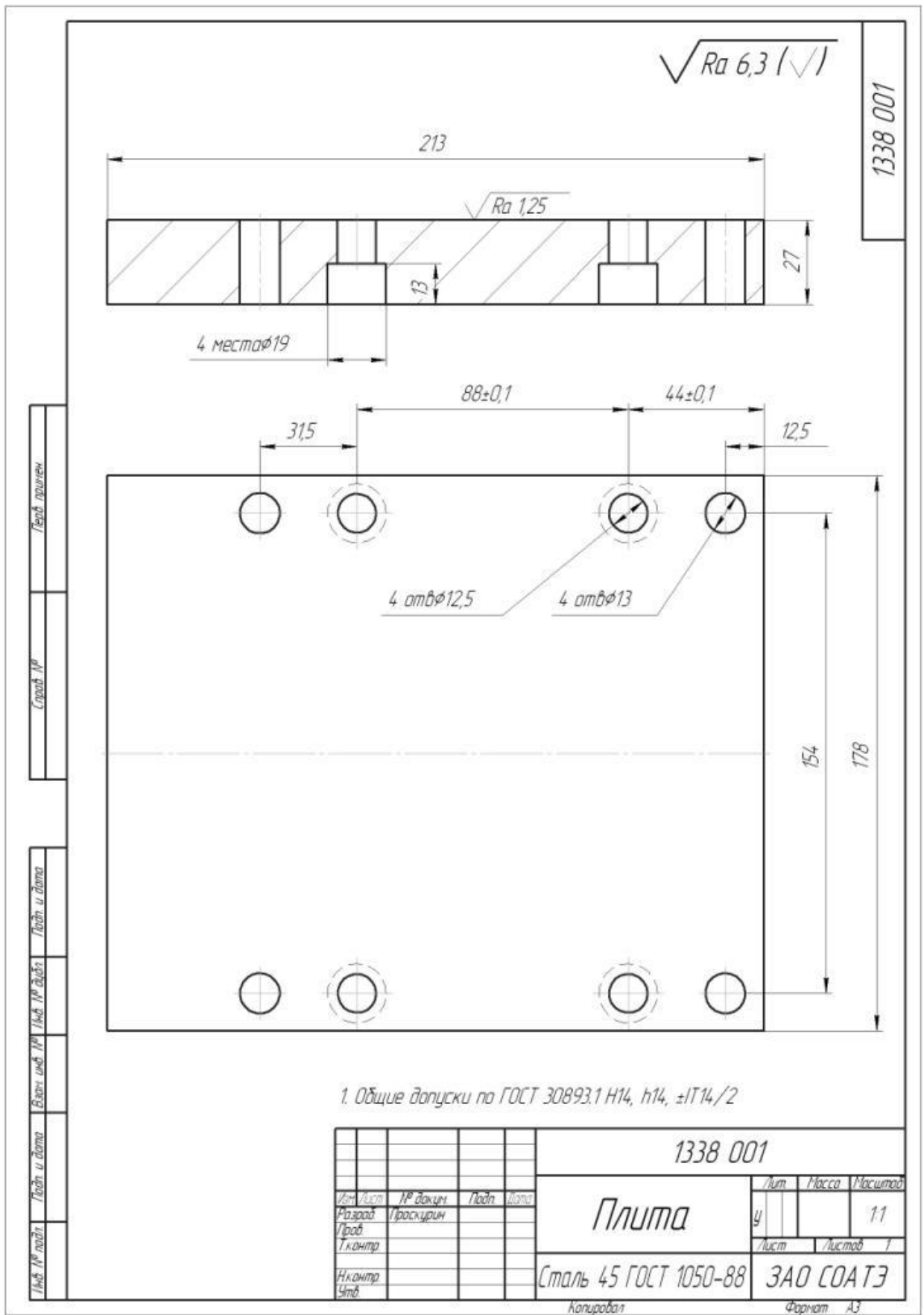


Рисунок 2. Сборочный чертеж испытательного стенда

Код	Деталь	Обозначение	Наименование	Кол-во	Примечание
<i>Документация</i>					
1		1338 000 СБ	Сборочный чертеж		
<i>Детали</i>					
1	1	1338 001	Плита	1	
2	2	1338 002	Стойка левая	1	
3	3	1338 003	Стойка правая	1	
4	4	1338 004	Переключатель	1	
5	5	1338 005	Втулка направляющая	1	
6	6	1338 006	Ползун	1	
7	7	1338 007	Штифт	1	
8	8	1338 008	Штифт	1	
9	9	1338 009	Вал	1	
10	10	1338 010	Крышка	1	
11	11	1338 011	Рычаг	1	
12	12	1338 012	Кнопка	1	
13	13	1338 013	Ограничитель	1	
14	14	1338 014	Пружина ограничительная	1	
15	15	1338 015	Шайба левая	1	
16	16	1338 016	Шайба правая	1	
17	17	1338 017	Шайба фиксирующая	1	
18	18	1338 018	Втулка переходная	1	
19	19	1338 019	Подшипник скольжения	1	
20	20	1338 020	Шкив	1	
1338 000 СБ					
Испытательный стенд					
ЗАО СОАТЗ					

Код	Деталь	Обозначение	Наименование	Кол-во	Примечание
<i>Стандартные изделия</i>					
21	21		Винт М5х16 ГОСТ 17475-80	1	
22	22		Винт М5х20 ГОСТ 11738-84	1	
23	23		Винт М10х20 ГОСТ 17738-84	4	
24	24		Винт М10х35 ГОСТ 17738-84	4	
25	25		Винт М10х25 ГОСТ 17738-84	4	
26	26		Подшипник 306 ГОСТ 8938-75	2	
27	27		Пружина DinA11 = 7х15х15х24	1	сжатая
28	28		Пружина DinA11 = 20х25х26	1	сжатая
29	29		Кольцо 035-0356 ГОСТ 24359-81	1	
1338 000 СБ					

Рисунок 5. Спецификация, Лист 1 и Лист 2



1. Общие допуски по ГОСТ 30893.1 Н14, h14, ±IT14/2

					1338 001			
Изм	Лист	№ докум	Подп	Дата	Плита	Лист	Масса	Масштаб
Разработ	Провер	Технический				у		1:1
Исполн					Сталь 45 ГОСТ 1050-88	Лист	Листов	1
Утв					Копировал	Формат А3		

Рисунок 6. Деталь испытательного стенда. Плита

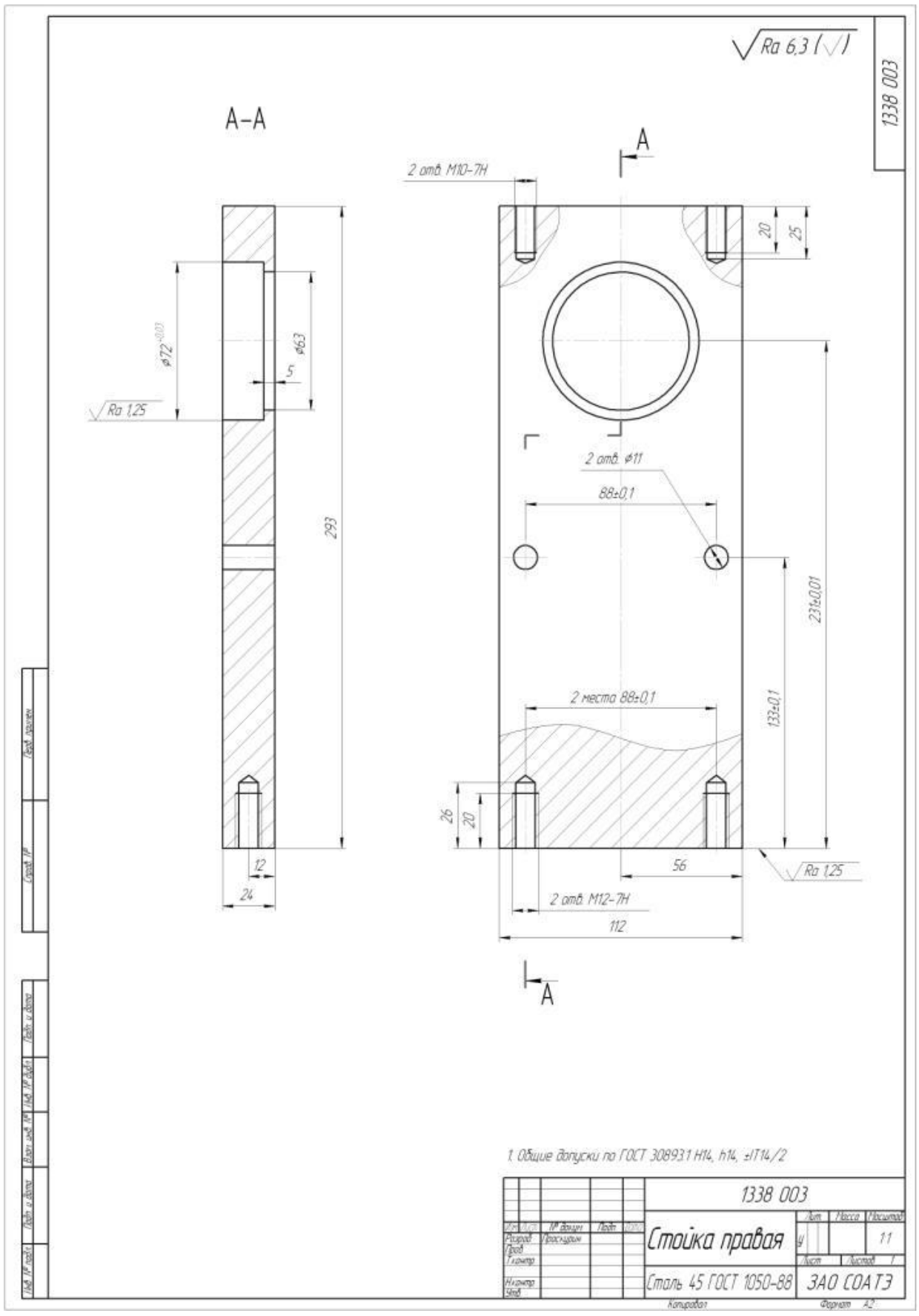


Рисунок 8. Деталь испытательного стенда. Стойка правая

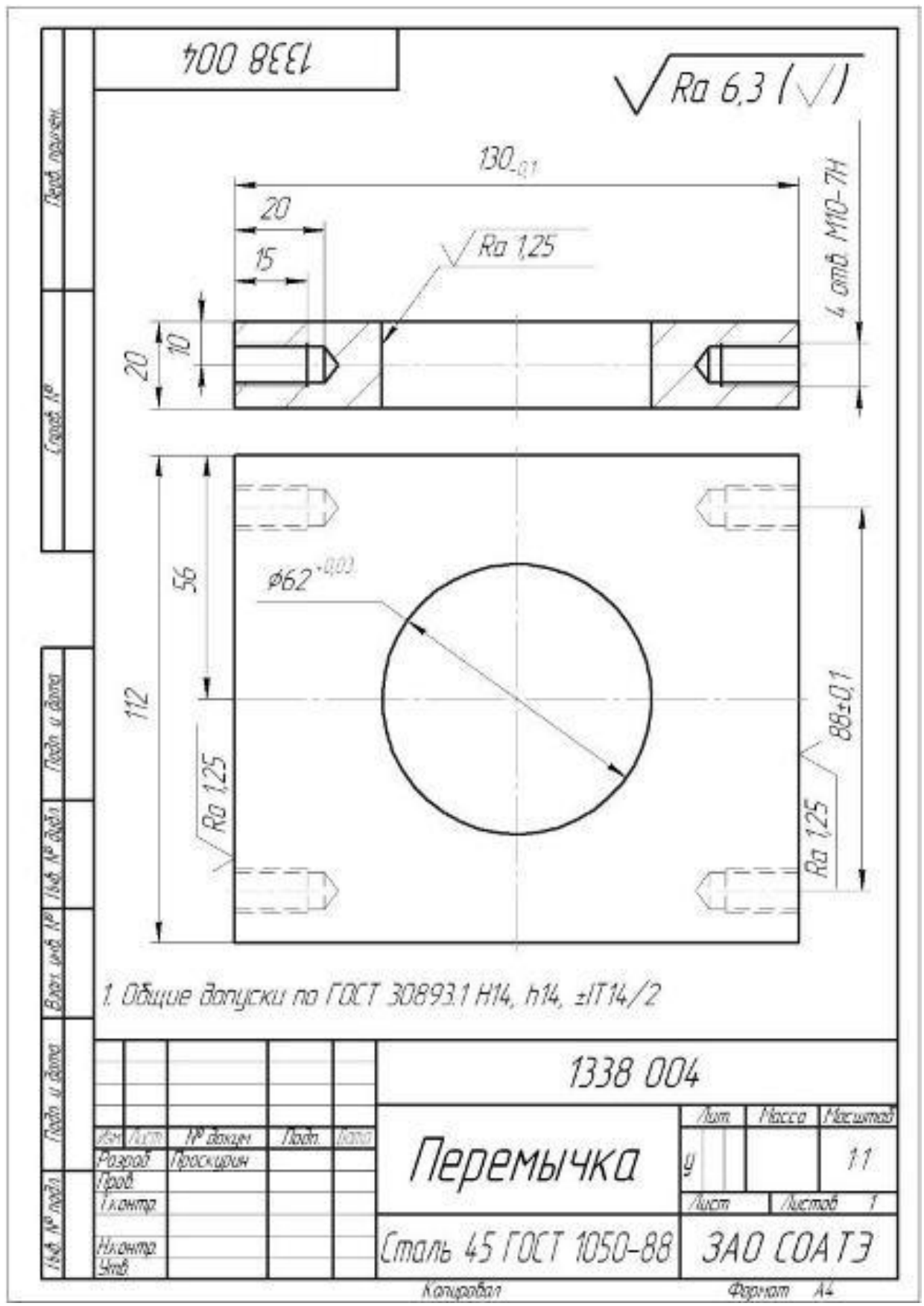


Рисунок 9. Деталь испытательного стенда. Перемычка

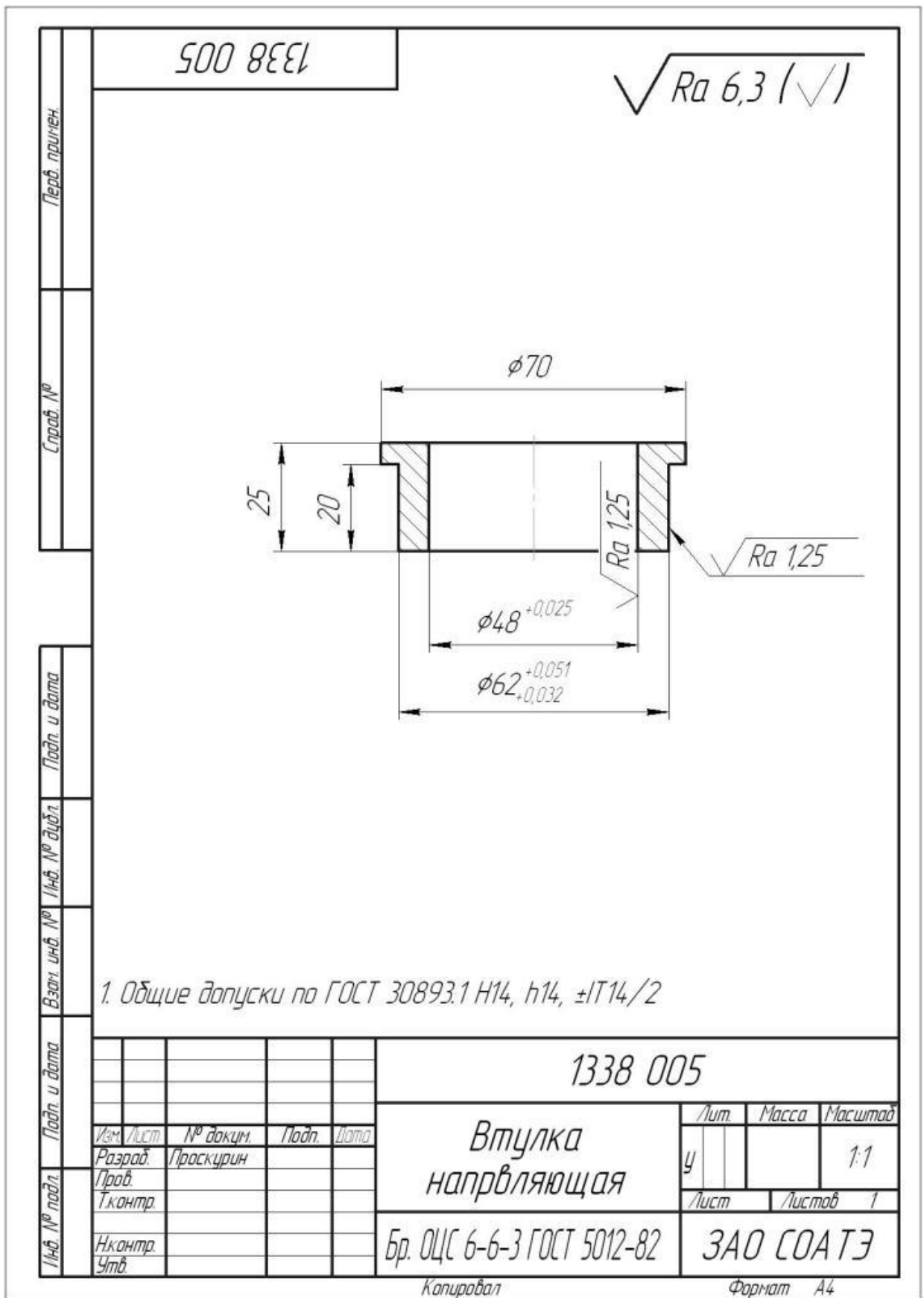


Рисунок 10. Деталь испытательного стенда. Втулка направляющая

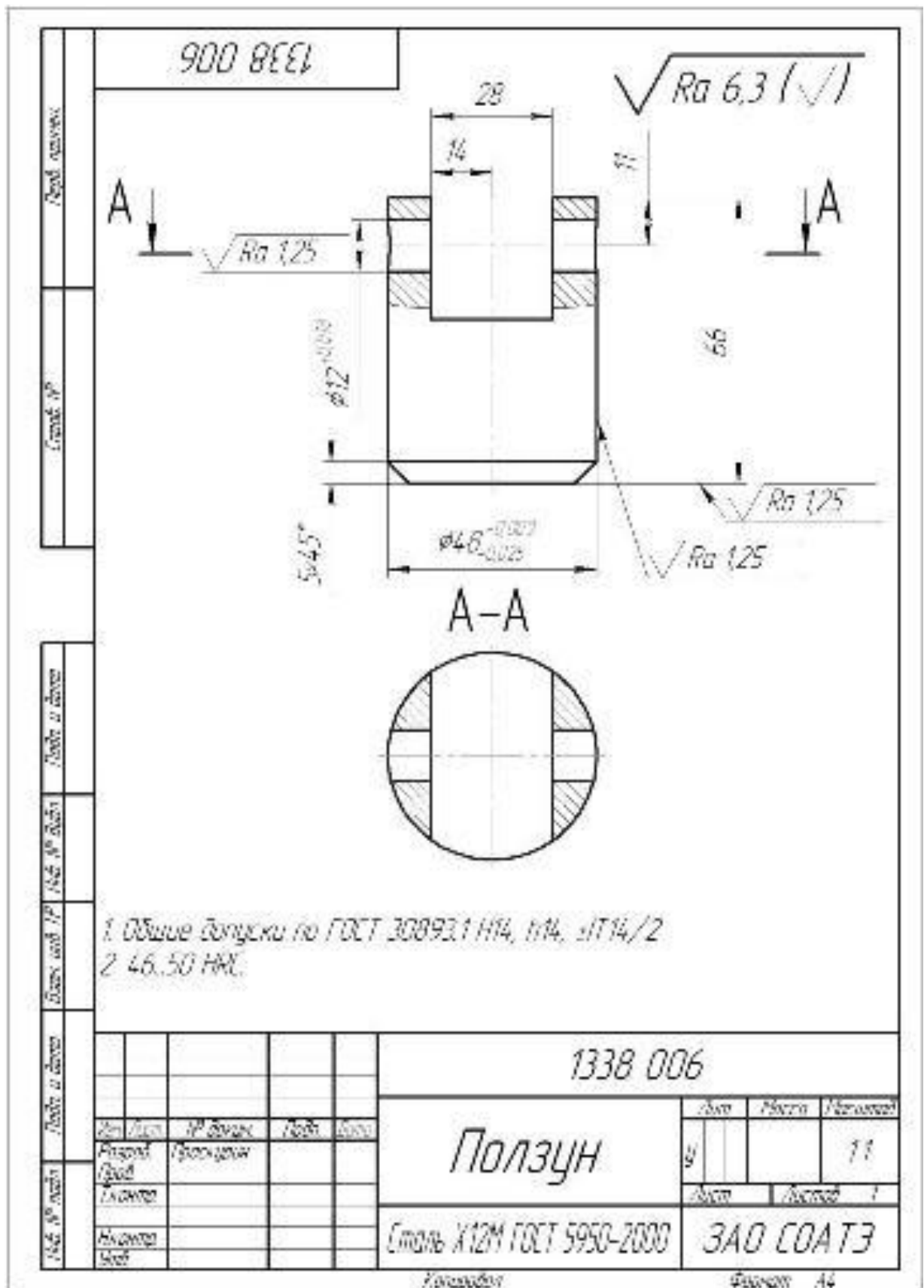


Рисунок 11. Деталь испытательного стенда. Ползун

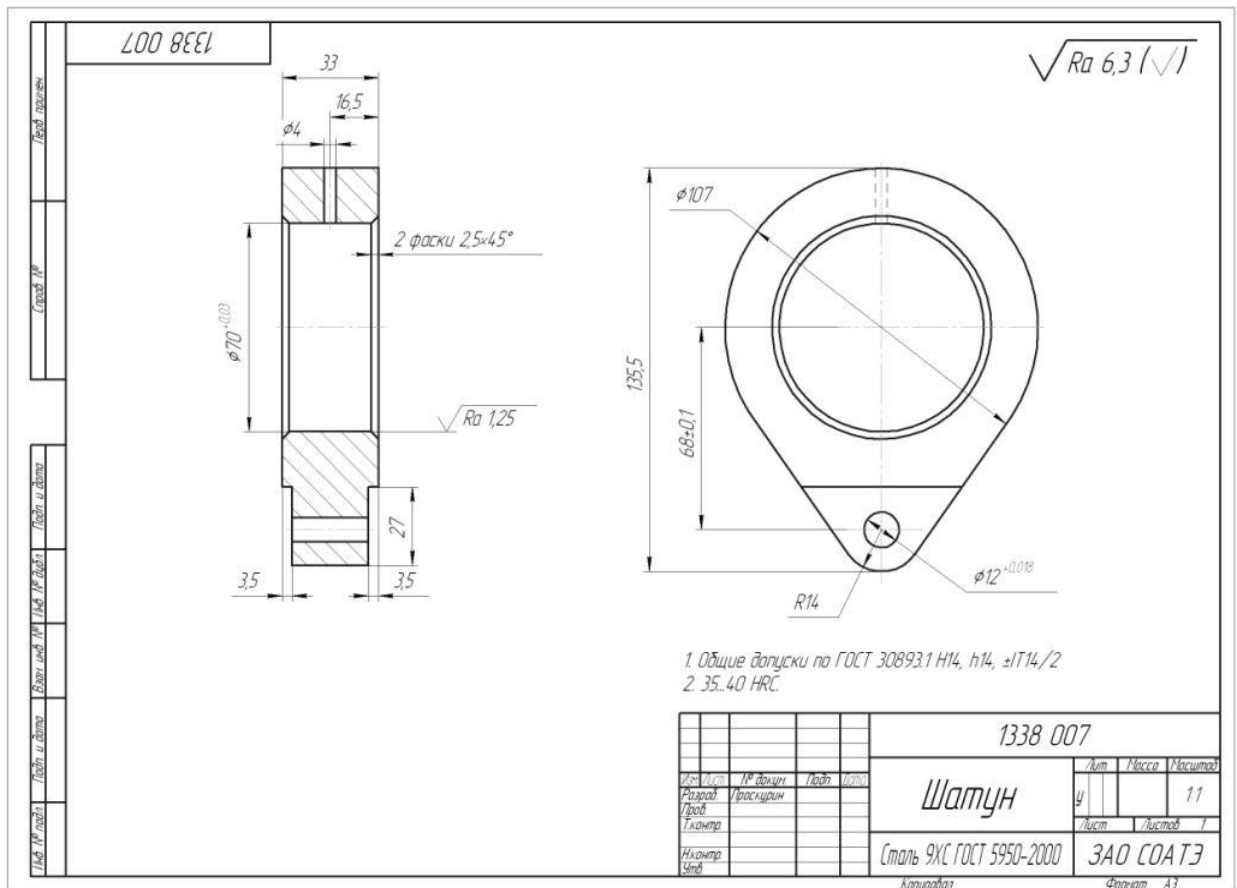


Рисунок 12. Деталь испытательного стенда. Шатун

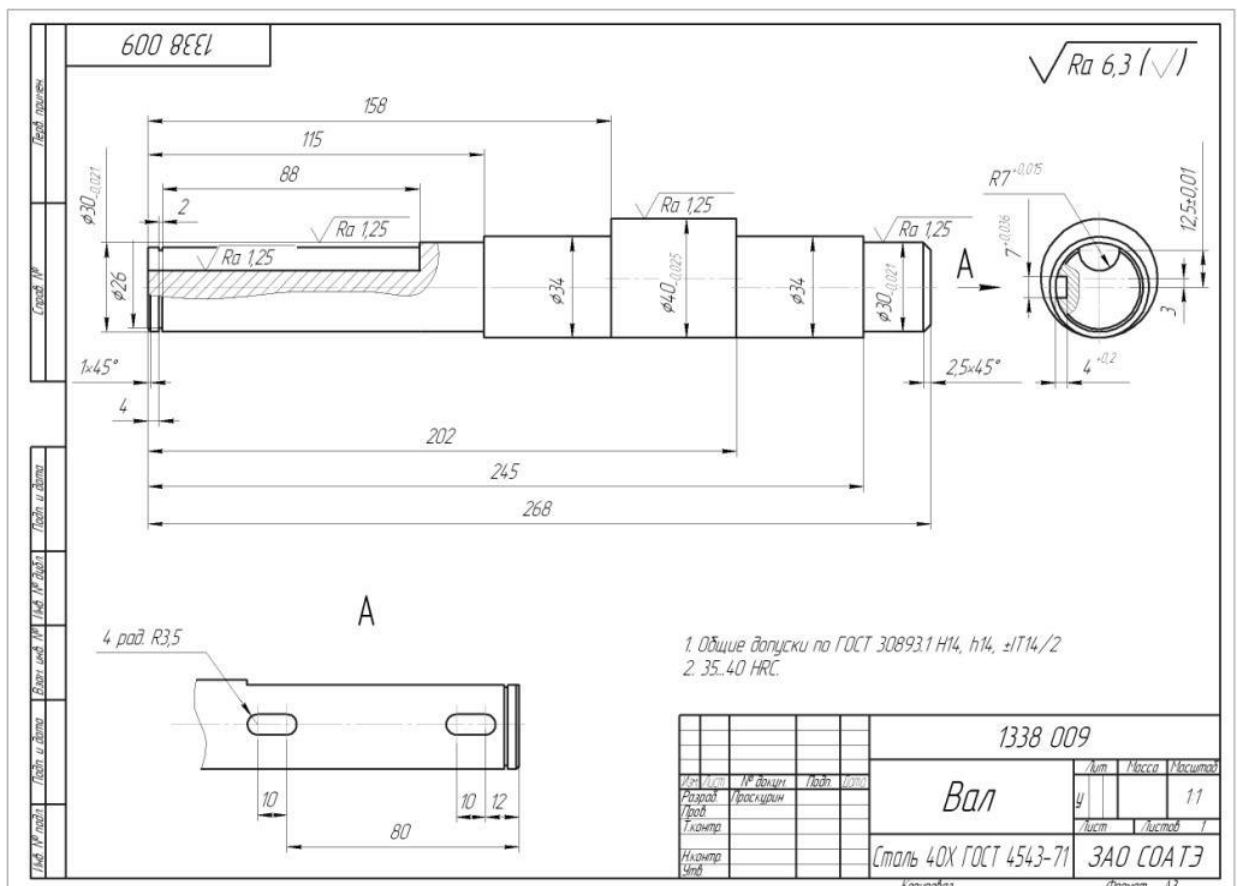


Рисунок 13. Деталь испытательного стенда. Вал

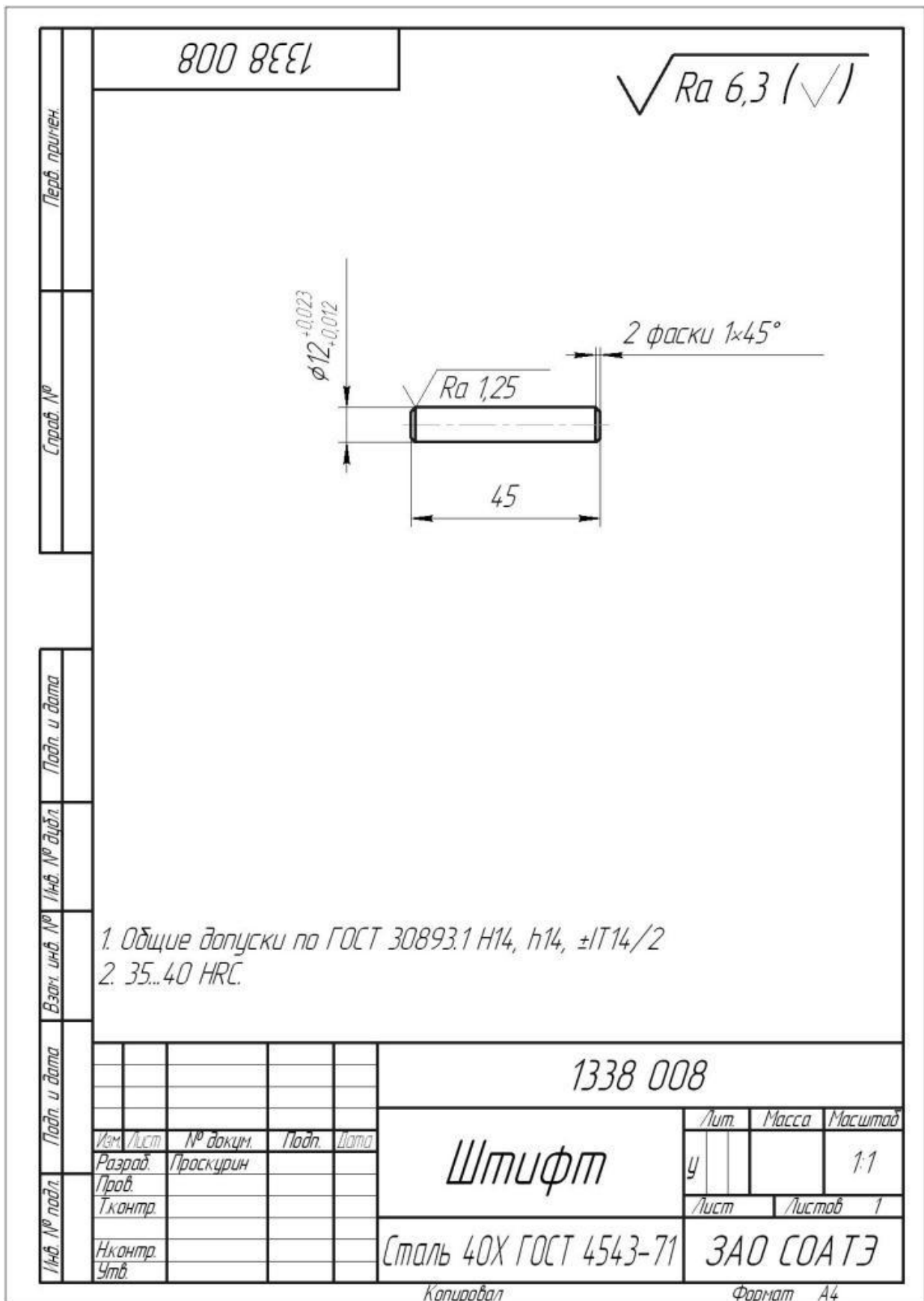


Рисунок 14. Деталь испытательного стенда. Штифт

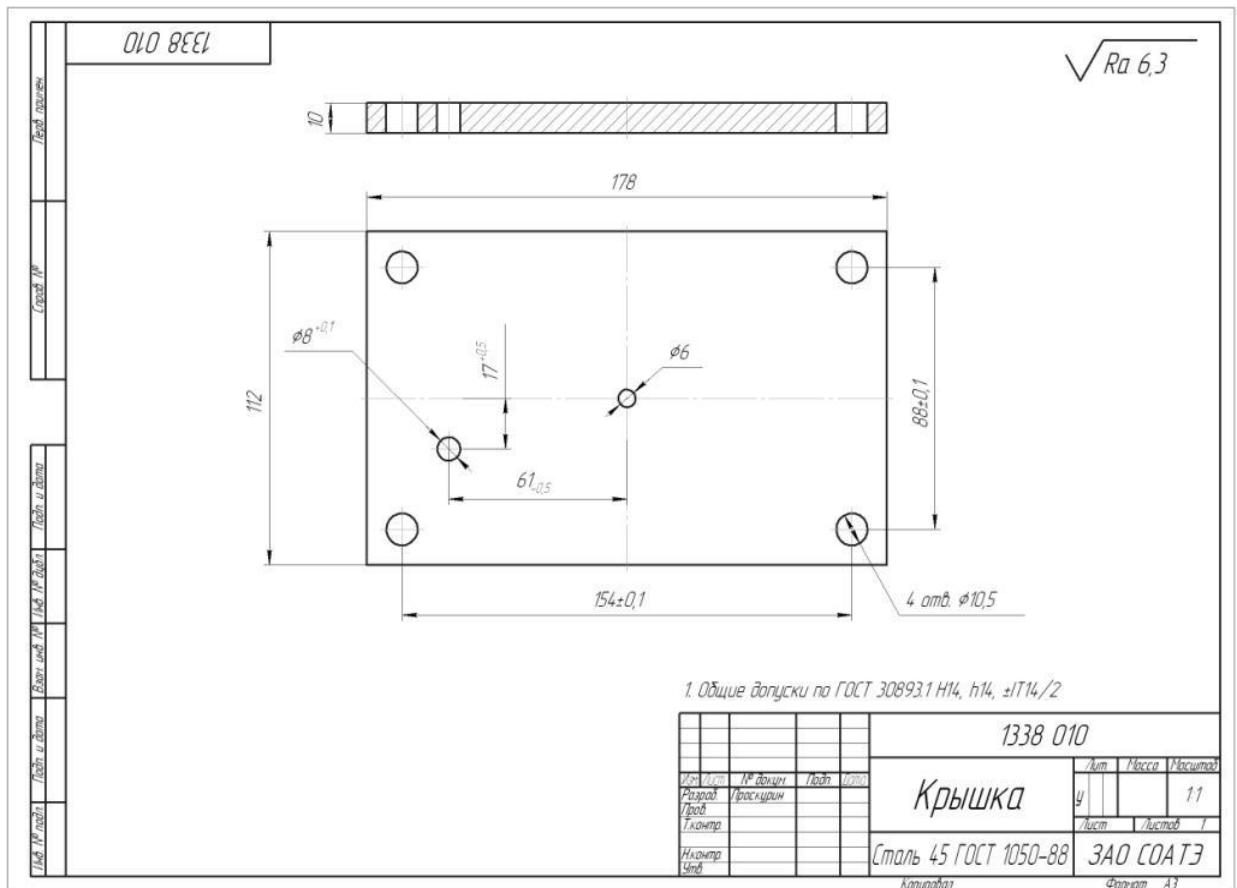


Рисунок 15. Деталь испытательного стенда. Крышка

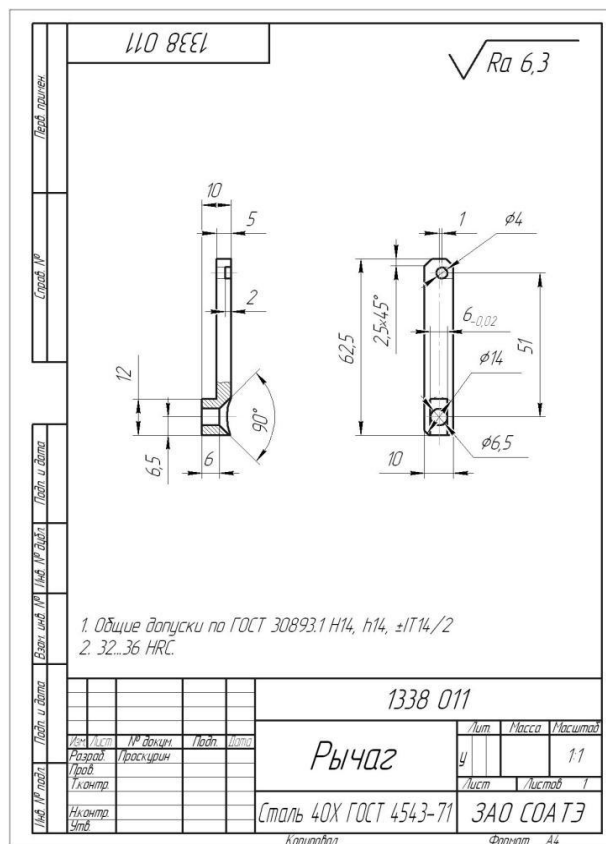


Рисунок 16. Деталь испытательного стенда. Рычаг

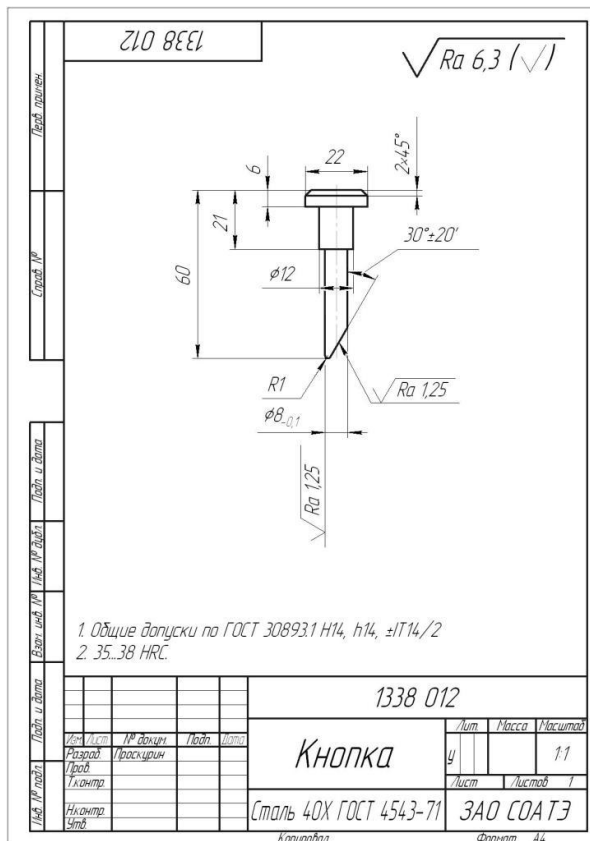


Рисунок 17. Деталь испытательного стенда. Кнопка

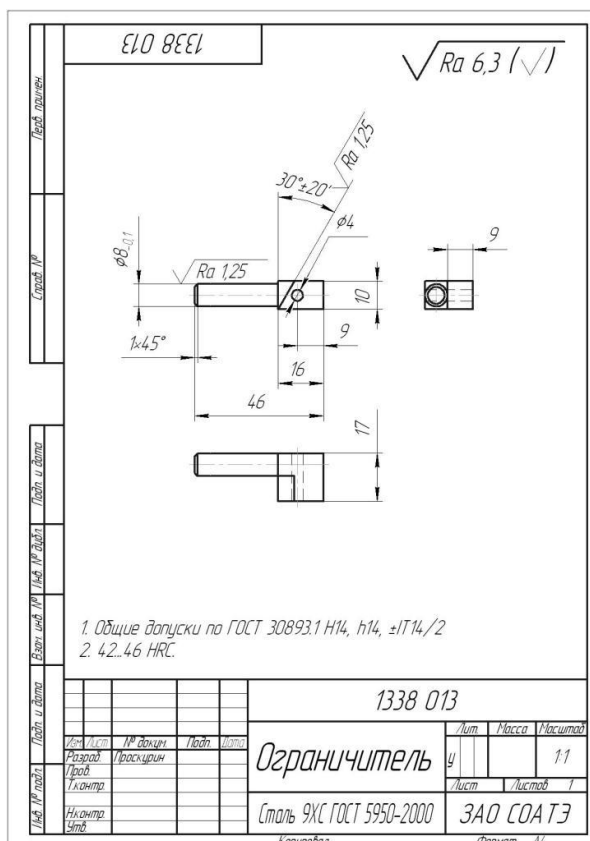


Рисунок 18. Деталь испытательного стенда. Ограничитель

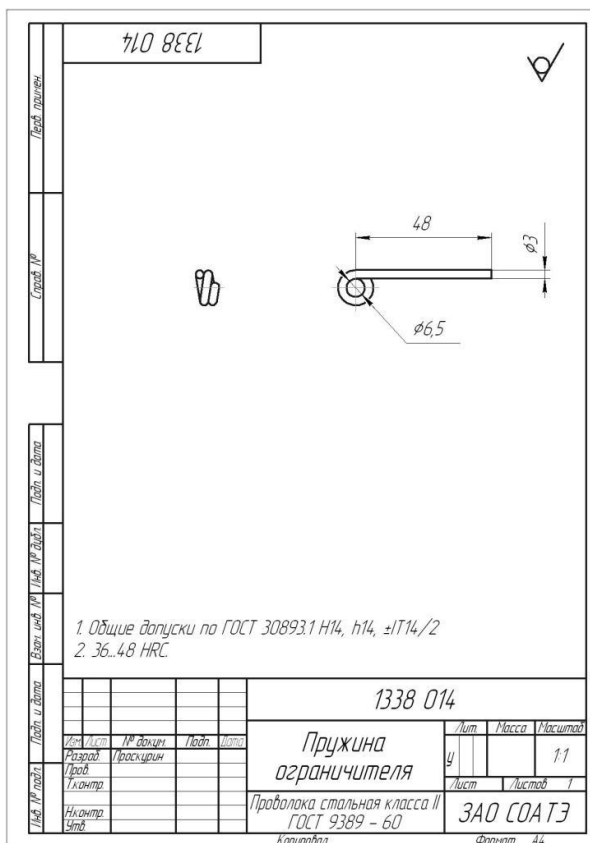


Рисунок 19. Деталь испытательного стенда. Пружина ограничителя

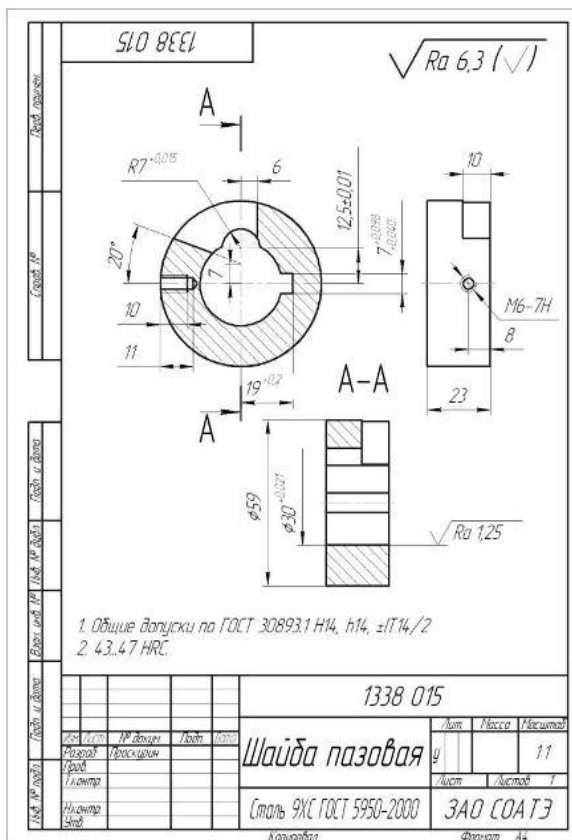


Рисунок 20. Деталь испытательного стенда. Шайба пазовая

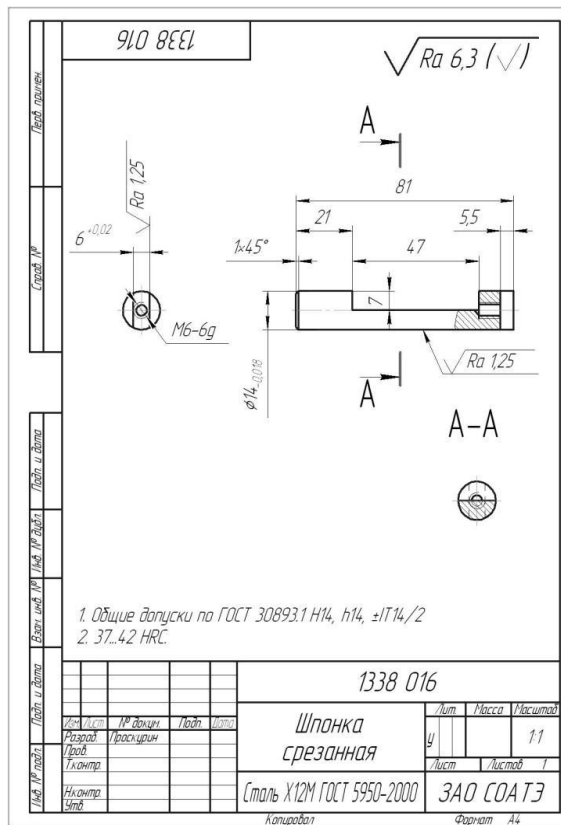


Рисунок 21. Деталь испытательного стенда. Шпонка срезанная

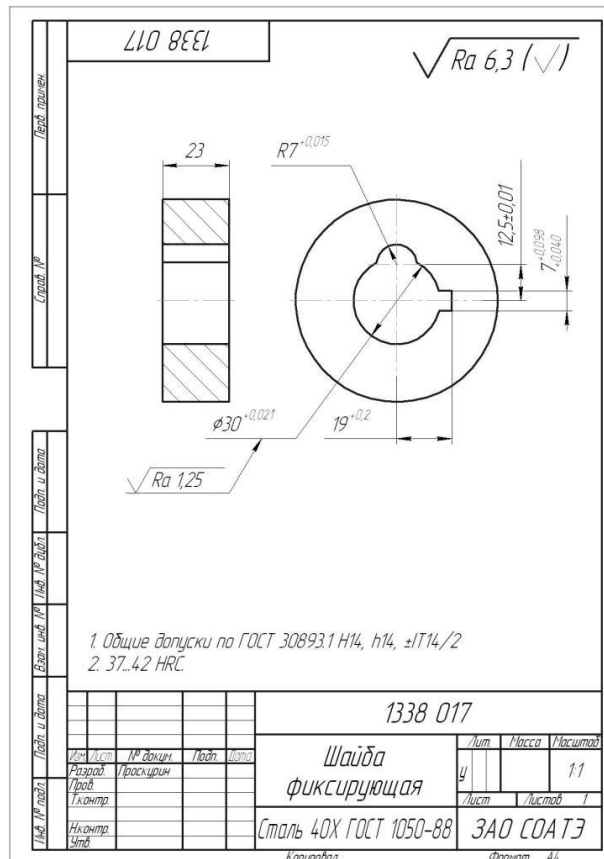


Рисунок 22. Деталь испытательного стенда. Шайба фикс

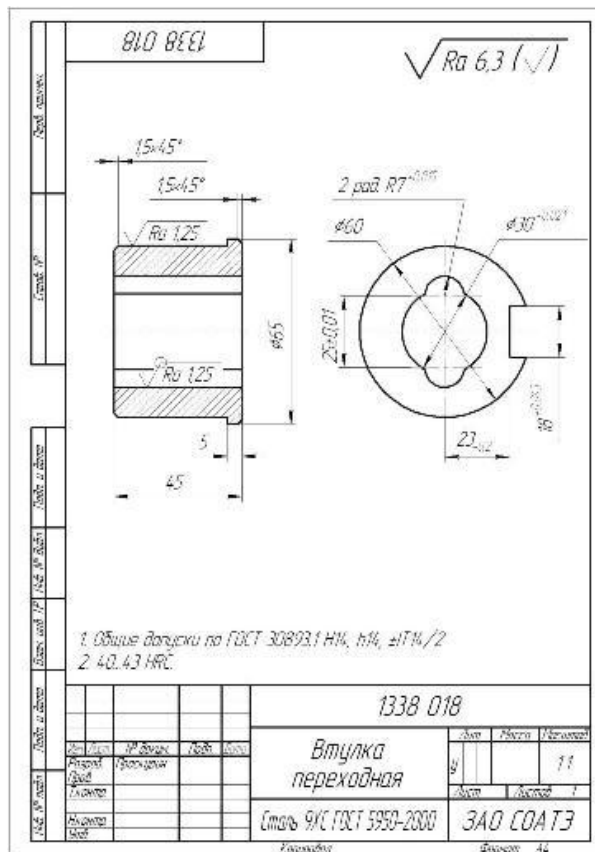


Рисунок 23. Деталь испытательного стенда. Втулка переходная

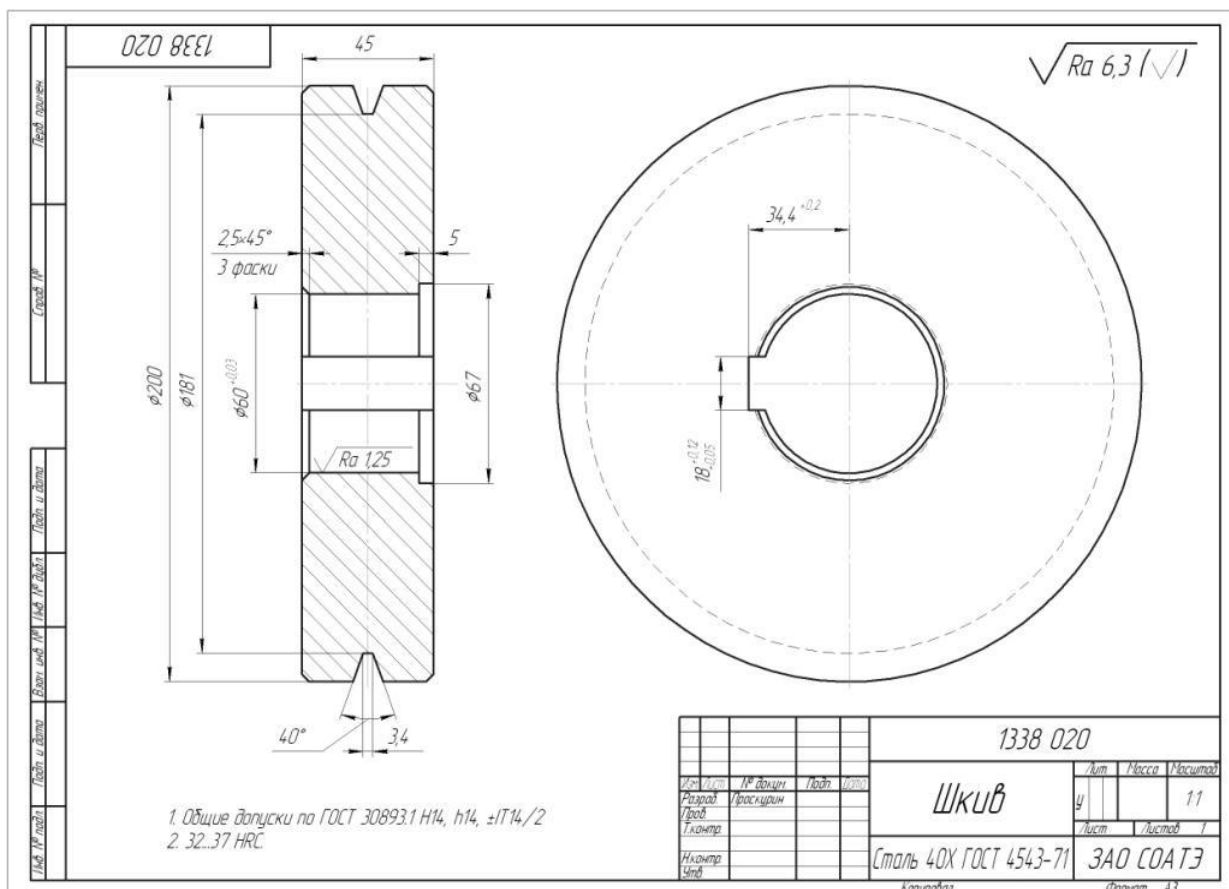


Рисунок 24. Деталь испытательного стенда. Шкив

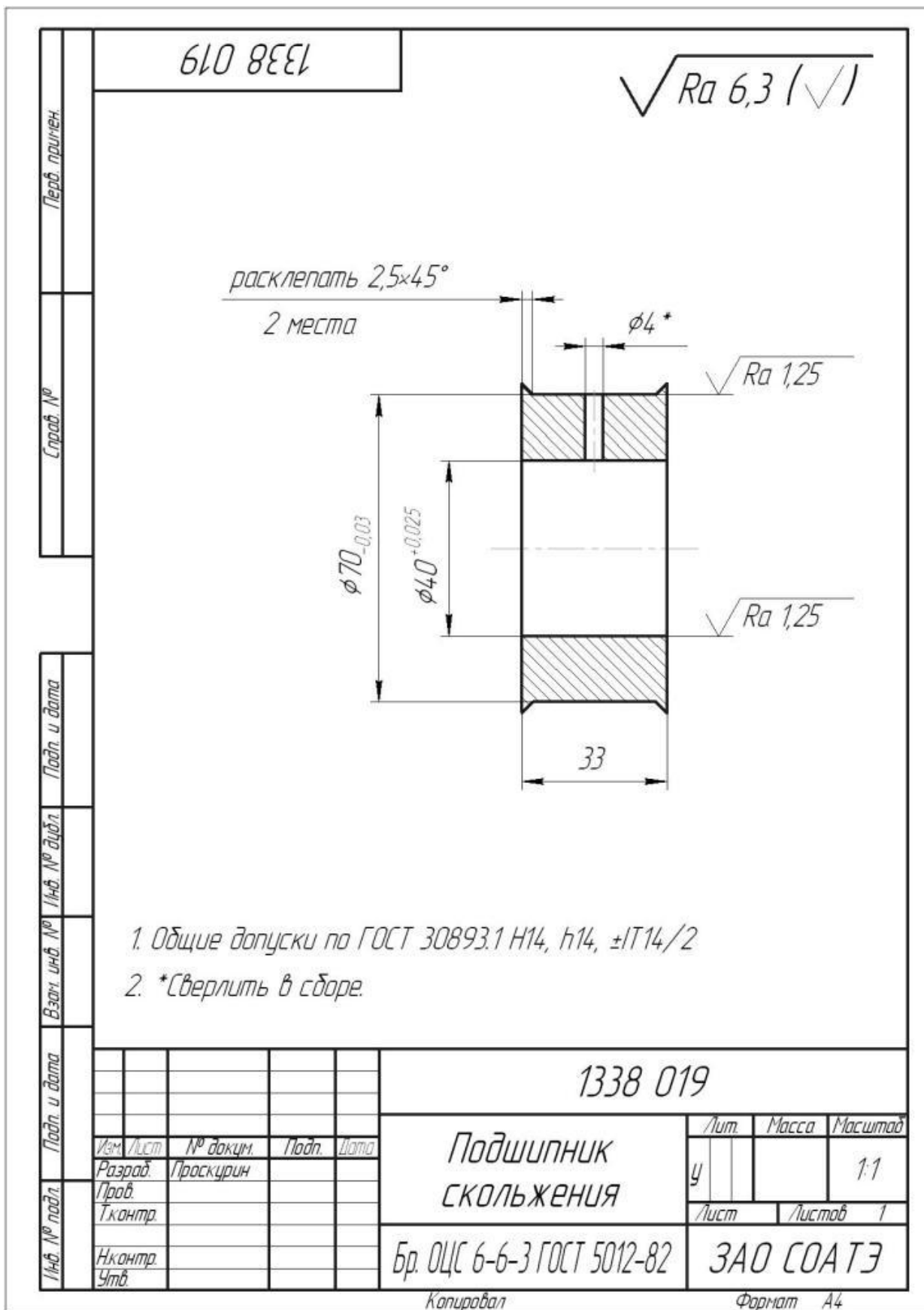


Рисунок 25. Деталь испытательного стенда. Подшипник скольжения

ПРИЛОЖЕНИЕ 6
КОНСТРУКТОРСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ОСНАСТКИ

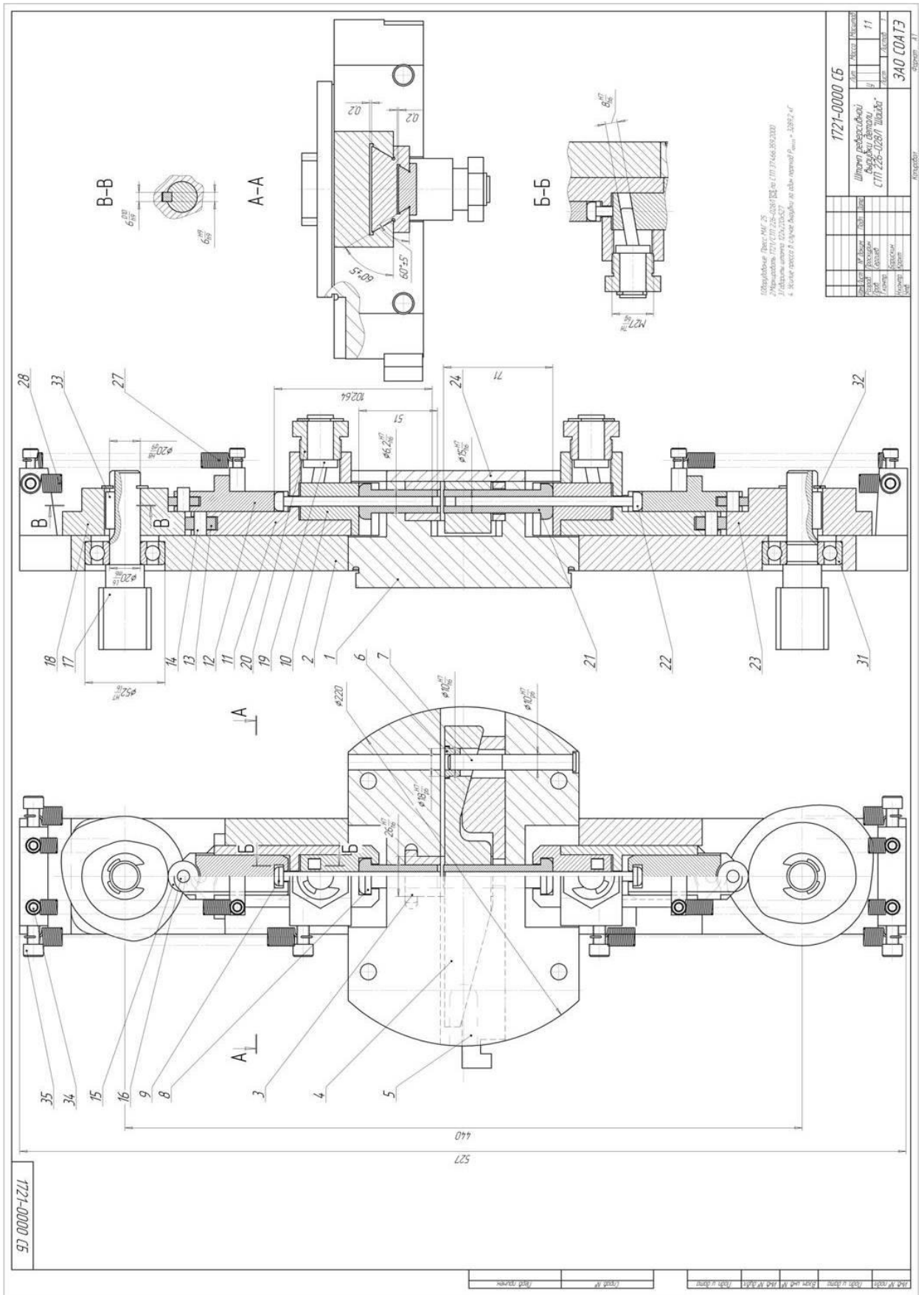


Рисунок 1. Сборочный чертеж экспериментальной установки

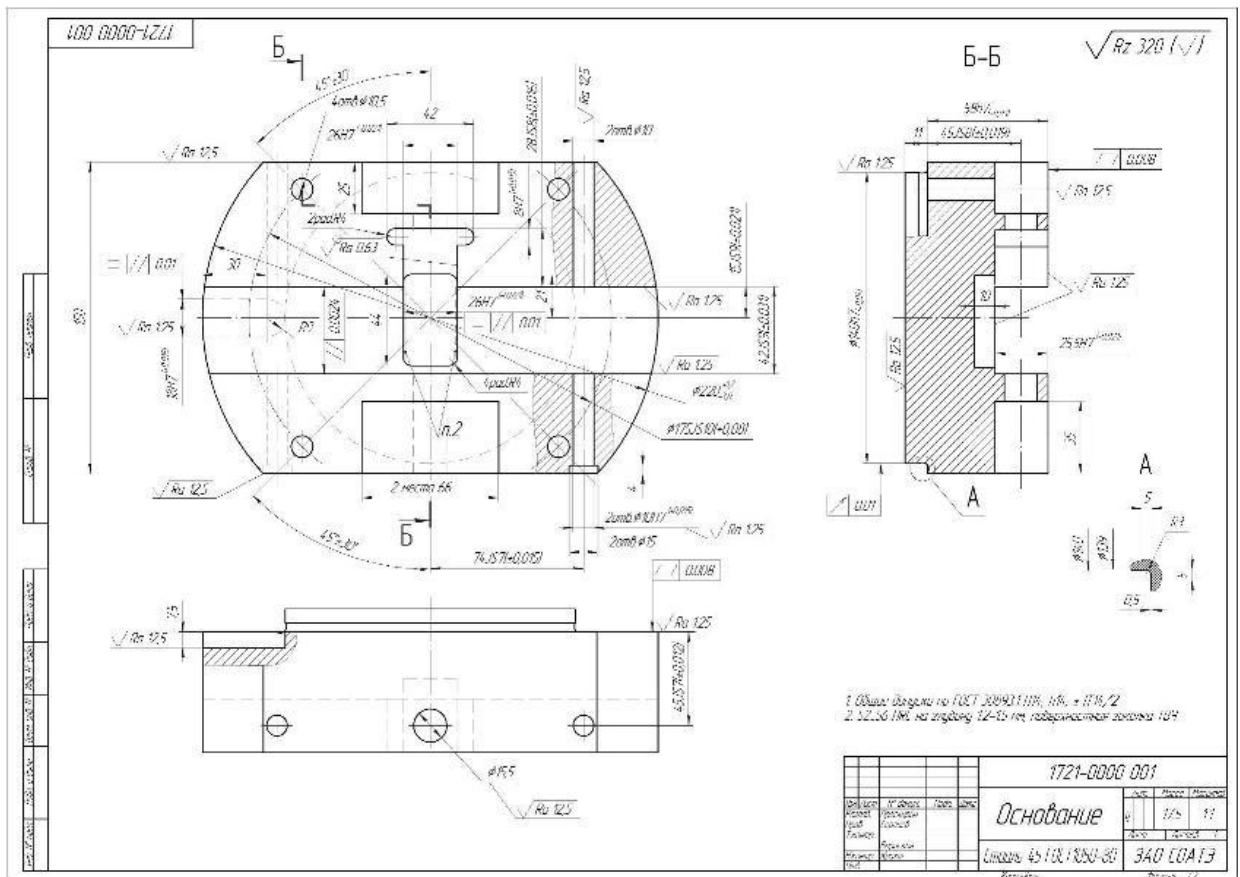


Рисунок 2. Деталь оснастки. Основание

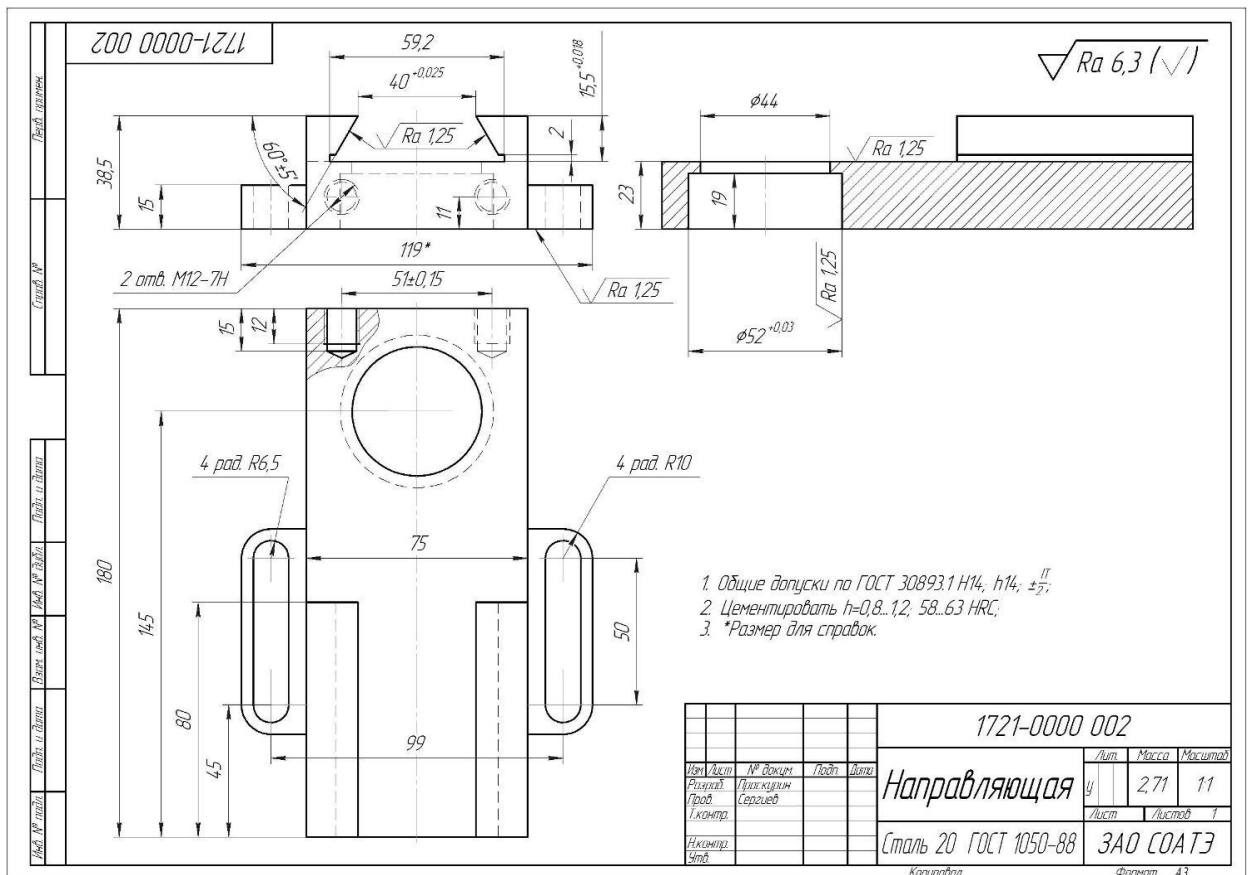


Рисунок 3. Деталь оснастки. Направляющая

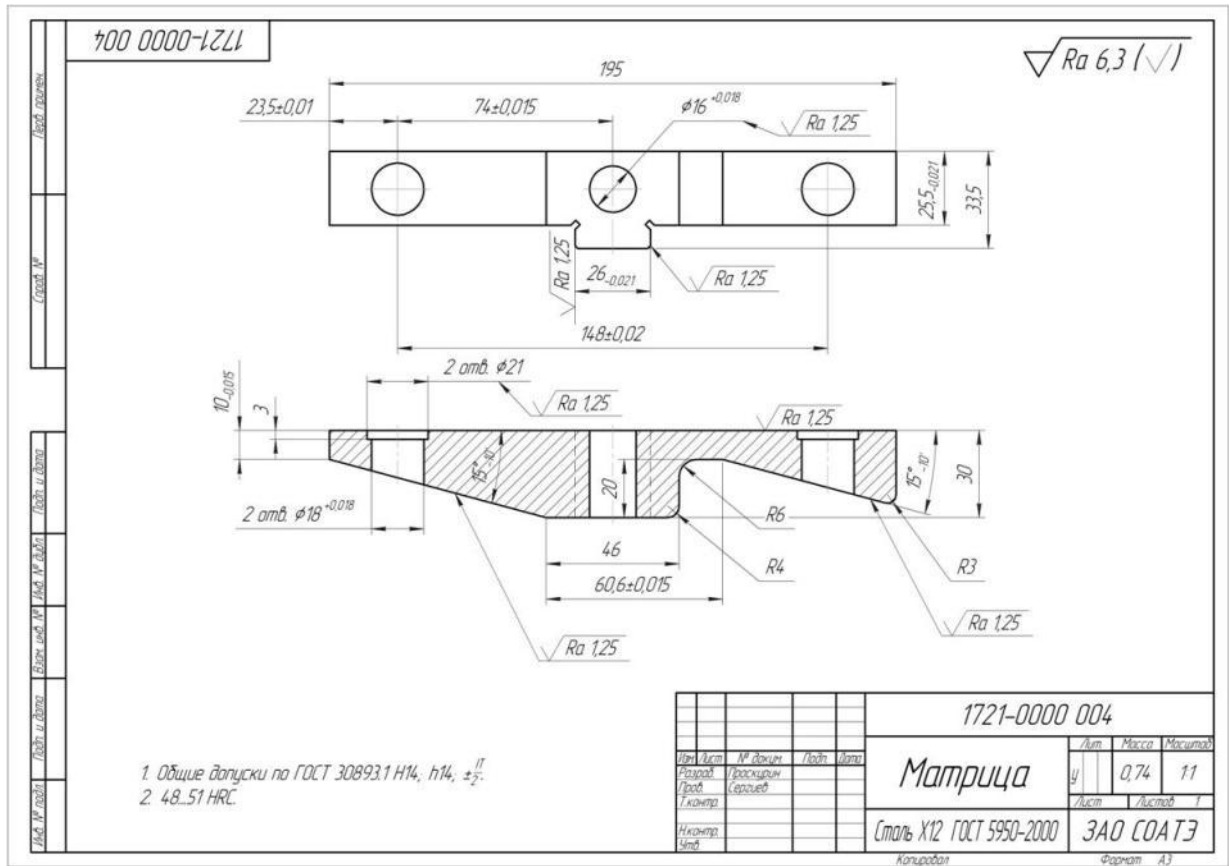


Рисунок 4. Деталь оснастки. Матрица

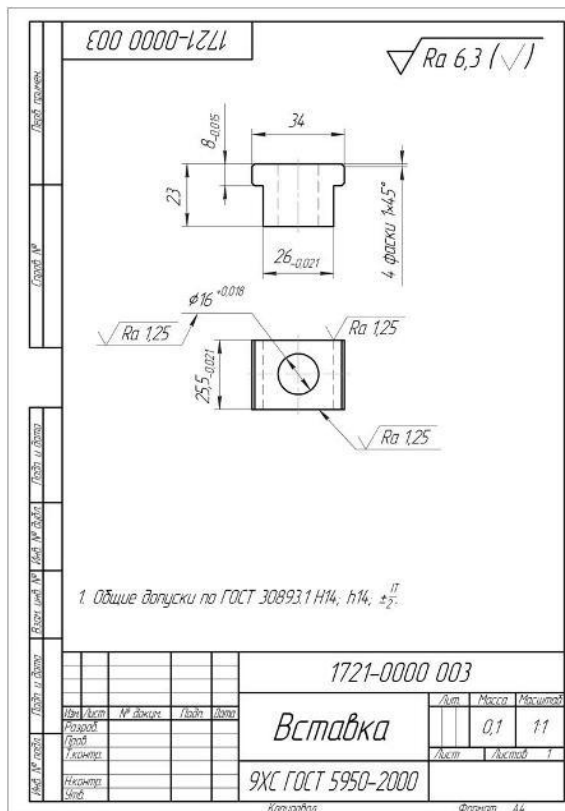


Рисунок 5. Деталь оснастки. Вставка

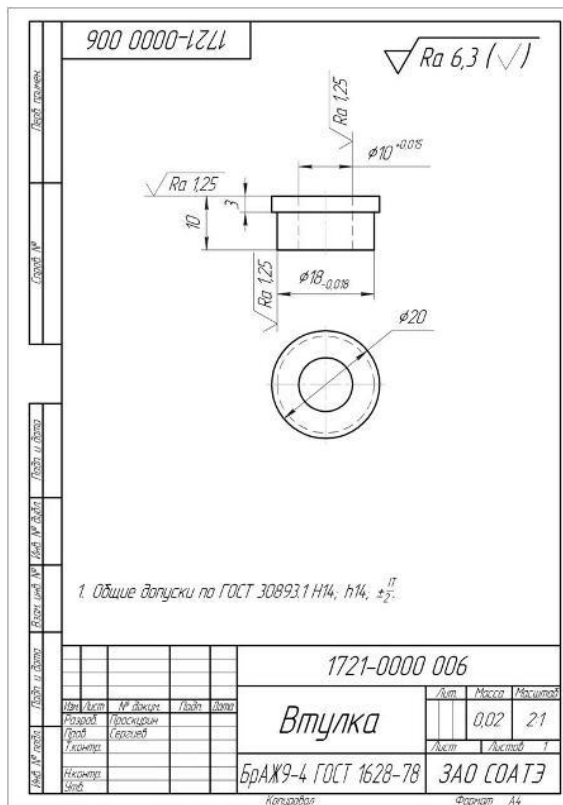


Рисунок 6. Деталь оснастки. Втулка

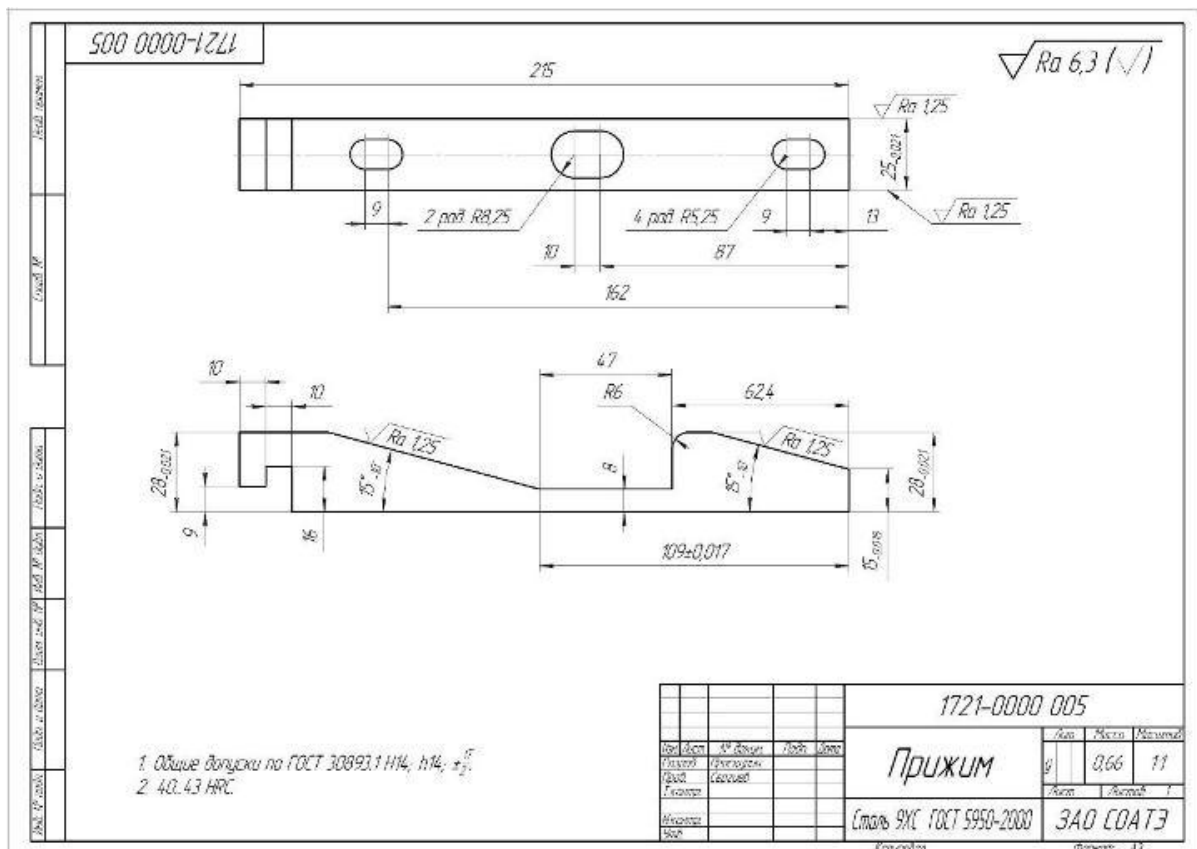


Рисунок 7. Деталь оснастки. Прижим

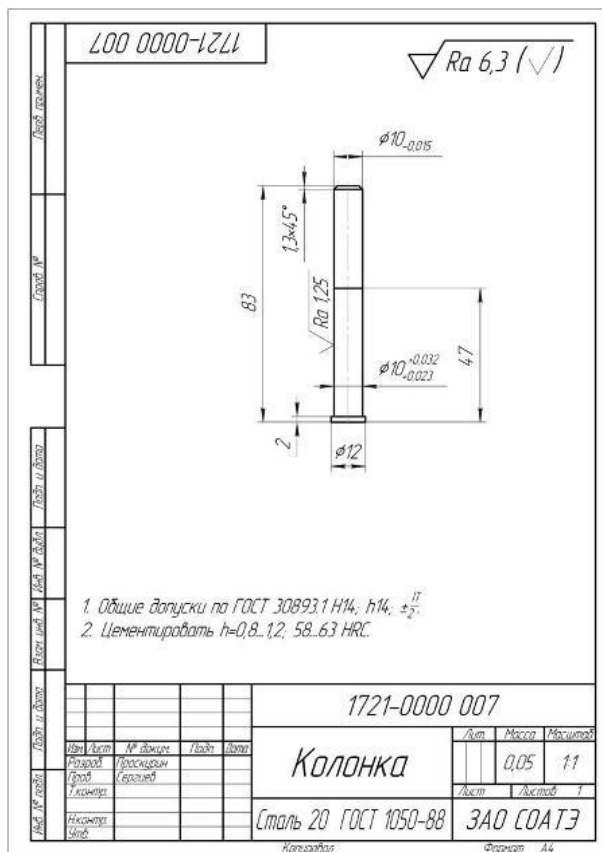


Рисунок 8. Деталь оснастки. Колонка

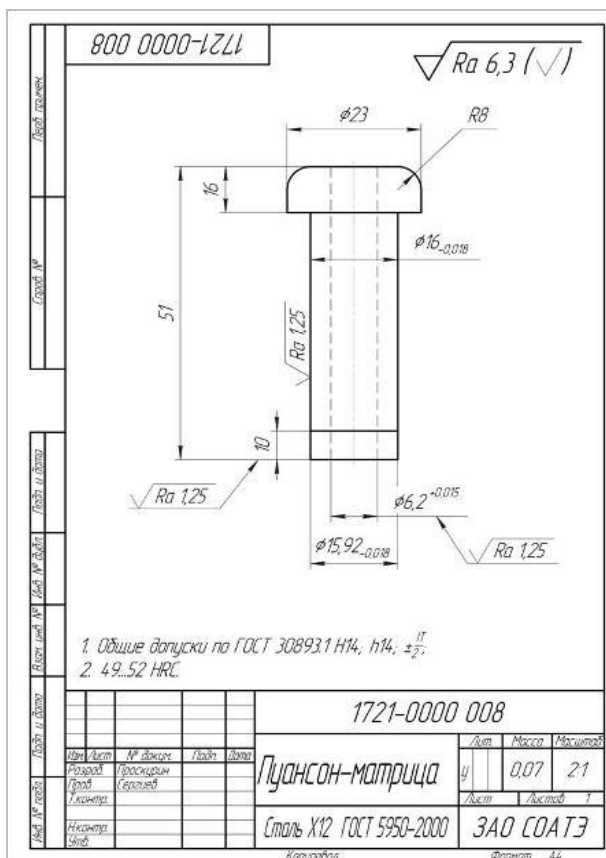


Рисунок 9. Деталь оснастки. Пуансон-матрица

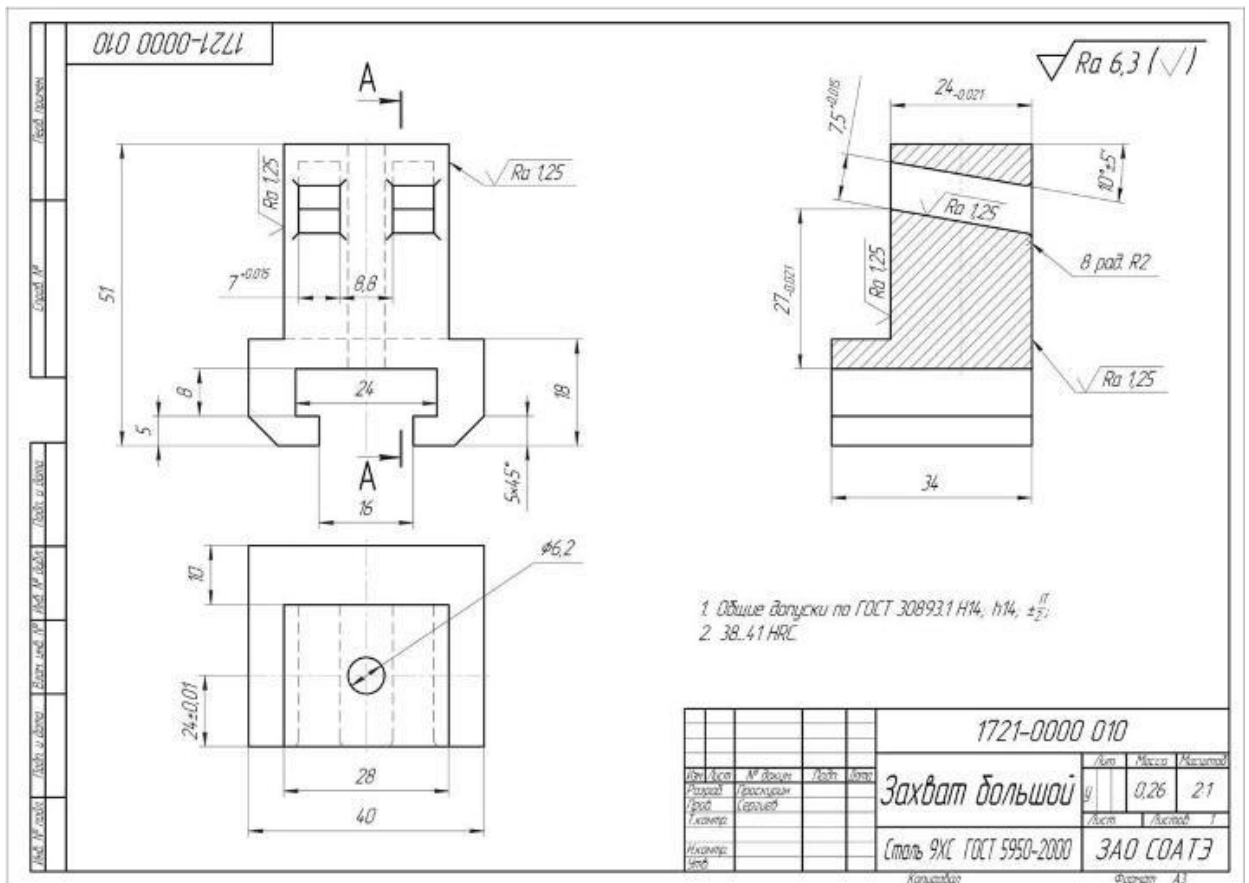


Рисунок 10. Деталь оснастки. Захват большой

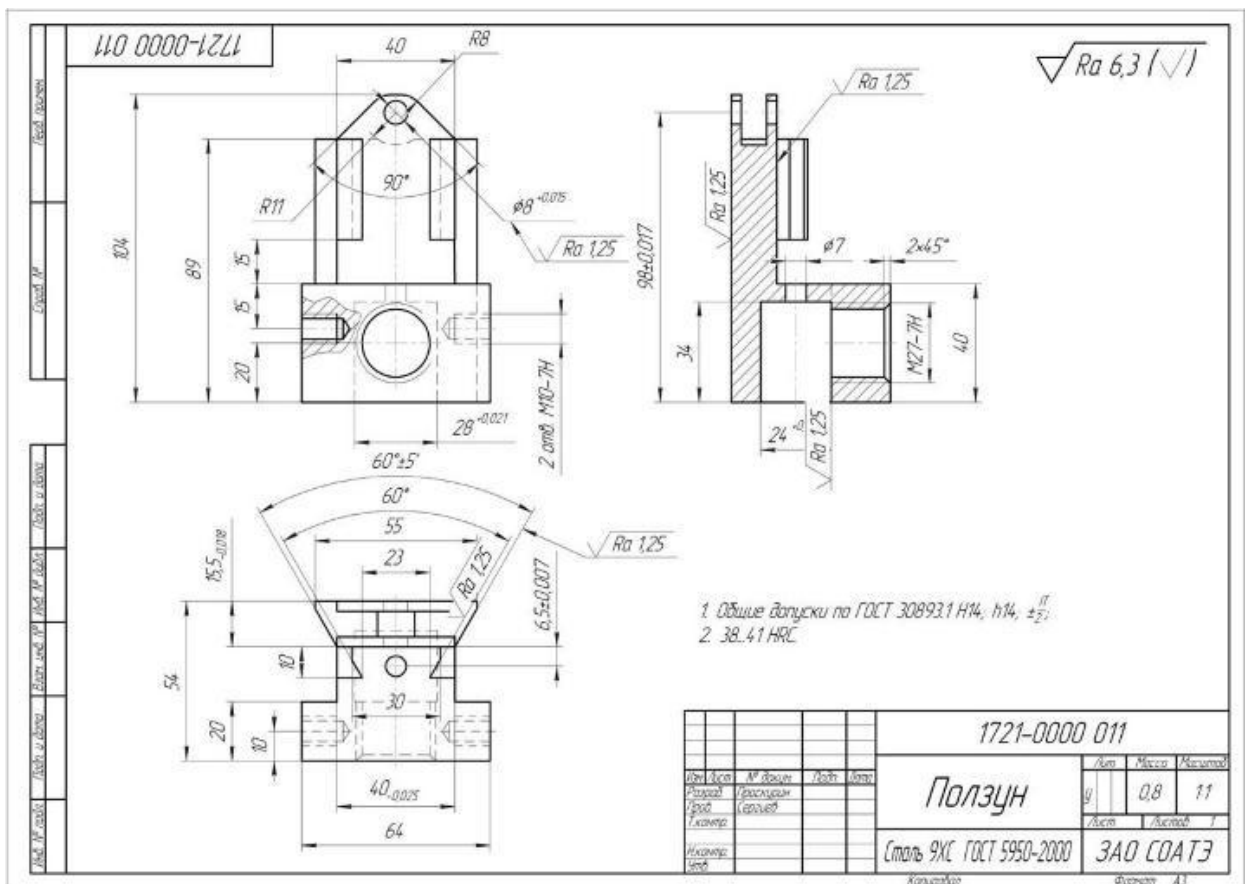


Рисунок 11. Деталь оснастки. Ползун

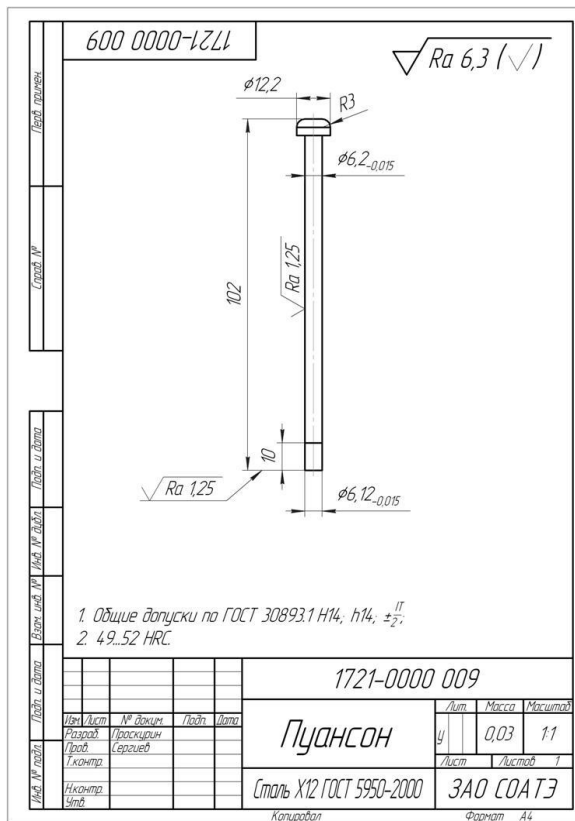


Рисунок 12. Деталь оснастки. Пуансон

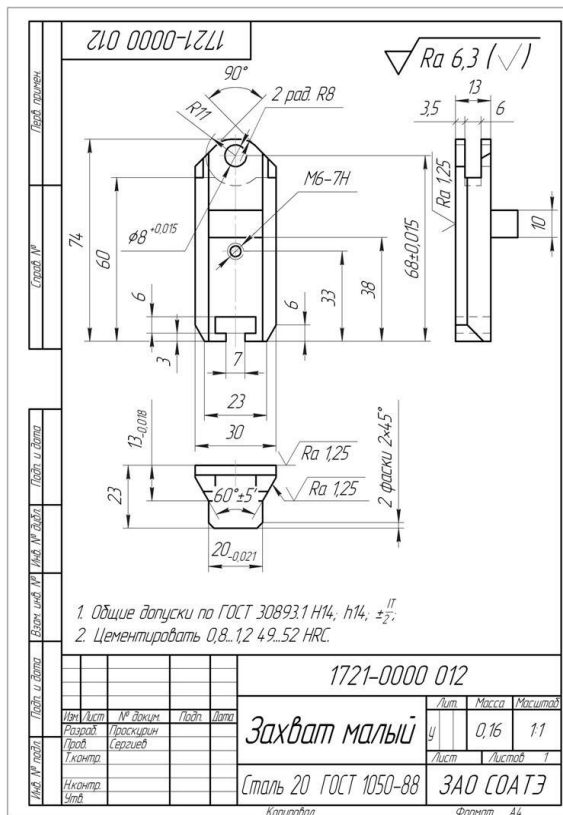


Рисунок 13. Деталь оснастки. Захват малый

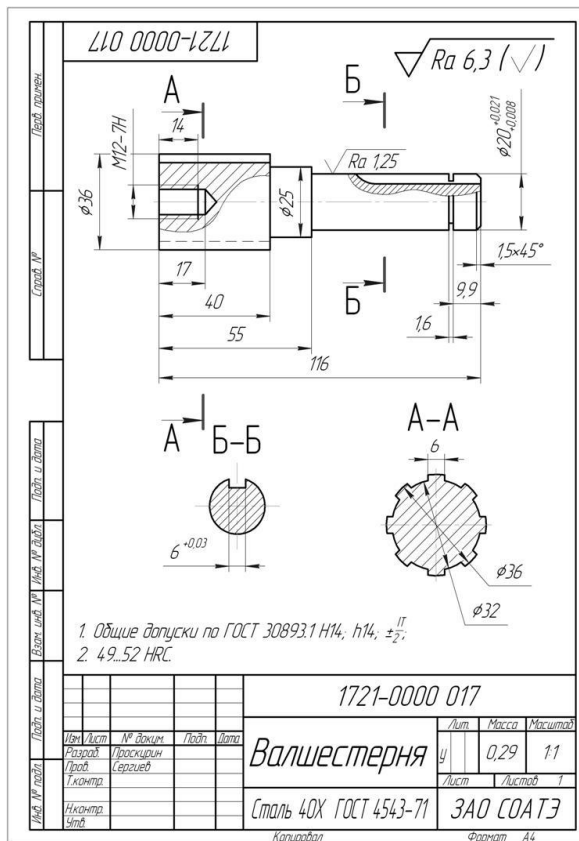


Рисунок 14. Деталь оснастки. Валшестерня

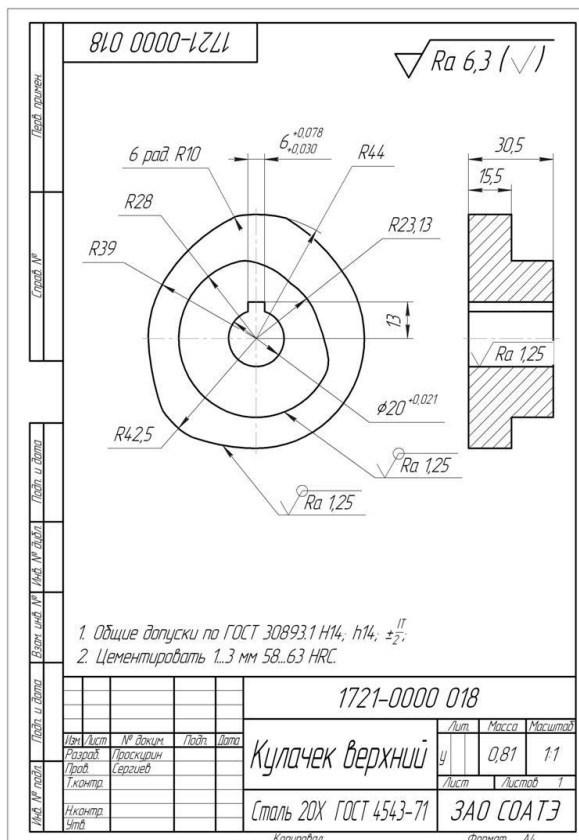


Рисунок 15. Деталь оснастки. Кулачек верхний

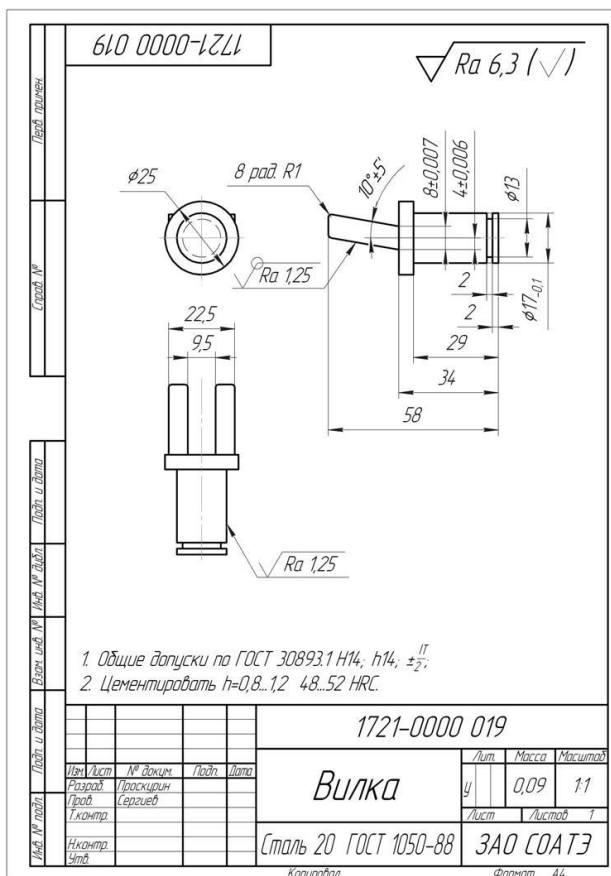


Рисунок 16. Деталь оснастки. Вилка

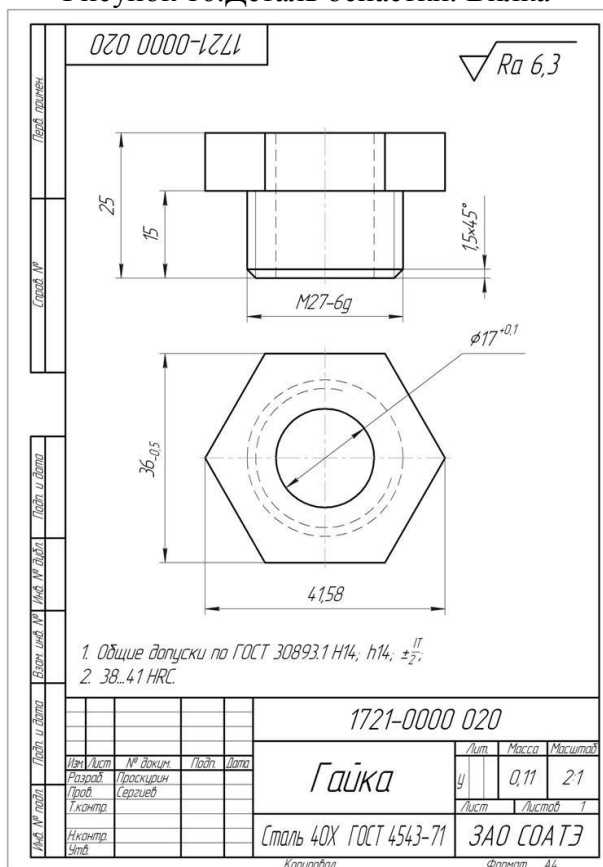


Рисунок 17. Деталь оснастки. Гайка

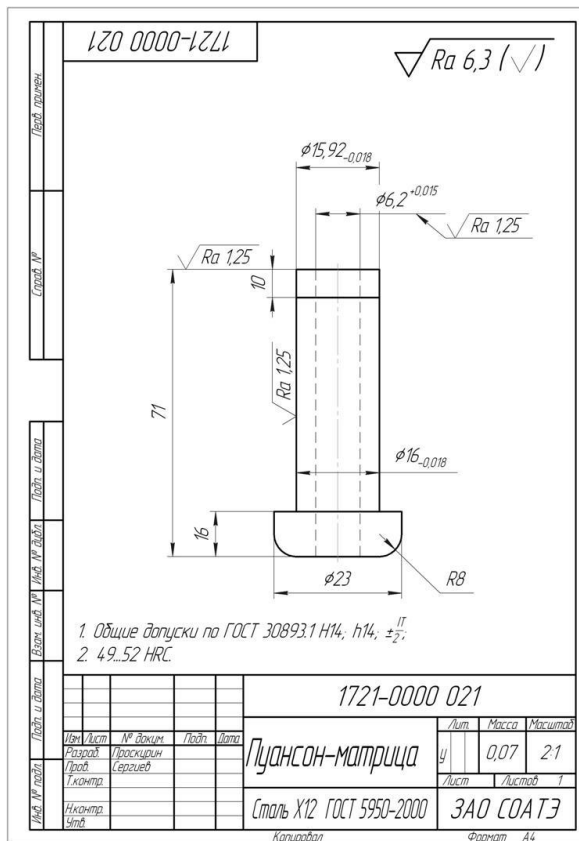


Рисунок 18. Деталь оснастки. Пуансон-матрица

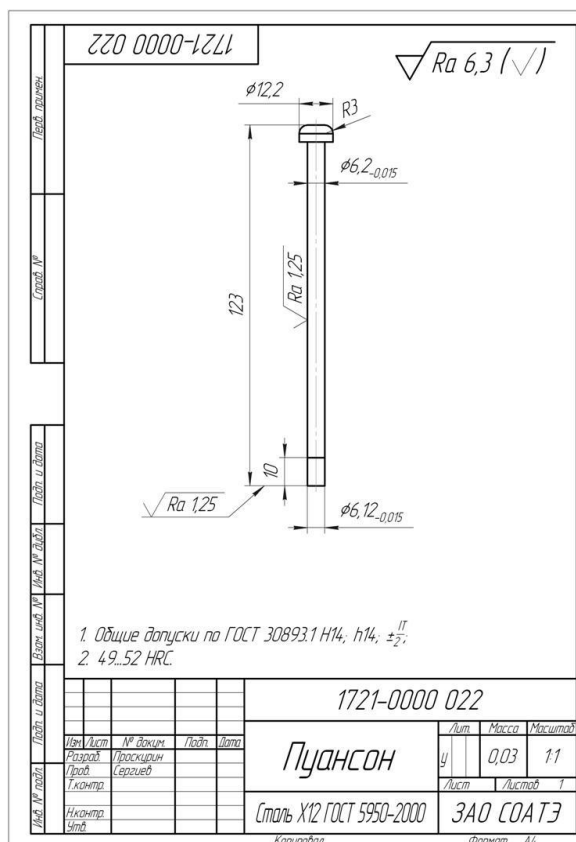


Рисунок 19. Деталь оснастки. Пуансон

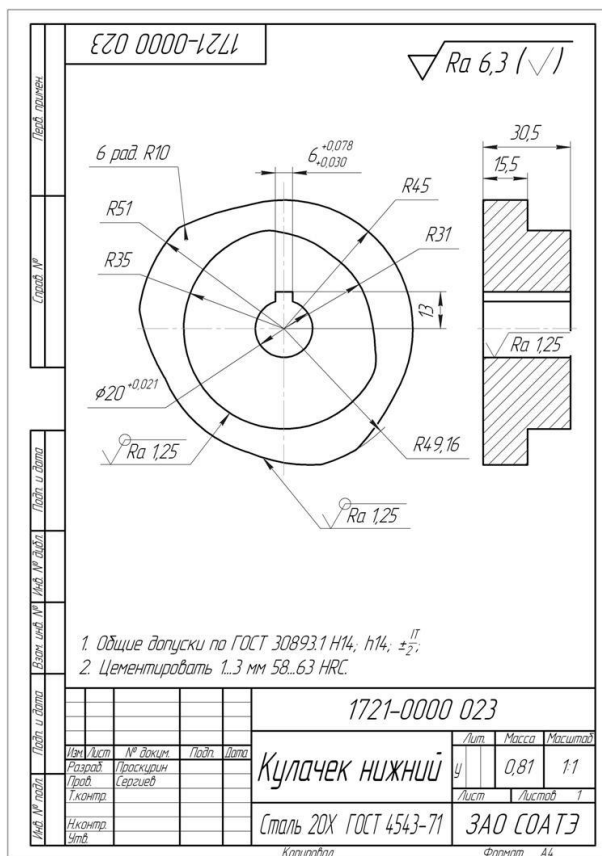


Рисунок 20. Деталь оснастки. Кулачек нижний

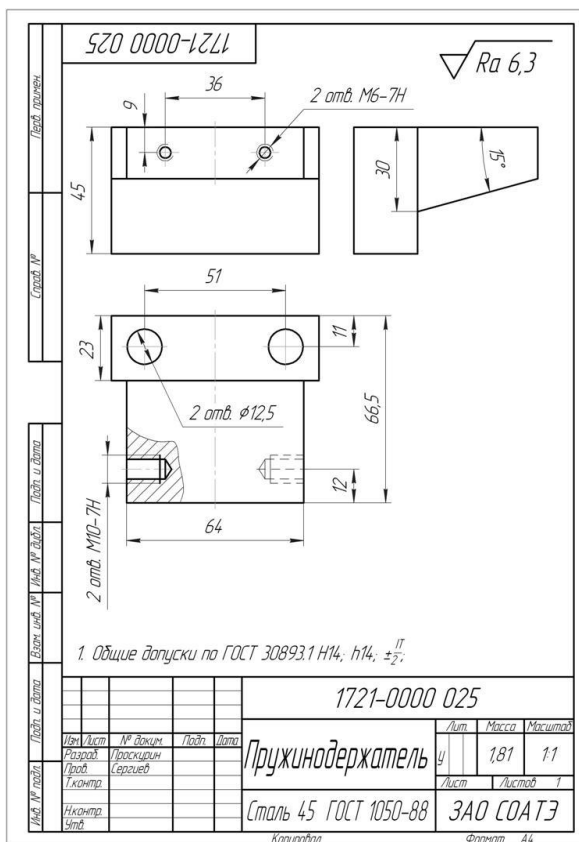


Рисунок 21. Деталь оснастки. Пружинодержатель

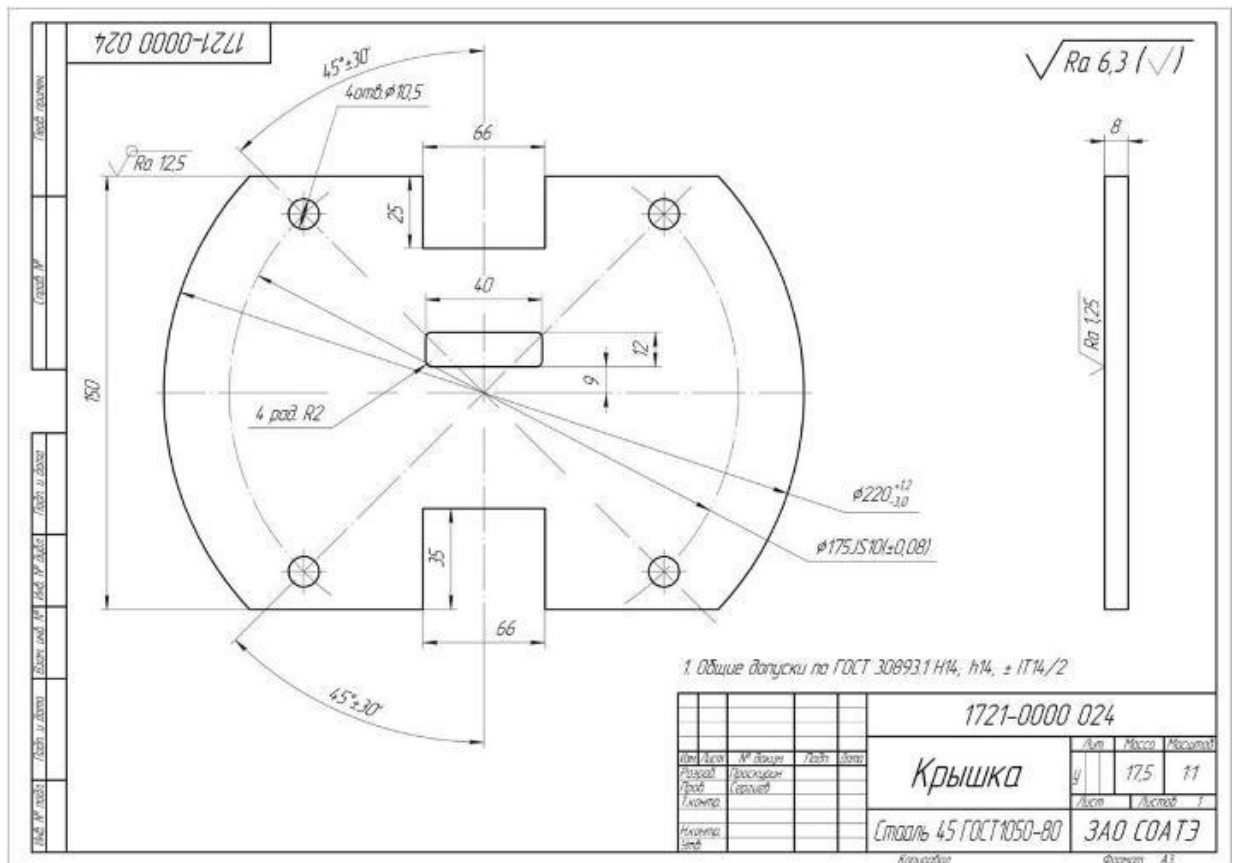


Рисунок 22. Деталь оснастки Крышка

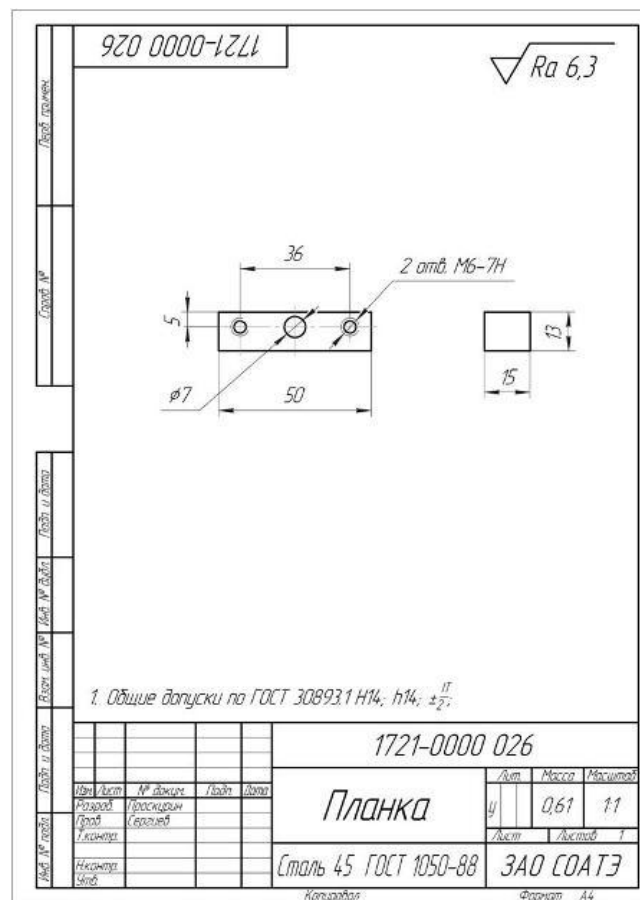


Рисунок 23. Деталь оснастки Планка

Коды	Вид	Лист	Лист	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание	
								Лист
<i>Документация</i>								
1721-0000	А1			1721-0000 СБ	Сборочный чертеж			
	<i>Детали</i>							
	А2	1		1721-0000 001	Основание	1		
	А2	2		1721-0000 002	Направляющая	2		
	А2	3		1721-0000 003	Вставка	1		
	А2	4		1721-0000 004	Матрица	1		
	А2	5		1721-0000 005	Пружин	1		
	А2	6		1721-0000 006	Втулка	2		
	А2	7		1721-0000 007	Колонка	2		
	А2	8		1721-0000 008	Плансон - матрица	1		
	А2	9		1721-0000 009	Плансон	1		
	А2	10		1721-0000 010	Захват большой	2		
	А2	11		1721-0000 011	Ползун	2		
	А2	12		1721-0000 012	Захват малый	2		
	А2	13		1721-0000 013	Ролик	2		
	А2	14		1721-0000 014	Штифт	2		
	А2	15		1721-0000 015	Ролик	2		
	А2	16		1721-0000 016	Штифт	2		
	А2	17		1721-0000 017	Вал-шестерня	2		
	А2	18		1721-0000 018	Кулачок верхний	1		
А2	19		1721-0000 019	Вилка	2			
А2	20		1721-0000 020	Гайка	2			

1721-0000 СБ
 Штмпн реверсивной
 вырубкой детали
 С111 226-028/1 "Шайба"
 Категория: Формат: А4

Рисунок 24. Спецификация лист 1

Коды	Вид	Лист	Лист	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
<i>Стандартные изделия</i>							
1721-0000	А3	21		1721-0000 021	Плансон - матрица	1	
	А3	22		1721-0000 022	Плансон	1	
	А3	23		1721-0000 023	Кулачок нижний	1	
	А3	24		1721-0000 024	Крышка	1	
	А3	25		1721-0000 025	Пружинодержатель	2	
	А3	26		1721-0000 026	Планка	2	
	А3	27		1721-0000 027	Пружина $\varnothing 10 \times 15 \times 132$	4	
	А3	28		1721-0000 028	Пружина $\varnothing 12 \times 15 \times 160$	4	
	А3	30			Болт М10х90 ГОСТ 7798-70	4	
	А3	31			Подшипник 304 ГОСТ 8338-75	2	
	А3	32			Шайба стопорная $\varnothing 16-20$ ГОСТ 11648-75	4	
	А3	33			Шпона 6х120 ГОСТ 23360-76	2	
	А3	34			Вилка М6 х 12 ГОСТ 11738-84	8	
	А3	35			Вилка М8 х 16 ГОСТ 11738-84	8	

1721-0000 СБ
 Категория: Формат: А4

Рисунок 25. Спецификация лист 2