

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Магнитогорский государственный технический  
университет им. Г.И. Носова»

На правах рукописи

ГАЛИАХМЕТОВ Тимур Шамилович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
СТЕРЖНЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ С ШЕСТИГРАННОЙ ГОЛОВКОЙ ИЗ  
НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ В  
СИСТЕМЕ «ЗАГОТОВКА-ИНСТРУМЕНТ»**

Специальность 05.02.09 - Технологии и машины обработки давлением

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор Железков  
Олег Сергеевич

Магнитогорск – 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. НЕРЖАВЕЮЩИЕ СТАЛИ. СТЕРЖНЕВЫЕ ИЗДЕЛИЯ С ГОЛОВКАМИ ШЕСТИГРАННОЙ ФОРМЫ: КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ.....	9
1.1. Нержавеющие стали, применяемые при изготовлении крепежных изделий.....	9
1.2. Конструкции резьбовых стержневых изделий и технологии их изготовления.....	12
1.3. Технологическое оборудование для изготовления стержневых крепежных изделий холодной штамповкой.....	28
1.4. Задачи исследования.....	35
2. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРЯЧЕКАТАНОГО И КАЛИБРОВАННОГО МЕТАЛЛОВ. ПОИСК РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ПОДГОТОВКИ К ШТАМПОВКЕ И ЭФФЕКТИВНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	37
2.1. Испытания горячекатаного и калиброванного металла. Кривые упрочнения.....	37
2.2. Поиск эффективных смазочных материалов и подсмазочных покрытий для штамповки стержневых крепежных изделий из нержавеющей сталей.....	47
2.3. Исследование процесса отрезки заготовок и оценка качества реза....	57
2.4. Выводы по главе 2.....	60
3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ШЕСТИГРАННЫХ ГОЛОВОК БОЛТОВ И ВИНТОВ.....	62
3.1. Основные положения метода конечных элементов и программного комплекса «DEFORM-3D».....	62
3.2. Моделирование процесса обрезки головки на шестигранник.....	69

3.3. Оценка влияния формы и размеров торцевой лунки на прочность соединения головки со стержнем.....	80
3.4. Моделирование процесса безоблойной штамповки шестигранной головки с торцевой лункой различной формы.....	93
3.5. Выводы по главе 3.....	99
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОИСК РАЦИОНАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ. ПРОМЫШЛЕННОЕ ОПРОБОВАНИЕ.....	100
4.1. Экспериментальные исследования основных переходов штамповки шестигранных головок стержневых изделий.....	100
4.2. Применение комплексного критериального подхода для поиска рационального процесса изготовления болтов и винтов с шестигранными головками.....	119
4.3. Разработка и промышленное опробование технологии изготовления винтов из нержавеющей стали.....	128
4.4. Выводы по главе 4.....	131
Заключение.....	134
Список литературы.....	137
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	150

## **ВВЕДЕНИЕ**

Стержневые крепежные изделия (болты, винты, шурупы, заклепки, гвозди и т.п.) в количественном выражении являются наиболее массовыми деталями, которые находят широкое применение в различных отраслях промышленности.

Крепеж из коррозионностойких сталей используются в атомной энергетике, нефтяной и газовой промышленности, авиа- и судостроении, медицинской технике, пищевой промышленности и других отраслях [1-3].

По данным Министерства промышленности и торговли РФ [4] доля импорта в потреблении крепежных изделий в 2014 г. составила 46 %, причем, в основном, это изделия повышенной прочности, а также крепеж из коррозионностойких и жаропрочных сталей. Поэтому задача освоения и расширения производства крепежных изделий из нержавеющей сталей является важной задачей отечественной промышленности по импорто-замещению.

Наиболее эффективная технология изготовления крепежа из нержавеющей сталей включает многопереходную холодную объемную штамповку с использованием высокопроизводительных кузнечно-прессовых автоматов (КПА). Однако, специфические свойства нержавеющей сталей (химический состав, структура, структурные превращения при нагреве и пластическом деформировании, интенсивное упрочнение при холодном деформировании, "налипание" на инструмент и др.) создают определенные трудности при штамповке крепежных изделий. При этом возникают проблемы, связанные со снижением качества изделий, низкой производительностью, высокими затратами материальных, энергетических и трудовых ресурсов. Поэтому основные направления исследований в области производства крепежных изделий из нержавеющей сталей связаны с поиском новых марок сталей и смазочных материалов, разработкой технологий подготовки металла к штамповке и совершенствованием процессов деформирования.

При совершенствовании процессов штамповки крепежных изделий из нержавеющей стали необходимо использовать современные методы моделирования, что позволит при проектировании технологии осуществлять поиск эффективных схем и режимов деформирования, обеспечивающих получение качественных изделий при снижении затрат на производство. Разработка высокоэффективных технологий штамповки болтов и винтов из нержавеющей стали на базе современных методов исследования с использованием компьютерного и натурного моделирования является актуальной задачей совершенствования процессов изготовления коррозионностойких стержневых изделий. Поэтому определение рациональных схем и режимов деформирования с использованием современных методов исследования процессов обработки металлов давлением позволит решить актуальную проблему повышения качества изделий из нержавеющей стали и эффективности производства.

**Целью работы** является совершенствование технологических процессов изготовления стержневых крепежных изделий из нержавеющей стали за счет поиска и применения рациональных схем и режимов деформирования, обеспечивающих высокое качество продукции при снижении затрат на производство.

### **Научная новизна**

1. На основе конечно-элементного моделирования и экспериментальных исследований получены новые данные и установлены закономерности взаимодействия инструмента и заготовки при формировании шестигранных головок болтов из нержавеющей стали, отличающиеся тем, что их применение позволяет определять рациональные режимы деформирования в процессах одно- и двухсторонней обрезки граней, а также при безоблойной штамповке шестигранника путем выдавливания торцевой лунки различной формы и размеров.

2. По результатам компьютерного и натурного моделирование процесса осевого растяжения стержневого крепежного изделия с шестигранной головкой и торцевой лункой получены данные о напряженно-деформированном состоянии в головке и стержневой части, по которым установлено, что при глубине лунки менее 0,6 высоты головки обеспечивается регламентированная прочность изделия, то есть разрушение происходит по стержню, а не по головке.

3. На основе анализа контактного взаимодействия заготовки и инструмента при объемной постановке задачи с учетом сложной формы контактной поверхности и упруго-пластических свойств деформируемого металла установлены закономерности формирования ребер шестигранника головки при варьировании формы и размеров выдавливаемой торцевой лунки.

4. Выявлен характер распределения нормальных и касательных напряжений, а также критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма в зонах, примыкающих к поверхностям среза, при одно- и двухсторонней обрезке на шестигранник головки изделий из нержавеющей стали, что позволило разработать рекомендации по совершенствованию технологии штамповки.

5. Усовершенствована методика поиска рационального формоизменения в многопереходных процессах штамповки изделий сложной формы на основе комплексного критериального подхода применительно к технологии изготовления болтов и винтов из нержавеющей стали, отличающаяся тем, что позволяет дополнительно учитывать критерий продольной устойчивости штампуемой заготовки, критерий разрушения Кокрофта-Лэтэма, критерий износостойкость инструмента и критерий расхода металла.

**Практическая значимость** научных результатов:

1. Результаты компьютерного и натурного моделирования процессов формирования шестигранных головок стержневых изделий из нержавеющей

сталей позволяют осуществлять поиск эффективных технологий изготовления качественных болтов и винтов при снижении затрат на производство.

2. Применение рекомендованных подмазочных покрытий (оксалатное и медное, наносимое химико-термическим способом), а также смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) марок Эмбол-4, Форсол, Твол и «Росойл-ШОК» обеспечивает снижение усилий деформирования, исключает «залипание» заготовок на инструмент и повышает его стойкость.

3. Использование разработанных новых технических решений, защищенных патентами на изобретения и полезную модель, позволяет повысить качество штампуемых болтов и винтов за счет четкого оформления ребер шестигранника по всей высоте головки и предотвратить образование дефектов. Кроме того, обеспечивается повышение стойкости штампового инструмента и снижаются затраты на производство.

4. Применение усовершенствованной методики поиска рациональных режимов процессов штамповки на основе комплексного критериального подхода позволяет на стадии проектирования технологии определять рациональные режимы пластического деформирования, при которых обеспечивается получение качественных изделий, что существенно снижает затраты на проведение дорогостоящих экспериментов и опытных штамповок.

**Теоретическая значимость** результатов исследования заключается в следующем:

- выдвинута и обоснована идея повышения качества обрезанных шестигранных головок крепежных изделий из нержавеющей стали за счет применения двухсторонней обрезки граней;

- осуществлена адаптация компьютерных конечно-элементных моделей к процессу безоблойной штамповки шестигранных головок болтов и винтов из нержавеющей стали при выдавливании торцевой лунки различной формы и глубины;

- обоснованы положения усовершенствованной методики поиска рационального формоизменения в многопереходных процессах штамповки применительно к штамповке болтов и винтов с шестигранной головкой из нержавеющей стали.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждаются применением современных методов механики сплошной среды, теорий пластичности и ОМД, использованием надежного программного комплекса «DEFORM-3D», корректностью постановки задач, а также количественным согласованием результатов математического моделирования с экспериментальными данными (погрешность не превышает 10÷15 %). При этом экспериментальные исследования выполнялись с использованием аттестованных испытательных машин.

### **Апробация результатов**

Результаты диссертационной работы обсуждались на научно-технических семинарах ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова» и ФГБОУ ВО «УАТУ», а также на технических советах АО «Белебеевский завод «Автономаль». Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на Всероссийской НТК «Материалы и технологии XXI века» (г. Пенза, 2001 г); Российской НТК «Кузнецы Урала-2005» (г. В.-Салда, 2005 г.); Международной НТК «Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением» (С.-Петербург, 2005 г.); XI Международном конгрессе прокатчиков (г. Магнитогорск, 2017 г.); Всероссийской конф. «Проволока-крепёж» (г. С.-Петербург, 2017); Международных НТК «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, 2017-18 гг.), Международной НТК «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2018» (г. Севастополь, 2018).

# 1. НЕРЖАВЕЮЩИЕ СТАЛИ. СТЕРЖНЕВЫЕ ИЗДЕЛИЯ С ГОЛОВКАМИ ШЕСТИГРАННОЙ ФОРМЫ: КОНСТРУКЦИЙ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

## 1.1 Нержавеющие стали, применяемые при изготовлении крепежных изделий

К коррозионностойким (нержавеющим) сталям относятся стали, обладающие стойкостью против электрохимической коррозии (атмосферной, почвенной, щелочной, кислотной, солевой, морской и других сред) [2,3,5,6]. Нержавеющие стали - это высоколегированные стали, образующие на своей поверхности пассивную пленку окислов, которая прерывает контакт металла с агрессивной средой [2,3,5-7].

По ГОСТ 5632-72 предусмотрены следующие марки коррозионностойких сталей: стали мартенситного класса: 2Х3 (ЭЖ2), 3Х13 (ЭЖ3), 4Х13 (ЭЖ4), 1Х13Н3, 1Х17Н2 (ЭК268), 9Х18 (Х18, ЭК229), 03Х11Н10М2Т (ВНС17); сталь мартенситно-ферритного класса 1Х13 (ЭЖ1); стали ферритного класса: 0Х13 (ЭК496), Х14 (ЭК241), Х17 (ЭЖ17), Х28(ЭЖ27, ЭИ349) и др.; стали аустенитно-мартенситного класса; Х15Н9Ю (ЭИ904), Х17Н7Ю (ЭК973) и др.; стали аустенитного класса: 0Х18Н10 (0Х18Н9, ЭЯ0), Х18Н9 (1Х18Н9, ЭЯ1), 2Х18Н9 (ЭЯ2), Х18Н10Т (1Х18Н9Т, ЭЯ1Т), 0Х18Н10Т (ЭК914), Х18Н12Т, Х25Н16Г7АР (ЭК835), 1Х25Н25ТР (ЭК813) и др.; стали аустенитно-ферритного класса: 0Х21Н5Т (ЭП53), 1Х21Н5Т (ЭК811), 0Х21Н6М2Т (ЭП54).

При изготовлении стержневых крепежных изделий наиболее широко используются нержавеющие стали аустенитного класса [3,128].

Стали марок 0Х18Н10, Х18Н9 и др., содержащие значительное количество хрома и никеля, относятся к аустенитному классу. Кроме аустенита, в этих сталях содержатся карбиды  $(Cr,Fe)_23C_6$ . С целью получения однородной структуры аустенита стали закаливают в воде при температуре от  $1100^{\circ}C$ . При отпуске с нагревом выше  $500^{\circ}C$  происходит выделение карбидов

хрома, которые располагаются по границам зерен. При этом резко снижается стойкость против коррозии и возникает, так называемая интеркристаллитная коррозия, причины возникновения которой заключается в следующем: содержание хрома в карбидах значительно выше, чем среднее его содержание в аустените. Скорость диффузии хрома значительно меньше скорости диффузии углерода. Поэтому карбиды образуются за счет хрома, находящегося в наружных участках зерен; эти участки обедняются хромом. Когда такое обеднение в наружных участках зерен достигает концентрации ниже 12% (концентрация хрома, обеспечивающая устойчивость стали против коррозии), коррозия имеет возможность распространения по границам зерен аустенита. Таким образом, при интеркристаллитной коррозии разрушаются не выделившиеся карбиды, а обедненные хромом пограничные участки аустенитных зерен. Интеркристаллитная коррозия наблюдается только в интервале температур нагрева 500-700<sup>0</sup>С. При температуре ниже 500<sup>0</sup>С выделение карбидов хрома не происходит. При температуре выше 700<sup>0</sup>С хром успевает продиффундировать к наружным участкам зерен и насытить их выше предела, соответствующего стойкости против коррозии. Устранение склонности хромоникелевых сталей к интеркристаллитной коррозии достигается легированием стали титаном (сталь X18H10T). Титан по сравнению с хромом является более сильным карбидообразующим элементом, поэтому карбиды титана не переходят в твердый раствор; весь избыточный углерод (кроме находящегося в твердом растворе) связан в карбидах; нет условий для образования карбидов хрома и обеднения хромом пограничных участков аустенита. Эти стали обычно закаливают в воде от 1050-1150<sup>0</sup>С, в результате чего достигается более высокая коррозионная стойкость. Для повышения прочности стали подвергаются холодной деформации. При деформации, например, с 50% обжатием предел прочности повышается с 600 до 1300 МПа, а твердость с НВ 170 до НВ 340. Стали аустенитного класса широко применяются для работы в средах средней агрессивности - азотной кислоте,

большинстве растворов солей органических и неорганических кислот при различных температурах и концентрациях.

Исследования, связанные с поиском новых марок нержавеющей стали, направлены на повышение коррозионной стойкости и технологичности сталей при штамповке, на повышение эффективности их применения.

В США разработана аустенитная коррозионностойкая сталь для изготовления крепежных изделий холодной высадкой, которая содержит до: 0,05 % C; 1,5-3 % Mn; 15-20 % Cr; 3-4,7 % Ni; 1,75-3 % Cu; 0,1-0,30 % N; до 0,06 % P; до 0,035 % S; до 1 % Si и микродобавки натрия, титана и тантала [8]. Сравнительно малое содержание никеля и марганца обеспечивает относительно низкую стоимость стали. По сравнению с другими сталями аустенитного класса предложенная сталь обладает высокими прочностью и пластичностью в сочетании с хорошей коррозионной стойкостью.

Коррозионностойкая сталь для холодной высадки и механической обработки, разработанная в Японии [9], содержит: до 0,03 % C; 8-10 % Ni; 16-19 % Cr; 0,3-2 % Mn; 2,5-4 % Cu; до 1 % Si; 0,05-0,1 % P; 0,05-0,1 % S и 0,001-0,008 % Ca.

Ещё одна нержавеющая сталь для изготовления гвоздей также разработана в Японии [10]. Состав стали: 0,03-0,1 % C; 5-6 % Mn; 6-6,5 % Ni; 16-17 % Cr; 1,5-2,5 % Cu; до 1 % Si; 0,05-0,1 % N; до 0,04 P; до 0,03 % S. После волочения и светлого отжига сталь обладает  $\sigma_B < 700 \text{ Н/мм}^2$  и высокой пластичностью, что обеспечивает стабильную высадку головок гвоздей.

Следует отметить, что стабильность процессов изготовления крепежа из нержавеющей сталей существенно зависит от подготовки металла к штамповке (термообработка, нанесение подмазочного покрытия), применения эффективных смазочных материалов и рациональных схем и режимов деформирования при штамповке.

## 1.2. Конструкции резьбовых стержневых изделий и технологии их изготовления

Среди многообразия конструктивного исполнения крепежных изделий (болты, винты, гайки, шурупы, заклепки, гвозди и т.п.) резьбовые стержневые изделия являются наиболее распространенными [3, 11-20]. На рисунке 1.1 представлены некоторые виды крепежных изделий стержневого типа.

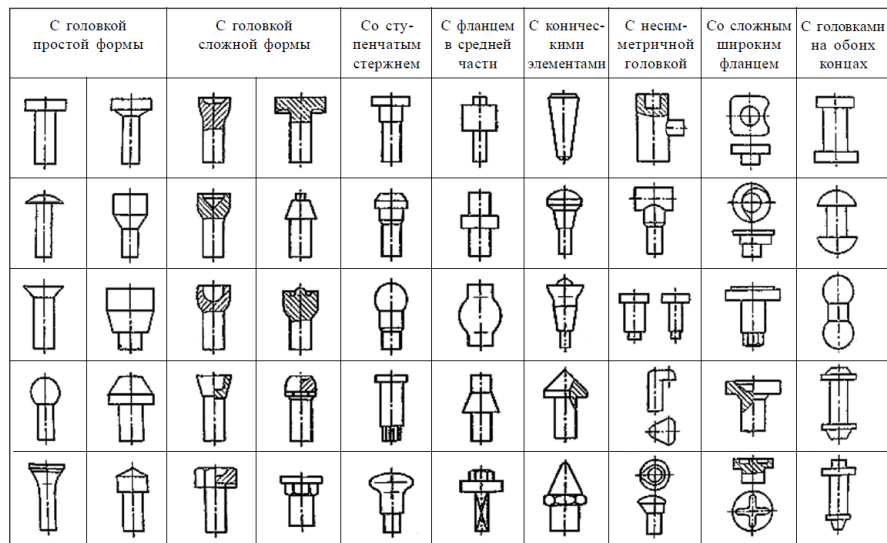


Рисунок 1.1 - Резьбовые крепежные изделия стержневого типа

Стержневые крепежные изделия типа болтов, винтов, шурупов и т.п. изготавливаются с головками, на которых для передачи крутящего момента выполняются элементы в виде шлицев, либо многогранников. Многогранники выполняются с четырьмя, шестью и двенадцатью гранями (рисунок 1.2).

Изделия с шестигранными головками находят наиболее широкое применение в машиностроении, автомобильной промышленности, строительстве и других отраслях [16]. Объем производства таких изделий составляет около 25% от общего объема стержневых крепежных изделий. На рисунке 1.3 представлена типовая конструкция болта с шестигранной головкой.

В конструкции железнодорожного пути для крепления рельсов к шпалам широко используются стержневые крепежные изделия с многогранными

головками [21]: путевые шурупы (рисунки 1.4 - 1.5) и клеммные (рисунок 1.6) и закладные болты (рисунок 1.7).

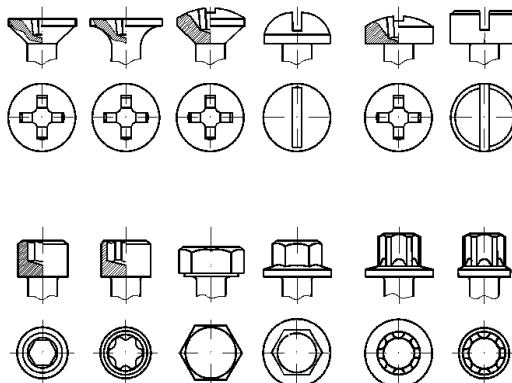


Рисунок 1.2 - Конструктивное исполнение головок крепежных изделий

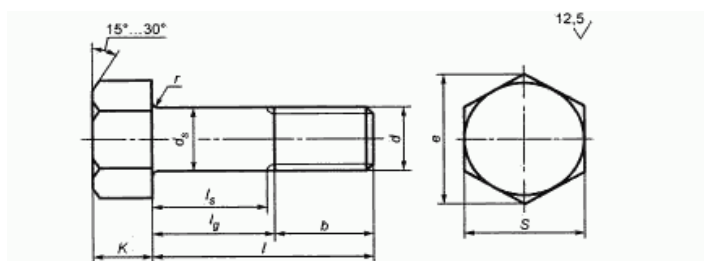


Рисунок 1.3 - Типовая конструкция болта с шестигранной головкой

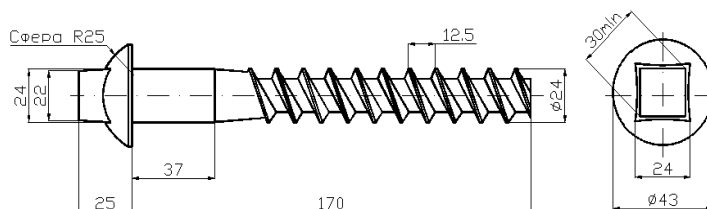


Рисунок 1.4 – Шуруп путевой с квадратной головкой (ГОСТ 809-71)

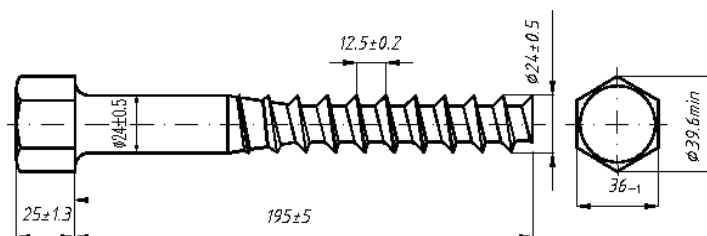


Рисунок 1.5 – Шуруп путевой с шестигранной головкой (ТУ 1293-165-01124323-2005)

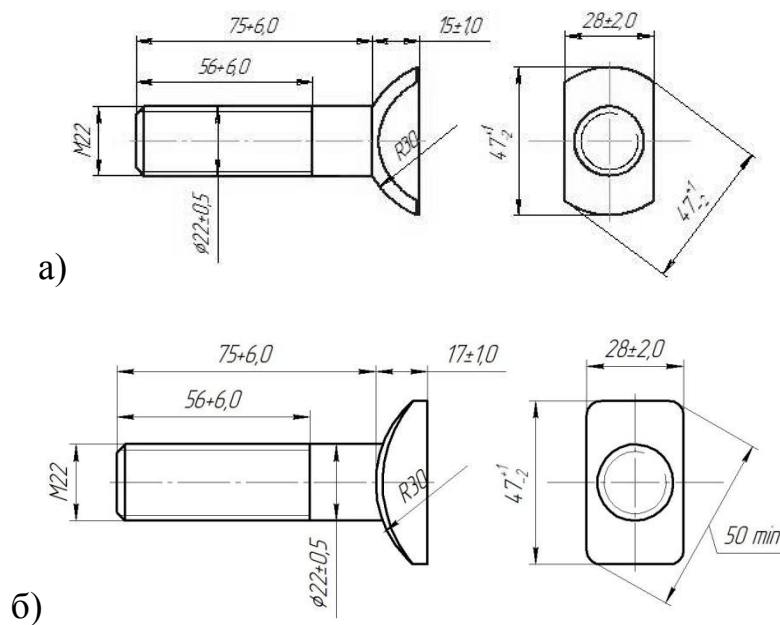


Рисунок 1.6 -Болты клеммные: а - по ОСТ 32.161-2000; б - по ГОСТ 16016-79

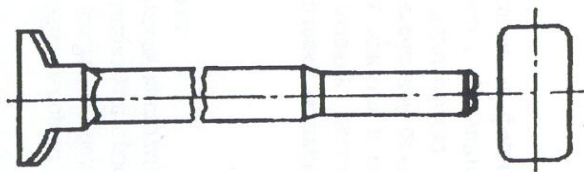


Рисунок 1.7 – Болт закладной по ГОСТ 16017-79

Исследованию и совершенствованию процессов изготовления стержневых крепежных изделий посвящены работы Биллигмана И., Мисожникова В.М., Навроцкого Г.А., Миропольского Ю.А., Петрикова В.Г., Мокринского В.И., Паршина В.Г., Герасимова В.Я., Бунатяна Г.В., Кутяйкина В.Г., Васильева С.П., Амирова М.Г., Лавриненко Ю.А., Закирова Д.М., Воробьева И.А., Железкова О.С., Белан О.А. и др.

При изготовлении стержневых крепежных изделий с многогранными головками применяются технологии, включающие обработку резанием, горячую либо холодную штамповку [13-15, 22-27].

При изготовлении крепежа обработкой резанием коэффициент использования металла составляет  $0,3 \div 0,5$ . Технологии обладают низкой произво-

дительностью и поэтому используются, главным образом, в единичном и мелкосерийном производстве.

При горячей и полугорячей штамповке крепежных изделий осуществляется нагрев либо всей заготовки, либо только штампуемого участка. При горячей штамповке температура нагрева  $1150\div 1250^{\circ}\text{C}$ , при полугорячей -  $750\div 850^{\circ}\text{C}$ . Горячая и полугорячая штамповки связаны с повышенным расходом металла в связи с его угаром и пониженным качеством поверхности изделий из-за образования окалины. Кроме того, эти технологии требуют использования специального нагревательного оборудования (печи, высокочастотные генераторы, индукторы, и т.п.) и связаны с повышенным расходом топлива или электроэнергии. Горячая и полугорячая штамповки применяется в тех случаях, когда невозможно использовать методы холодной штамповки, например, при изготовлении крупных изделий.

При изготовлении болтов и винтов с многогранными головками холодной объемной штамповкой (ХОШ) наибольшее распространение получили технологии, включающие предварительную высадку конической головки, штамповку бочкообразной головки и обрезку головки на многогранник [13,14 ,24-31]. В зависимости от конструкции применяемого оборудования (однопозиционные или многопозиционные кузнечно-прессовые автоматы) и конструкции крепежного изделия используются различные технологические процессы.

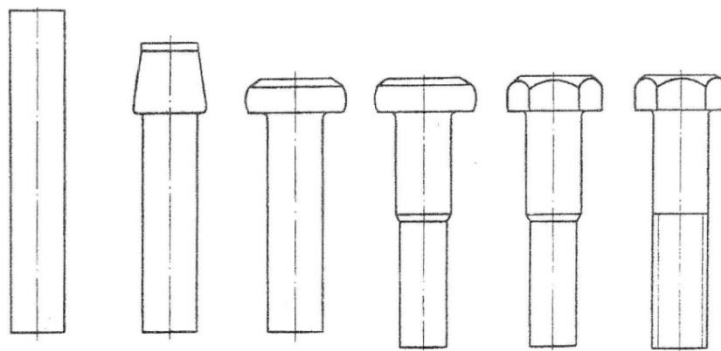
При изготовлении болтов с многогранными головками на однопозиционных двухударных прессах-автоматах вначале высаживают головку в виде конуса, а затем штампуют бочкообразную головку окончательной высоты, а обрезку головки на многогранник осуществляют на отдельном обрезном автомате.

ХОШ на многопозиционных автоматах по сравнению со штамповкой на однопозиционных более производительна, так как за один ход ползуна

выполняется большее количество операций деформирования. У многопозиционных автоматов более широкие технологические возможности, так как штамповка осуществляется за большее количество переходов.

При изготовлении изделий с шестигранными головками методами ХОШ и обрезкой на шестигранник с использованием многопозиционных прессов-автоматов наиболее широко используются технологические процессы: с однократным редуцированием; с двукратным редуцированием; с выдавливанием и редуцированием.

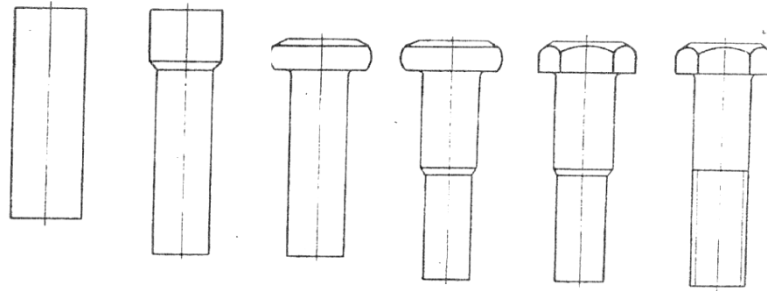
При использовании процессов с однократным редуцированием (рисунок 1.8) на первом переходе выполняют высадку конической головки [13]. Затем на втором переходе высаживают бочкообразную головку, а на третьем переходе редуцируют участок стержня под накатку резьбы. Обрезку головки на шестигранник осуществляют на четвертом переходе. В технологии используется калиброванный металл с диаметром примерно равным наружному диаметру резьбы.



*Рисунок 1.8 - Схема технологического процесса штамповки болтов с использованием однократного редуцирования*

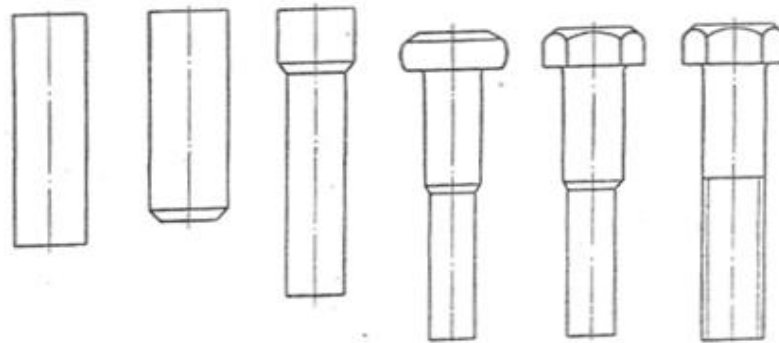
При использовании вышеотмеченной технологии гладкая часть стержневого участка практически не деформируется, резьбовая часть деформируется на  $\approx 20\%$ , а степень деформации головки достигает  $75\div 80\%$ , что в некоторых случаях приводит к образованию трещин в головках.

При использовании технологии, включающей штамповку с двукратным редуцированием (рисунок 1.9) диаметр калиброванного металла равен  $1,10 \div 1,15$  от наружного диаметра резьбы. При этом степень деформации головки -  $63 \div 68\%$ , гладкого участка стержня -  $18 \div 22\%$ , а резьбового участка -  $33 \div 38\%$ . В итоге неравномерность деформации по длине болтов меньше, чем у изделий, изготовленных с однократным редуцированием.



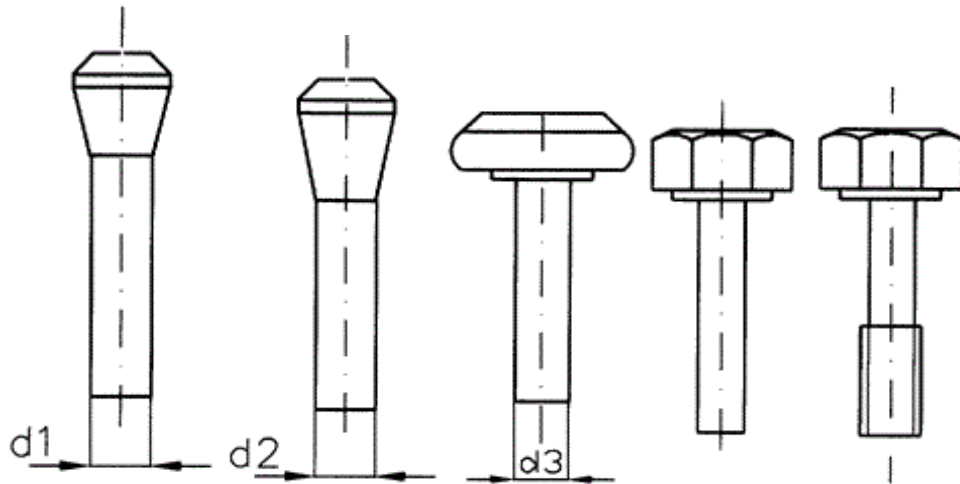
*Рисунок 1.9 - Схема процесса штамповки болтов с использованием двукратного редуцирования*

По технологии, включающей выдавливание и редуцирование (рисунок 1.10), на первом переходе выполняют осадку заготовки с выравниванием торцов и формированием концевой фаски, на втором переходе выдавливают стержневую часть болта, на третьем переходе одновременно редуцируют участок под накатку и штампуют головку бочкообразной формы, а на четвертом обрезают головку на шестигранник. В технологии используют калиброванный металл, диаметр которого равен  $1,23 \div 1,28$  от диаметра резьбы. К недостаткам этой технологии следует отнести сложность конструкции инструмента и его наладки.



*Рисунок 1.10 - Схема технологического процесса изготовления болтов с использованием выдавливания и редуцирования*

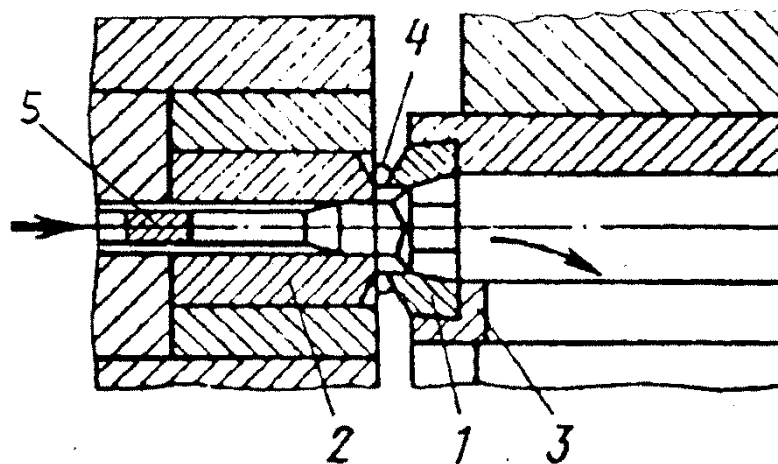
Известен способ штамповки болтов [27] облегченной конструкции (см. рисунок 1.4), который включает предварительную высадку головки в форме усеченного конуса, обращенного меньшим основанием к стержню, за два перехода из исходной заготовки диаметром не более 0,89 номинального диаметра резьбы (рисунок 1.11).



*Рисунок 1.11 - Схема технологического процесса изготовления болтов с диаметров гладкого участка, примерно равного среднему диаметру резьбы*

Однако при использовании вышеотмеченной технологии возникают проблемы потери устойчивости штампуемого участка заготовки, так как при уменьшении диаметра исходной заготовки увеличивается высота штампуемого участка, что повышает вероятность продольного изгиба.

При штамповке болтов с использованием вышеотмеченных технологий применяются процессы формирования шестигранной головки с использованием либо односторонней, либо двухсторонней обрезки [28]. Процессы осуществляются за два этапа. При односторонней обрезке (рисунок 1.12) на начальном этапе пуансон 1 внедряется в головку, зажимая срезаемый металл между торцевыми поверхностями матрицы 2 и пуансона 1. При этом образуется облой 4 [25]. На втором этапе процесса обрезки выталкиватель 5 проталкивает заготовку изделия через отверстие пуансона 1 и отделяет облой 4 от головки.



*Рисунок 1.12 - Схема процесса односторонней обрезки шестигранной головки*

Недостатком односторонней обрезки является неравномерный износ инструмента и низкий срок службы пуансона [128]. Это обусловлено тем, что пуансон обрезает практически всю головку по высоте и в процессе обрезки испытывает значительные осевые и радиальные усилия, в то время как матрица испытывает только сжимающие усилия на торцевой контактной поверхности. Частая замена пуансона приводит к затратам рабочего времени на замену и настройку инструмента. Кроме того, применение односторонней обрезки, зачастую, приводит к образованию заусенца на опорной поверхности головки, что снижает качество изделий.

Известен инструмент для двухсторонней обрезки шестигранных головок стержневых изделий [29, 128], содержащий соосно установленные в корпусах матрицу и пуансон (рисунок 1.13). Пуансон 4 имеет сквозное отверстие в виде усеченной пирамиды и торцевую рабочую поверхность в виде шестигранной усеченной пирамиды. Матрица 1 выполнена со ступенчатым отверстием, один участок которого выполнен в виде цилиндрического отверстия под стержень 3 обрезаемого изделия, а другой - в виде шестигранной призмы. Пересечение шестигранного отверстия с рабочей торцевой поверхностью матрицы образует режущие кромки 2, профиль которых соответствует профилю обрезаемой головки. На первом этапе процесса обрезки металл срезается с двух сторон и зажимается между торцевыми поверхностями матри-

цы и пуансона, образуя облой, а на втором этапе при движении выталкивателя (на рисунке 1.13 не показан) происходит отделение облоя от головки. Преимущества конструкции заключаются в снижении усилий на пуансон, что обеспечивает повышение его стойкости.

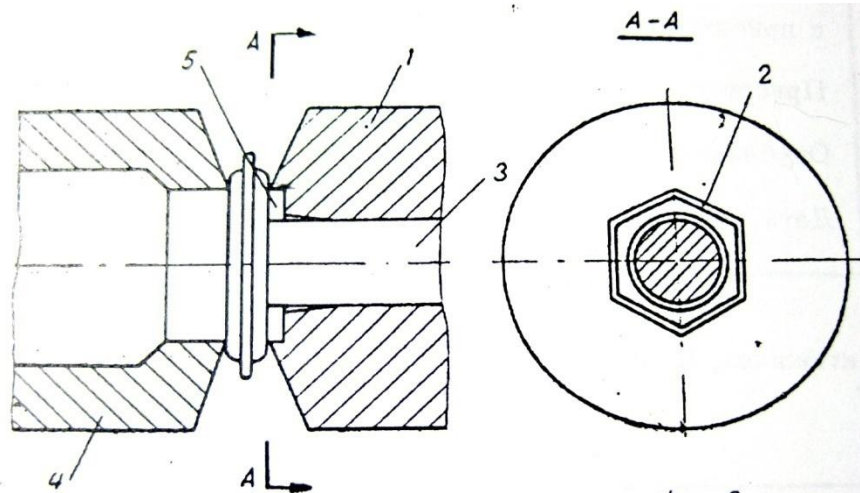
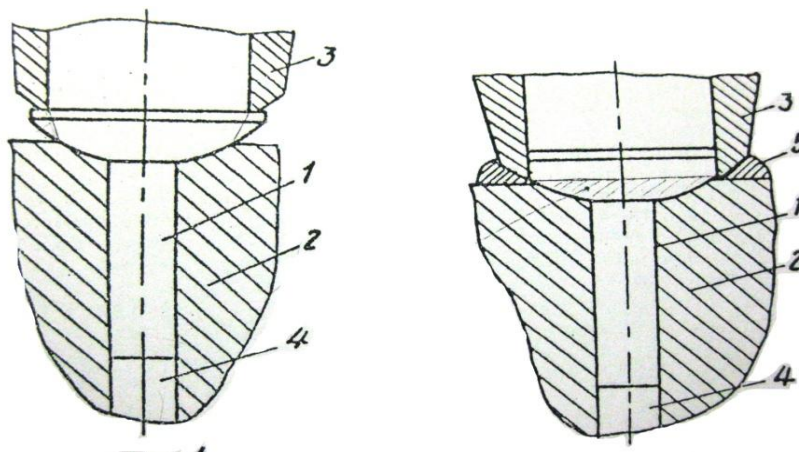


Рисунок 1.13 - Инструмент для двухсторонней обрезки головок болтов

Недостатком известной конструкции является низкий срок службы матрицы и высокие затраты на её изготовление. Кроме того, на конечном этапе обрезки головки, когда срезаемый металл зажимается между торцевыми поверхностями матрицы и пуансона, на матрицу действуют значительные осевые и радиальные усилия, которые вызывают повышенный износ поверхности контакта, а иногда приводят к выкрашиванию режущей кромки. Матрица сложна в изготовлении.

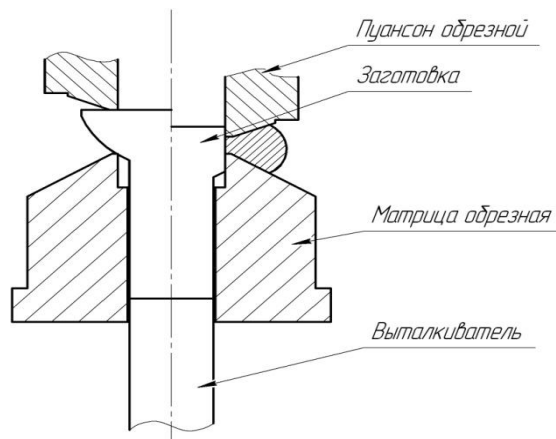
Известен способ обрезки головок прямоугольного сечения со сферической опорной поверхностью (клеммные болты) [30]. Для реализации способа используется инструмент, содержащий матрицу 2, пуансон 3 и выталкиватель 4. У матрицы 2 выполнено отверстие, диаметр которого равен диаметру стержня болта. Пуансон 3 имеет сквозное отверстие, профиль которого соответствует профилю поперечного сечения обрезаемой головки. На первом этапе пуансон 3 обрезает грани, примыкающие к большим сторонам прямоугольника. На втором этапе обрезаются грани, примыкающие к меньшим сторонам прямоугольника.



*Рисунок 1.14 - Инструмент для обрезки клеммных болтов*

При использовании вышерассмотренной конструкции обрезающего инструмента срезаемый металл не зажимается между рабочими поверхностями матрицы и пуансона. Поэтому на отдельных участках опорной поверхности головки болта образуются сколы, вырывы и заусенцы, что снижает качество изделий. Другой недостаток известной конструкции связан с низкой стойкостью выталкивателя из-за возникновения значительных усилий на втором этапе обрезки.

Другое техническое решение [31] заключается в том, что обрезку осуществляют с двух сторон – со стороны матрицы и со стороны пуансона (рисунок. 1.15). Для этого у матрицы на рабочем торце выполняют паз, ширина которого равна расстоянию между гранями головки болта и составляет  $0,95 \div 0,99$  от аналогичного расстояния у пуансона. Качество изделий повышается, однако, стойкость матриц снижается на  $20 \div 30\%$ . Причиной преждевременного выхода из строя матрицы является возникновение значительных контактных напряжений на режущих кромках.



*Рисунок 1.15 - Инструмент для двухсторонней обрезки головок болтов прямоугольного сечения по патенту РФ № 88589 на полезную модель*

Из вышесказанного следует, что при формировании головок преимущественно прямоугольного поперечного сечения (болты клеммные, закладные и т.п.) процессы обрезкой граней получили наибольшее распространение в метизной промышленности. Однако, известные технологии не обеспечивают качественное формирование граней головок. Кроме того, эти процессы обрезки характеризуется большими ударными нагрузками на малые рабочие контактные поверхности обрезного инструмента, что определяет его низкую стойкость.

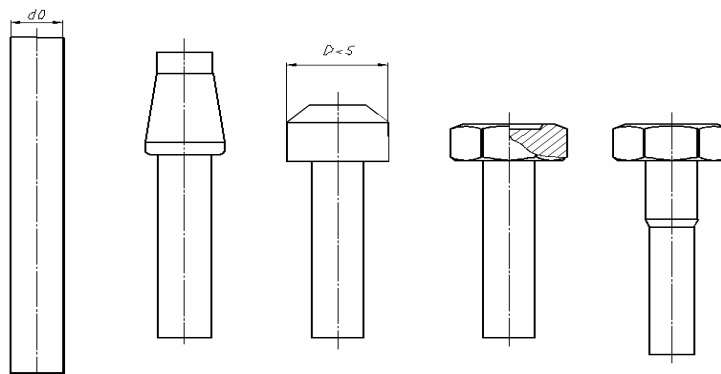
Таким образом, при изготовлении стержневых крепежных изделий с многогранными головками при использовании технологий, которые включают предварительную штамповку головки с обрезкой на многогранник, отходы металла в зависимости от длины стержневой части составляют 5÷8% от массы изделий. Другой недостаток - сравнительно низкая стойкость обрезных пуансонов и матриц.

При безоблойной штамповке многогранных головок болтов основные проблемы связаны с низким качеством изделий из-за плохого оформления ребер. Кроме того, усложняется конструкция штампового инструмента, требуется точное дозирование объема заготовок и высокое качество их отрезки. Тем не менее, в последнее время вышеотмеченные проблемы за счет совершенствования технологий и конструкции инструмента решаются и безоблой-

ная штамповка все чаще используется при изготовлении крепежа с многогранными головками.

Среди известных способов безоблойной штамповки [13-15] болтов с шестигранными головками наиболее широко используются: способ штамповки шестигранной головки с торцевой лунки; способ штамповки шестигранной головки за несколько переходов; способ формирования шестигранника редуцированием и др.

При штамповке шестигранной головки с выдавливанием лунки на торце (способ завода “Красная Этна”, г. Н. Новгород) [13] вначале штампуется цилиндрическая головка с диаметром меньшим размера «под ключ» и фаской на торце, а затем с помощью пуансона, у которого на рабочем торце выполнен выступ, в матрице с шестигранным углублением формируется головка болта с торцевым углублением цилиндрической формы (рисунок 1.12).

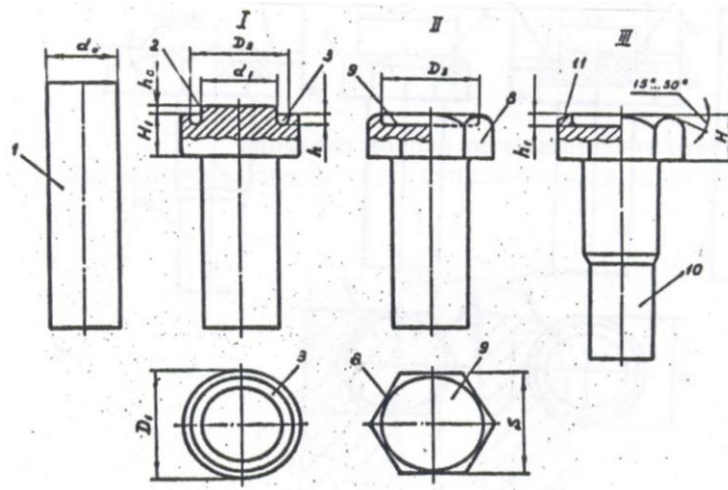


*Рисунок 1.12 - Схема процесса штамповки шестигранной головки с торцевой лункой*

Способ сравнительно простой, однако, качество изделий низкое из-за плохого оформления ребер шестигранника, а в некоторых случаях по периметру торца головки возникают трещины. Кроме того, из-за возникновения значительных технологических усилий на матрицу и пуансон окончательной штамповки, существенно снижается стойкость инструмента.

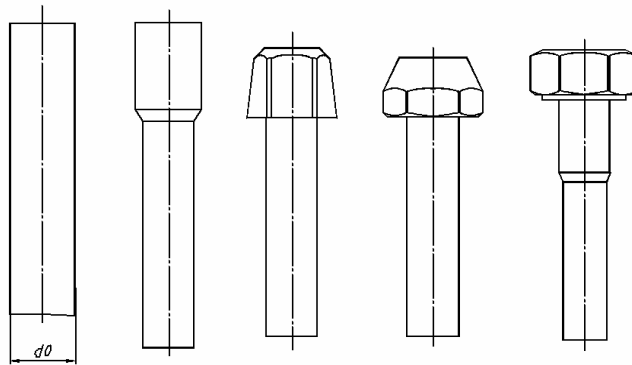
Другой способ безоблойной штамповки шестигранных головок болтов [33] включает предварительную штамповку цилиндрической головки, у кото-

рой на торце формируется цилиндрический выступ и кольцевая канавка и окончательную штамповку шестигранника путем выдавливания лунки (рисунок 1.13). Недостатки технологии связаны с низким качеством изделий в связи из-за плохого оформления ребер шестигранника.



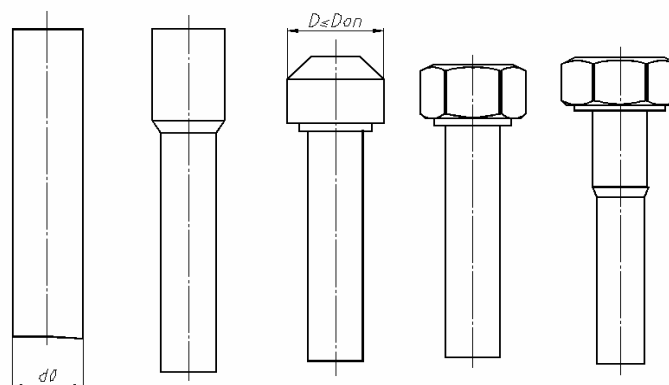
*Рисунок 1.13 - Схема безотходной штамповки головок болтов  
по а. с. 1806895*

По способу фирмы «Hatebur», включающему последовательную штамповку головки за несколько переходов [13] (рисунок 1.14), вначале формируют головку в виде шестигранной усеченной пирамиды, затем штампуют шестигранную головку с большой торцевой фаской, после чего осуществляют окончательную штамповку шестигранной головки. К недостаткам способа следует отнести сложность конструкции инструмента и необходимость точного дозирования объема заготовки (точные подача и отрезка заготовки). Кроме того, для реализации способа необходимо обеспечить строго ориентированный перенос заготовок по позициям штамповки.



*Рисунок 1.14 – Схема технологии фирмы «Hatebur»*

По способу, разработанному специалистами НИИМетиза [34], вначале за два перехода штампуют цилиндрическую головку с торцевой фаской, причем диаметр цилиндра несколько меньше диаметра описанной окружности шестигранника, а затем формируют шестигранную головку путем редуцирования (рисунок 1.15). Так как силы редуцирования существенно меньше сил штамповки, то данный способ обеспечивает повышение стойкости инструмента и снижение энергетических затрат на изготовление болтов. Болты, отштампованные с использованием такой технологии, имеют нечетко оформленные ребра, а на опорной поверхности головки возникают волнообразные наплывы.

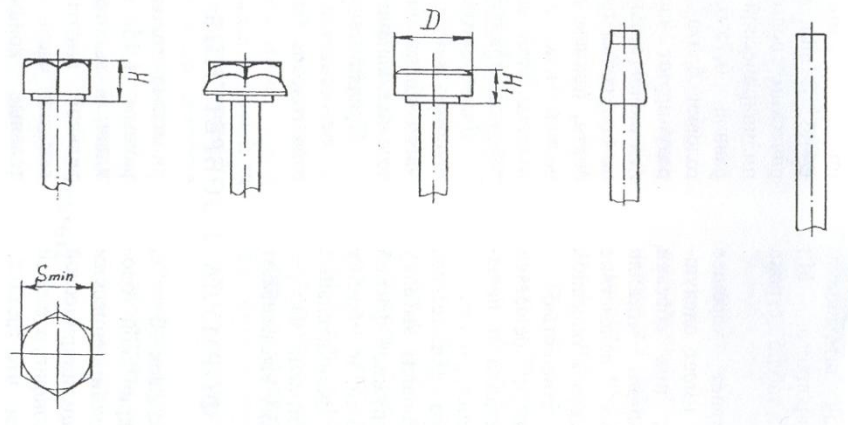


*Рисунок 1.15 - Схема процесса безоблойной штамповки болтов с использованием редуцирования головки*

В работе [35] проведены исследования и разработан новый способ формирования шестигранных головок редуцированием, который заключается в том, что вначале штампуют цилиндрическую головку с фасками определен-

ных размеров на опорной и торцевой поверхностях, а затем редуцированием формируют шестигранник. Однако, это техническое решение незначительно отличается от способа [34] и не обеспечивает получение качественных головок болтов по причине образования наплывов на опорной или торцевой поверхностях.

Специалистами АО «Белебеевский завод «Автономаль» разработан способ изготовления болтов [36], который включает предварительную высадку конической головки, штамповку цилиндрической головки, предварительное формирование части шестигранной головки редуцированием с образованием облоя и обрезку облоя (рисунок 1.16).



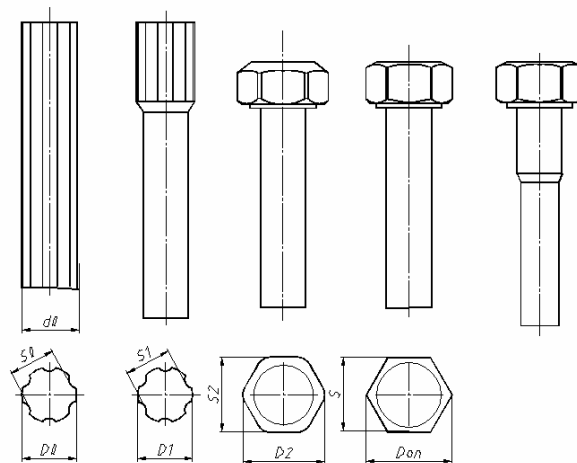
*Рисунок 1.16 - Схема технологического процесса изготовления болтов с формированием головки редуцированием и обрезкой*

Недостатки технологии связаны с повышенным расходом металла в связи с необходимостью удаления облоя и сложностью настройки инструмента.

Таким образом, применение операции редуцирования для формирования многогранных головок болтов обеспечивает снижение усилий деформирования. Однако, искажение опорной и торцевых поверхностей головок и необходимость исправления этих искажений усложняют технологию и конструкцию инструмента.

Другой известный способ безоблойной штамповки головки болта [14] включает следующие переходы (рисунок 1.17). Из исходной заготовки

трефового сечения на первом переходе выдавливают стержневую часть болта. На втором штампуют предварительную многогранную головку с диаметром описанной окружности  $D_2 \leq D_{on}$  и размером "под ключ"  $S_2 > S$ , где  $D_{on}$  - диаметр описанной окружности и  $S$  - размер "под ключ" готовой голов-ки. На третьем переходе окончательно штампуют шестигранник. На четвертом переходе осуществляют редуцирование стержень под накатку резьбы.



*Рисунок 1.17 - Безоблойная штамповка болтов из исходной заготовки трефового сечения*

Использование калиброванного металла трефового сечения усложняет процессы отрезки и ориентированного переноса на позиции штамповки. Кроме того, калиброванный металл трефового сечения требуемой точности существенно дороже калиброванного металла круглого сечения, что делает вышеотмеченный способ экономически не выгодным.

Известны и другие способы безоблойной штамповки болтов [37- 42], которые практически не используются в метизной промышленности и их реальное применение весьма сомнительно.

### 1.3. Технологическое оборудование для изготовления стержневых крепежных изделий холодной штамповкой

В настоящее время массовое производство стержневых крепежных изделий осуществляется с использованием кузнечно-прессовых автоматов (КПА), которые разделяются на одно- и многопозиционные. Модернизация КПА осуществляется путем повышения быстроходности, надежности и стабильности работы. Это достигается за счет совершенствования конструкции машин, снижения движущихся масс, оптимизации жесткости силовых элементов и узлов, повышения точности изготовления деталей и качества сборки [3,13,14,22,25]. Новые конструкции КПА оснащаются автоматическими системами диагностики, контроля технологического процесса и качества штампуемых изделий, системами быстрой замены и наладки инструмента. Новые поколения создаваемых автоматов оснащаются звукоизолирующими кожухами и системами отсоса паров масел.

В зависимости от длины хода ползуна кузнечно-прессовые автоматы разделяются на три группы: короткоходовые, на которых используются для изготовления болты с длиной стержня  $l \leq 5d$ , где  $d$  - диаметр стержня; среднеходовые ( $l = 10d$ ) и длинноходовые, на которых штампуются болты с  $l = (15 - 20)d$ .

Оборудование для холодной штамповки крепежных изделий выпускается многими фирмами.

Японской фирмы «NEW» (*Nakashimada Engineering Works*) выпускаются автоматы серии NS. Они имеют традиционную подачу проволоки с помощью роликов и механизм с электронным индикатором отрезки. Из закрытой отрезной втулки пальцами переноса заготовка подаётся к матрице. Раскрытие - закрытие пальцев переноса производится с помощью кулачкового механизма. Оба пуансона имеют систему выталкивания, индивидуальную настройку в горизонтальном и вертикальном направлениях. Автоматы оснащены системой контроля инструмента. Линейка автоматов включает 13

моделей для заготовок диаметром от 4 до 12 мм, максимальная длина стержня изделий от 30 до 175мм. Производительность от 400 до 60 шт./мин. (соответственно).÷

Большой выбор двухударных автоматов изготавливает итальянская фирма «*Carlo Salvi S.p.a.*». Диапазон диаметров проволоки: 0,8÷3 мм, 2÷5 мм, 3÷6,35 мм, 4÷10 мм. Максимальная длина стержня изделий от 25 до 100 мм, диаметр головки от 6,5 до 20 мм, производительность от 250 до 60 шт./мин.

На известной фирме «*WAFIOS Umformtechnik GmbH*» (Германия) выпускают широкую номенклатуру прессов-автоматов. Однопозиционные двухударные (модели *HD4*, *HD6*), двухпозиционные трёхударные модели серии *HCF* для деталей с относительно большим различием поперечных сечений (короткие детали с головкой большого диаметра) имеют производительность 150-200 шт./мин.

Эта же фирма выпускает роторные прессы-автоматы серии *HC* с поворотным матричным блоком, на котором устанавливаются три матрицы. После каждого удара матричный блок поворачивается на 120°. Штамповка производится одновременно двумя пуансонами первого и второго переходов. Во время штамповки готовую деталь выталкивают из третьей матрицы, которая находится в этот момент внизу. Машины обладают высокой производительностью. Например, роторный автомат *HC4* (диаметр проволоки 4 мм) обладает производительностью 850 шт./мин. Выпускаются роторные прессы-автоматы для штамповки выдавливанием (серия *HCF*), которые обеспечивают получение фасонных деталей – ступенчатых болтов, винтов и шпилек.

При производстве болтов и близких к ним деталей используют преимущественно многопозиционные автоматы, имеющие, как правило, 4 позиции, а для более сложных деталей может быть 5 позиций и более. В то же

время для некоторых болтов бывает достаточно 3-х переходов. В этом случае обычно 4-ую позицию не используют. Часто оборудование для штамповки стержневых крепёжных деталей типа болтов и для накатки резьбы объединяют в единый комплекс, получивший название автомат-комбайн. В автомат-комбайн вводят также и устройство для обточки фаски или более сложного конца стержня (острильное устройство).

Четырёхпозиционные прессы-автоматы для изготовления болтов выпускают многие фирмы, среди которых фирма «*Nedschroef Herentals NV*» (Бельгия), входящая в состав холдинга «*Nedschroef Holding B.V.*» (Нидерланды). Эта фирма является лидером по проектированию и производству болтовых автоматов и автоматов-комбайнов. Для специальных и сложных фасонных деталей выпускаются автоматы с 5- и 6-тью позициями. Линейка выпускаемого оборудования охватывает размеры болтов от М6 до М20.

Итальянская фирма «*SACMA Limbiate S.p.a.*» выпускает как прессы-автоматы, так и автоматы-комбайны. Линейки оборудования включают по 5 типоразмеров автоматов и комбайнов для болтов М6, М8-М10, М12-М14, М16-М18 и М20. Производительность от 350 до 120 шт./мин. соответственно. В комбайнах ось накатного устройства расположена перпендикулярно к оси высадочной машины, а процесс накатки происходит при обратном ходе ползуна. Оборудование компании характеризуется высокой прочностью станины и высокой точностью обработки всех деталей, а также возможностью выполнения быстрой переналадки и внестаночной настройки инструмента. У автоматов высокоскоростная точная передача деталей с позиции на позицию с поддерживающими устройствами для передачи коротких и нестандартных изделий. КПА оснащены современными системами контроля за работой механизмов и соблюдением технологий. Все модели автоматов оснащены компьютерной системой *SACMASC 1000*, которая позволяет осуществлять автоматическое регулирование различных систем машин и контролировать весь производительный цикл.

Американская компания «*National Machinery LLC*» одна из признанных лидеров по созданию и производству холодновысадочного и резьбонакатного оборудования. Выпускаемое фирмой оборудование позволяет изготавливать не только крепёжные детали, но и разные более сложные изделия. Прессы серии «*FORMAX2000*» и «*FORMAX Plus*» имеют возможность развивать усилия от 300 до 2000 кН. Применение выпускаемого оборудования и фирменных технологий позволяет: изготавливать сложные детали с высокой точностью; иметь низкие простои при наладке и переналадке за счёт наличия системы *FORMAPAK* для монтажа, точной настройки и контроля по замене инструмента вне пресса; осуществлять постоянный контроль за всеми функциями автомата в режиме диалога с оператором с помощью компьютерной системы *FORMATROLPS*.

Особенность обеих серий прессов – высокая степень унификации и наличие модификаций прессов, включающих разные исполнения: двух-, трёх-, четырёх- и пятиматричные версии, в том числе средне- и длинноходные. Прессы *FORMAXPlus* отличаются системой переноса с применением качающегося движения захватов (*PMP*), которая позволяет передавать детали с очень коротким стержнем – 8 мм.

Фирма *National Machinery* не выпускает комбайны, предпочитая комплексные технологические линии *FXBM*, состоящие из оборудования для штамповки, обточки конца стержня с регулируемым числом оборотов шпинделя и отдельной накатной машины с плоскими плашками. Все они могут быть объединены в единые гибкие технологические линии, например, чтобы после высадки и обточки конца произвести перед накаткой резьбы термообработку. Для подачи деталей к резьбонакатному станку применяют отдельный наклонный транспортёр.

Многопозиционные прессы выпускают также фирмы «*Carlo Salvi*» Италия, «*Kiserling*» Германия, «*Sakamura mashine Co., Ltd.*» Япония и другие.

Широкая гамма оборудования для производства крепежных изделий выпускается фирмами Тайваня. Компания «*Taiwan Metiz Alianse*» («Тайвань Метиз Альянс») занимается производством и поставкой оборудования для всех стадий производства крепежа с учетом современных требований рынка и потребностей покупателей.

Холодновысадочные прессы от компании «*JERNYAO Enterprisesco. LTD*» серии *JBF* могут иметь от 2-х до 5-ти позиций и рассчитаны на изготовление винтов и болтов М3÷М30 с производительностью до 300 шт./мин. Резьбонакатное оборудование серии *AS* для размеров резьбы до М8, а серии *CR* – до М30 имеет производительность до 500 шт./мин.

Прессы, имеющие 2 матрицы и 3 пуансона, серии *B2S* предназначены для сложных деталей с относительно большой головкой и коротким стержнем. Их производительность до 300 шт./мин.

К большому сожалению, следует констатировать, что отечественное машиностроение еще в 90-е годы прошлого века прекратило выпуск кузнечно-прессового оборудования для изготовления крепежных изделий, отвечающих современным требованиям.

В настоящее время при массовом производстве крепежных изделий, как за рубежом, так и в нашей стране, в основном, используются кузнечно-прессовых автоматов (КПА) прерывистого действия, у которых технологические операции штамповки чередуются с транспортированием заготовок и полуфабрикатов.

Однако, КПА прерывистого действия, достигнув быстроходности 500 ÷ 600 ходов в минуту, исчерпали резервы дальнейшего повышения производительности, так как наличие большего количества деталей и узлов, совершающих возвратно-поступательные и качательные движения, ускорение и замедление больших движущихся масс, удары при деформировании заготовок вызывают возникновение значительных динамических и инерционных нагрузок,

колебаний и вибрации, что приводит к снижению стабильности и надежности работы оборудования, потере точности штампуемых изделий, снижению стойкости инструмента, возникновению повышенного уровня шума.

Существенно повысить производительность процессов изготовления крепежных изделий возможно за счет создания и внедрения роторных технологий и роторного оборудования [44-50].

Основоположником нового направления в развитии машиностроения, связанного с автоматизацией массового производства штучных изделий на базе роторных и роторно-конвейерных линий, является академик Л.Н. Кошкин. Разработанная им классификация технологических машин представлена в таблице 1.1

*Таблица 1.1 - Классификация технологических машин для массового производства штучных изделий*

Машины I класса	Машины II класса	Машины III класса	Машины IV класса
Чередование технологических и транспортных операций	Одновременное выполнение технологических и транспортных операций при равенстве транспортной и технологической скоростей	Одновременное выполнение технологических и транспортных операций при независимости транспортной и технологической скоростей	Обработка средой при массовом транспортировании предметов в произвольном положении

Традиционные КПА относятся к машинам I класса.

Роторные машины (машины III класса), у которых выполнение технологических операций происходит в процессе непрерывного транспортирования заготовок по сравнению с традиционными кузнечно-прессовыми автоматами обладают более высокой производительностью (в 3÷4 раза и выше) [44-50]. Кроме того, роторные линии обладают расширенными функциональными и технологическими возможностями, так как позволяют объединять в единый технологический процесс различные технологические операции (обработка давлением и резанием, термообработка, сборка, контроль и

др.) и использовать специальные методы обработки давлением (осадка с кручением, радиальная штамповка, сферодвижная штамповка и др.).

Современные роторные машины разделяются на автоматические роторные линии (АРЛ) и автоматические роторно-конвейерные линии (АРКЛ).

АРЛ представляет собой совокупность размещенных на одной станине нескольких технологических роторов, передача предметов обработки между которыми осуществляется с помощью транспортных роторов (рисунок 1.18,а) [44-50]. Недостаток конструкции АРЛ, ограничивающий производительность линий, заключается в том, что передача предметов обработки между технологическими и транспортными роторами осуществляется в пределах поворота роторов на угол  $\alpha \leq 20 - 22^\circ$ , то есть за короткий промежуток времени, и при повышении скорости вращения роторов выше некоторых пределов процесс передачи предметов обработки становится нестабильным.

АРКЛ имеют в своей конструкции гибкую бесконечную цепь, огибающую технологические роторы (рисунок 1.18,б) [44-50]. При этом угол поворота  $\alpha$  значительно увеличивается, что повышает надежность передачи предметов обработки и позволяет увеличить скорость движения, а следовательно, производительность линии.

Следует особо отметить характерную особенность современных роторных машин - размещение рабочего инструмента в инструментальных блоках, что обеспечивает возможность быстрой его замены, в том числе автоматической, и внестаночную настройку.

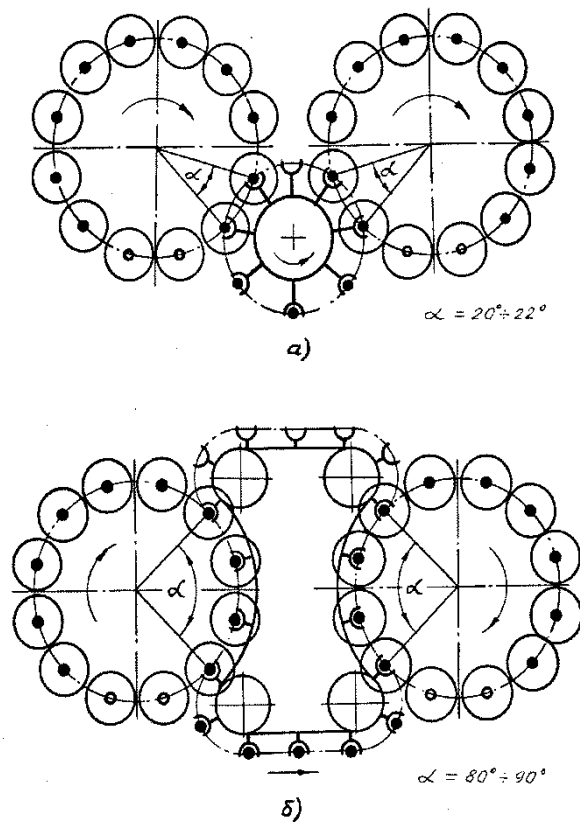


Рисунок 1.18 - Основные элементы роторной (а) и роторно-конвейерной (б) линий

Разработкой и совершенствованием АРЛ И АРКЛ занимается созданное Л.Н. Кошкиным конструкторское бюро автоматических линий (КБАЛ). За время своего существования КБАЛом создано большое количество различных моделей роторного оборудования, в основном, для оборонного комплекса (производство патронов) и пищевой промышленности.

#### 1.4. Задачи исследования

1. Провести испытания механических свойств нержавеющей стали. Построить и описать аналитическими зависимостями кривые упрочнения. Осуществить поиск эффективных подмазочных покрытий и смазочных материалов для штамповки изделий из нержавеющей стали. Выполнить оценку качества заготовок, отрезанных на кузнечно-прессовом автомате.

2 . Выполнить конечно-элементное моделирование процессов одно-и двухсторонней обрезки головки на шестигранник. Определить энергосиловые параметры процессов обрезки и напряженно-деформированное сос-

тояние в зонах контакта обрезаемой головки с инструментом. Провести сравнительный анализ процессов обрезки и оценить влияние параметров напряженно-деформированного состояния на качество обрезаемой головки.

3. Выполнить компьютерное и натурное моделирование процесса нагружения болта с шестигранной головкой и торцевой лункой. Оценить влияние формы и размеров торцевой лунки на прочность соединения головки со стержнем.

4. С использованием метода конечных элементов осуществить моделирование процесса безоблойной штамповки шестигранной головки болтов из нержавеющей стали с формированием торцевой лунки. Определить рациональные режимы деформирования, при которых обеспечивается качественное формирование ребер шестигранника.

5. Усовершенствовать методику поиска рационального многопереходного процесса штамповки на основе комплексного критериального подхода применительно к технологии изготовления стержневых крепежных изделий с шестигранными головками из нержавеющей сталей. Выполнить расчеты и разработать рекомендации.

6. Разработать новые технические решения, направленные на повышение качества изделий и эффективности процесса штамповки стержневых крепежных изделий из нержавеющей сталей. Провести экспериментальные исследования процессов формирования шестигранных головок болтов из нержавеющей стали. Определить рациональные способы и режимы деформирования. Выбрать оборудование для промышленной реализации технологии, разработать технологические карты, спроектировать и изготовить технологический инструмент. Осуществить промышленное опробование. Оценить экономическую эффективность разработок.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРЯЧЕКАТАНОГО И КАЛИБРОВАННОГО МЕТАЛЛОВ. ПОИСК РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ПОДГОТОВКИ К ШТАМПОВКЕ И ЭФФЕКТИВНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

### 2.1. Испытания горячекатаного и калиброванного металла.

#### Кривые упрочнения

Механические свойства сталей являются важнейшими показателями, по которым оценивается их пригодность для штамповки. При испытаниях механических свойств, в основном, определяются временное сопротивление  $\sigma_B$ , условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , относительное удлинение  $\delta$  и относительное сужение  $\Psi$ . Параметры  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$  и  $\Psi$  определяются по результатам испытаний образцов на растяжение, которые проводят в соответствии с требованием ГОСТ 1497-73 и ГОСТ 10446-80. При  $\sigma_B > 700 \dots 750$  МПа и  $\Psi < 50$  % холодная штамповка сталей затруднительна.

Испытания на растяжение не позволяют достаточно полно выявить влияние поверхностных дефектов и недостаточного ресурса пластичности на поведение металла в реальных процессах штамповки. Поэтому стали для высадки должны подвергаться испытаниям на осадку в соответствии с ГОСТ 8817-82. При этом цилиндрические образцы с отношением  $\frac{h_0}{d_0} = 2$  (где  $h_0$  - первоначальная высота,  $d_0$  - диаметр) осаживаются до  $1/2$  первоначальной высоты (группа осадки 50), либо до  $\frac{1}{3}h_0$  (группа осадки 66) или до  $\frac{1}{4}h_0$  (группа осадки 75). О пригодности металла к холодной штамповке судят по отсутствию трещин и надрывов на боковой поверхности осажённых образцов.

Исходный металл (стали марок I2X18H10T и I0X17H13M2T), выплавленный и прокатанный на Златоустовском металлургическом заводе, подвергался химическому анализу. Химический состав горячекатаных сталей представлен в таблице 2. 1.

Таблица 2.1 - Химический состав нержавеющей сталей

Марка стали	№ образца	Массовая доля элементов, в %				
		C	Cr	Ni	Ti	Mo
12Х18Н10Т	1	0,1	18,2	10,5	0,55	—
	2	0,1	18,6	10,7	0,52	—
	3	0,1	17,0	10,5	0,52	—
10Х17Н13М2Т	1	0,07	16,4	12,0	0,48	1,90
	2	0,07	16,4	12,0	0,46	1,84
	3	0,07	17,0	12,0	0,49	1,90

Результаты химического анализа свидетельствуют о том, что исходный металл по содержанию элементов соответствует требованиям ГОСТ 5632-72.

Горячекатаный металл подвергался испытаниям на растяжение, по результатам которых определялись временное сопротивление  $\sigma_b$ , условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , относительное удлинение  $\delta$  и относительное сужение  $\psi$ . Испытания проводились на аттестованной разрывной машине ЗД-100 (Германия). Результаты испытаний представлены в таблице 2.3.

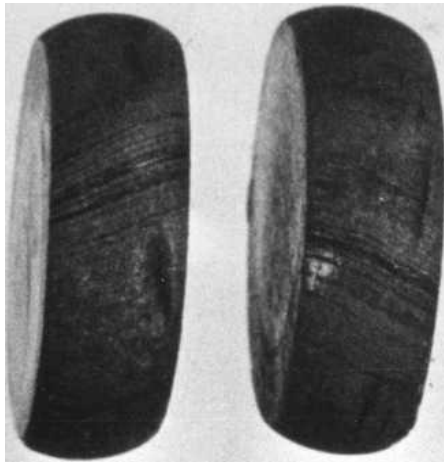
Таблица 2.3 - Механические свойства горячекатаных сталей

Марка стали	№ образца	Диаметр катанки, мм	R <sub>b</sub>	$\sigma_b$	R <sub>0,2</sub>	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\psi$
			кН	Н/мм <sup>2</sup>	кН	Н/мм <sup>2</sup>	%	%
12Х18Н10Т	1	12,21	94,0	800	39,6	340	30	64
	2	12,08	92,0	800	58,8	510	30	60,5
	3	12,12	72,5	630	53	530	42	70,5
10Х17Н13М2Т	1	12,22	77,0	660	49,2	420	33,8	69
	2	12,22	76,0	650	43,2	370	39,3	71
	3	12,20	86,0	740	58,8	510	41	67

Результаты испытаний на растяжение свидетельствуют о том, что для снижения прочностных и повышения пластических свойств испытываемых сталей необходимо провести термообработку.

Горячекатаный металл испытывался на осадку (ГОСТ 8817-82), для чего изготавливались цилиндрические образцы высотой  $2,0 d$  и с помощью

специального приспособления на разрывной машине ЗД-100 (Германия) осаживались до 1/3 первоначальной высоты. Испытания не выявили наличие поверхностных дефектов (рисунок 2.1)



*Рисунок 2.1 - Образцы, осаженные до 1/3 высоты*

Подготовка нержавеющей стали к штамповке включает термообработку, подготовку поверхности, нанесение подмазочного слоя и калибровку.

Наибольшее распространение при термообработке нержавеющей стали аустенитного класса получила технология, включающая нагрев до температур  $1050 \div 1100^\circ\text{C}$ , выдержку  $20 \div 30$  мин и охлаждение в воде [1,3,5,7]. При таком режиме обеспечивается растворение карбидов хрома и получение структуры стали в виде пересыщенного твердого раствора аустенита. При нагреве до более высоких температур происходит интенсивный рост зерна, что снижает пластические свойства сталей. При медленном охлаждении возможно выделение карбидов хрома, что приводит к снижению коррозионной стойкости и пластичности.

В работах [1,7] отмечается, что при термообработке нержавеющей стали аустенитного класса возможно использование стабилизирующего отжига вместо закалки. При этом рекомендуется металл нагревать до температур  $850 \div 900^\circ\text{C}$  с выдержкой 3-5 часов и достаточно быстро охлаждать. В этом случае происходит переход углерода от карбидов хрома в карбид титана и растворение хрома в аустените, вследствие чего стали не проявляют склон-

ность к межкристаллитной коррозии после нагрева в опасном интервале температур.

Перед термообработкой горячекатаной металл подвергался обезжириванию. Состав раствора для обезжиривания представлен в таблице 2.4.

*Таблица 2.4 - Раствор для обезжиривания*

Наименование компонента	Количество компонента		Температура
	% (веса)	кг/м <sup>3</sup>	
Сода каустическая	4,0 ÷ 5,0	40 ÷ 50	80 °С
Тринарийфосфат	2,0 ÷ 3,0	25 ÷ 30	
Жидкое стекло	1,5 ÷ 3,0	20 ÷ 30	

Термическую обработку сталей I2X18H10T и I0X17H13M2T проводили в камерной печи НР - 75 по режиму: нагрев до температуры 1050 ° С, выдержка - 37 мин., быстрое охлаждение в воде. Механические свойства термообработанных сталей представлены в таблице 2.5.

*Таблица 2.5 - Механические свойства нержавеющей сталей после термообработки*

Марка стали	d,	R <sub>B</sub>	σ <sub>B</sub>	R <sub>0,2</sub>	σ <sub>0,2</sub>	δ	ψ
	мм	кН	МПа	кН	МПа	%	%
I2X18H10T	11,98	64,0	570	27,6	240	55,6	77,5
I0X17H13M2T	12,22	69,5	590	32,2	270	46,6	73,0

Подготовка металла к волочению проводилась на Белорецком металлургическом заводе и включала следующие операции:

1. Разрыхление окалины путем обработки в расплаве щелочи. Компоненты расплава: каустическая сода - не менее 60 %, натриевая селитра - не менее 15 %, кальцинированная сода - не более 30 %, бура - 2-2,5 %. Температура расплава - 430÷500 °С. Время обработки - 15 мин.

2. Промывка в холодной проточной воде – 10 мин.

3. Травление в растворе с содержанием:

$H_2SO_4$  – 140÷240 г/л;  $NaNO_3$  - не менее 20 г/л;  $NaCl$  - 20-40 г/л;  $FeSO_4$  — не более 145 г/л. Температура – 60÷70 °С. Время травления - 20÷30 мин.

4. Промывка в холодной воде.

5. Промывка в горячей воде.

6. Нанесение подмазочного слоя в виде известково-солевого раствора. Состав раствора:  $CaO$  - 20÷30 г/л;  $NaCl$  - 260÷320 г/л. Температура 90÷100 °С. Время обработки - 5÷15 мин.

7. Сушка в течение 25 мин. при температуре 180 °С. Калибровка металла на диаметр 11,65 мм под высадку осуществлялась на стане однократного волочения 1/750 фирмы “Sket” (Германия). При волочении использовалась смазка, содержащая мыльный порошок (75 %) и серу (25 %).

Калиброванный металл подвергался испытаниям на растяжение, по результатам которых определялись механические свойства и записывались диаграммы  $P = f(\Delta l)$ , где  $\Delta l$  - удлинение образца;  $P$  растягивающее усилие. Испытания проводились на универсальной электромеханической разрывной машине «LFM» (Швейцария), которая может развивать максимальную нагрузку 250 кН (рисунок 2.2).

Разрывная машина оснащена накопителем информации, который расположен в компьютере, подключенном к разрывной машине. Машинная диаграмма испытаний (рисунок 2.3) выводилась на экран компьютера и распечатывалась. На диаграмме по оси абсцисс откладывается удлинение образца  $\Delta l$ , по оси ординат - сила деформирования  $P$ .



Рисунок 2.2 - Фотография блока крепления образцов универсальной разрывной машины «LFM»

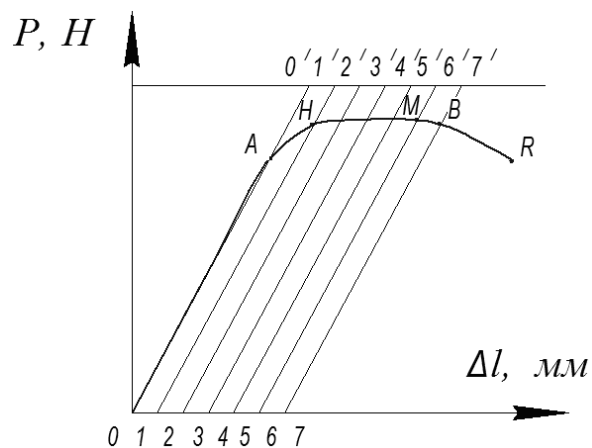


Рисунок 2.3 - Типовая машинная диаграмма растяжения образца и схема её обработки для построения кривой упрочнения

Обработывая диаграммы  $P = f(\Delta l)$ , по координатам точек определяли значения деформаций  $\Delta l$  образца и соответствующие им значения усилий  $P$ . По полученным данным и замерам образцов до и после деформации определяли механические свойства калиброванных сталей 12Х18Н10Т и 10Х17Н13М2Т, которые представлены в таблице 2. 6.

Таблица 2.6 - Механические свойства калиброванных сталей

I2XX8H10T и I0X17H13M2T

Марка стали	Номер образца	Основные показатели				Примечание
		Условный предел текучести	Предел прочности	Относительное сужение	Относительное удлинение	
		$\sigma_{0,2}$ , (МПа)	$\sigma_B$ , (МПа)	$\psi$	$\delta$	
I2X18H10T	1	575	697	70,5	33,3	Время выдержки t=240 часов
	2	560	693	70,5	35	
	3	560	692	71,5	33,3	
	сред.	568	694	70,8	33,8	
I0X17H13M2T	1	509	641	72,8	42,2	Время выдержки t=240 часов
	2	529	660	71,3	38,7	
	сред.	519	649	71,7	40,45	

Для определения энергосиловых параметров процессов пластического деформирования, напряжённо-деформированного состояния в штампуемых заготовках, эксплуатационных свойств изделий, ресурса пластичности и т.п. необходимые экспериментальные данные о характере изменения сопротивления деформации материала в процессе его деформирования. Для этого строят кривые упрочнения, которые характеризуют изменения сопротивления деформаций  $\sigma_S$  (напряжение текучести) в зависимости от степени деформации [51 - 61]. Для построения кривых упрочнения применяют различные методы испытаний образцов: на кручение, растяжение или сжатие.

Наибольшее распространение при построении кривых упрочнения получили методы испытаний на растяжение и осадку. При испытаниях на растяжение требуемая точность результатов обеспечивается при степенях деформации  $0,3 \div 0,4$ , то есть до момента образования шейки. При более высоких степенях деформации точность результатов снижается, так как приходится вводить поправки, учитывающие упрочнение при локальном растяжении в шейке деформируемого

образца.

В литературных источниках [52, 53, 59] приведены кривые упрочнения некоторых нержавеющей сталей аустенитного класса, в том числе сталей марок 12X18H9T и 10X17H13M2T. Однако представленные кривые в отдельных точках имеют существенное расхождение (30÷40% и более).

У применяемых нержавеющей сталей для штамповки крепежных изделий в нормативно-технической документации заложен сравнительно широкий диапазон содержания химических элементов, что приводит к значительным колебаниям механических свойств. Кроме того, различные режимы деформирования при калибровании металла перед штамповкой также приводят к существенному разбросу сопротивления деформации. Для исключения возникающих погрешностей образцы для построения кривых упрочнения и образцы для экспериментальных исследований необходимо изготавливать из сталей одной марки и одной партии.

Кривые упрочнения калиброванного металла (стали 12X18H10T и 10X17H13M2T) строились по результатам испытаний на растяжение. Этот же металл в дальнейшем использовался в экспериментах по отработке технологий штамповки крепежных изделий. Обработывая машинные диаграммы (см. рисунок 2.3), определяли параметры  $\sigma_s$  и  $e_i$ , для чего использовались следующие зависимости:

$$\bar{\sigma}_s = \left( \frac{P}{F_0} \right) \frac{l_0 + \Delta l}{l_0}; \quad (2.1)$$

$$\bar{e}_i = \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0}. \quad (2.2)$$

где  $\sigma_s$  - сопротивление деформации;

$P$  – сила на  $i$  - ом этапе растяжения образца;

$F_0$  – площадь поперечного сечения исходного образца;

$l_0$  - длина исходного образца;

$e_i$  – степень деформации;

$\Delta l$  - деформация образца на  $i$ -ом этапе.

По полученным данным построены кривые упрочнения, которые представлены на рисунке 2.4.

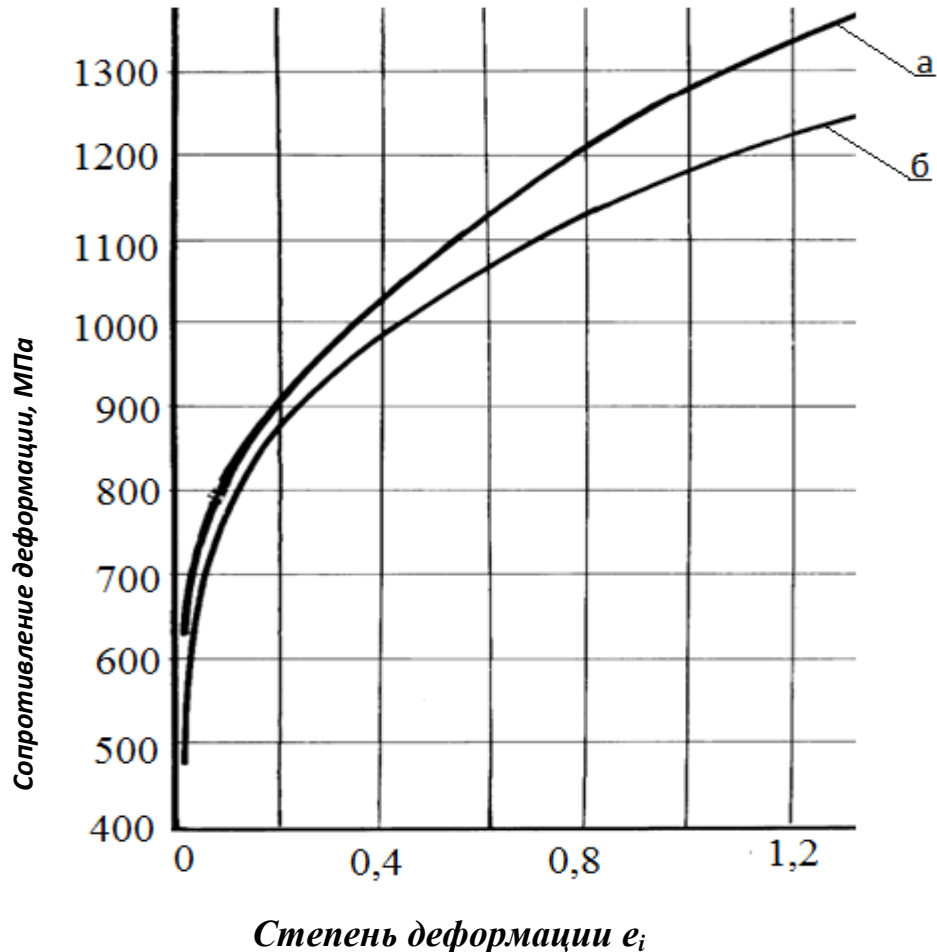


Рисунок 2.4 - Кривые упрочнения сталей: а - 12Х18Н10Т; б- 10Х17Н13М2Т

В теории ОМД для аппроксимации кривых упрочнения, в основном, используются аналитические зависимости либо линейные, либо степенные или экспоненциальные. Достаточно полно и точно описывает опытные кривые упрочнения в широком диапазоне степеней деформации экспоненциальная зависимость, предложенная Г.А. Смирновым - Аляевым [60-61]:

$$\sigma_i = (\sigma_i)_{пред.} - C e^{-e_i} - C_1 e^{-N e_i} \quad (2.1)$$

где:  $\sigma_i$  – напряжения при деформации металла;

$e_i$  – степень деформации;

$(\sigma_i)_{пред}$ ,  $C$ ,  $C_1$  – коэффициенты, которые находятся по полученным кривым упрочнения;

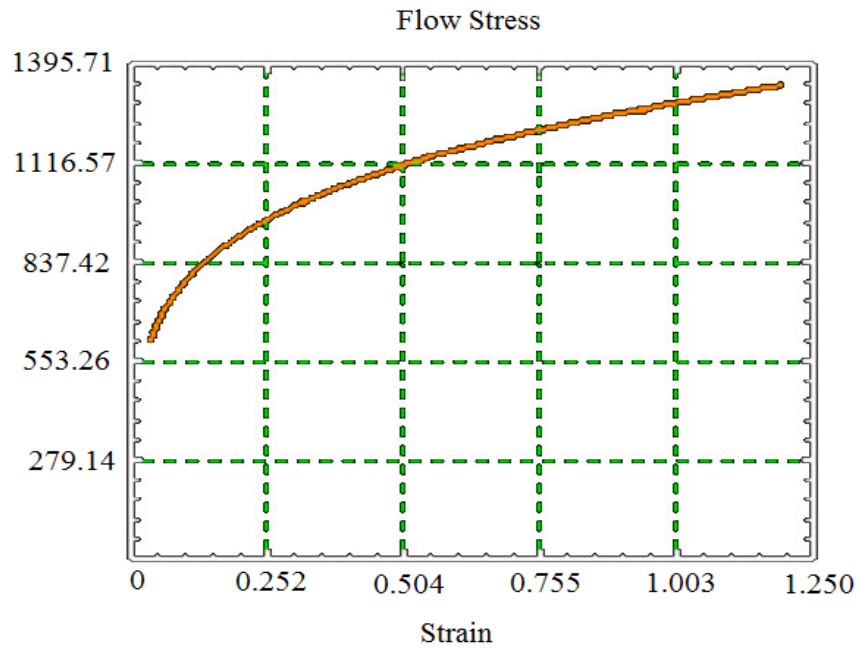
$N$  – показатель степени.

Для обработки результатов испытаний и определения коэффициентов уравнения (2.1) использовалась программы «Matcad». Значения параметров построенных кривых упрочнения представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 - Параметры кривых упрочнения

№ п/п	Марка стали	$(\sigma_i)_{пред}$	$C$	$C_1$	Примечание
		МПа	МПа	МПа	Время выдержки (час.)
1	I2X18H10T	1596,82	845,04	191,04	24
2	"-	1541,37	702,3	299,34	72
3	"-	1589,64	832,68	174,53	240
4	"-	1630,53	857,35	182,35	720
5	I0X17H13M2T	1426	649,08	516,2	240

Используя уравнение 2.1 и значения коэффициентов из таблицы 2.7 (строка № 1), кривая упрочнения стали марки I2X18H10T была импортирована в программный комплекс «Deform-3D» (рисунок 2.5) и использовалась в дальнейшем при компьютерном моделировании.



*Рисунок 2.5 – График кривой упрочнения стали марки I2X18H10T, импортированной в базу материалов ПК «Deform-3D»*

## **2.2. Поиск эффективных смазочных материалов и подсмазочных покрытий для штамповки стержневых крепежных изделий из нержавеющей сталей**

В процессах ОМД трение между деформируемой заготовкой и инструментом оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное состояние и энергосиловые параметры [62-68]. Как отмечено в главе 1 данной работы в настоящее время наиболее эффективным способом изготовления крепежа из нержавеющей сталей является холодная объемная штамповка. Процессы штамповки крепежных изделий, как из углеродистых, так и из нержавеющей сталей, не могут быть реализованы без применения соответствующих смазочных материалов и подсмазочных покрытий.

Поиск эффективных смазок и подсмазочных покрытий осуществлялся в несколько этапов. На начальном этапе на основании анализа информационных материалов отобран ряд смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) массового применения, которые широко используются на

протяжении последних 10-15 лет: Укринол 5/5; СН-М; СН-Ц; Эмбол-4; ХС-163, Твол; КТИОЛ; Игнол; ХС-170; Форсол [78,79].

Физико-химические свойства рассматриваемых СОТС представлены в таблице 2.8.

Все вышеотмеченные СОТС удовлетворяют требованиям ГОСТ 2917-76 в части коррозионной агрессивности по отношению к металлам и экологическим требованиям.

*Таблица 2.8 - Физико-химические показатели СОТС*

№	Показатели	ГОСТ	Укринол 5/5	СН-М	СН-Ц	Эмбол-4	ХС-170	Форсол	Игнол	ХС-163	Твол	КТИОЛ
1	Вязкость кинематическая при 50 °С $\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \cdot 10^{-6}$	33-82	62,5	69,6	—	18,2	96,2	81,7	92,3	52,3	23,4	20 ÷ 80
2	Температура вспышки в открытом тигле, °С	4333-87	153	190	—	168	153	—	—	151	—	180
3	Содержание серы, %	1431-85	1,53	1,43	6,02	7,15	2,15	—	—	1,9	—	—

Для оценки технологических свойств СОТС используются различные методы и методики [72,77]. В данной работе использовался метод деформирования заготовок в коническом отверстии [70,71]. Этот метод моделирует процессы выдавливания и редуцирования, которые широко используются в технологических процессах изготовления крепежных изделий штамповкой [3,13,23,25,32]. Именно при выполнении таких операций смазки и подмазочные покрытия в наибольшей степени влияют на стабильность технологических процессов. Метод деформирования в коническом отверстии обеспечивает высокую надежность результатов, так как, во-первых, соблюдается постоянство условий испытаний (размеры заготовок до и после деформиро-

вания, степень деформации), во-вторых, силы деформирования для одинаковых исходных заготовок зависят только от свойств смазок и подсмазочных покрытий.

На рисунке 2.6 представлены схемы процессов деформирования в коническом отверстии и выталкивания.

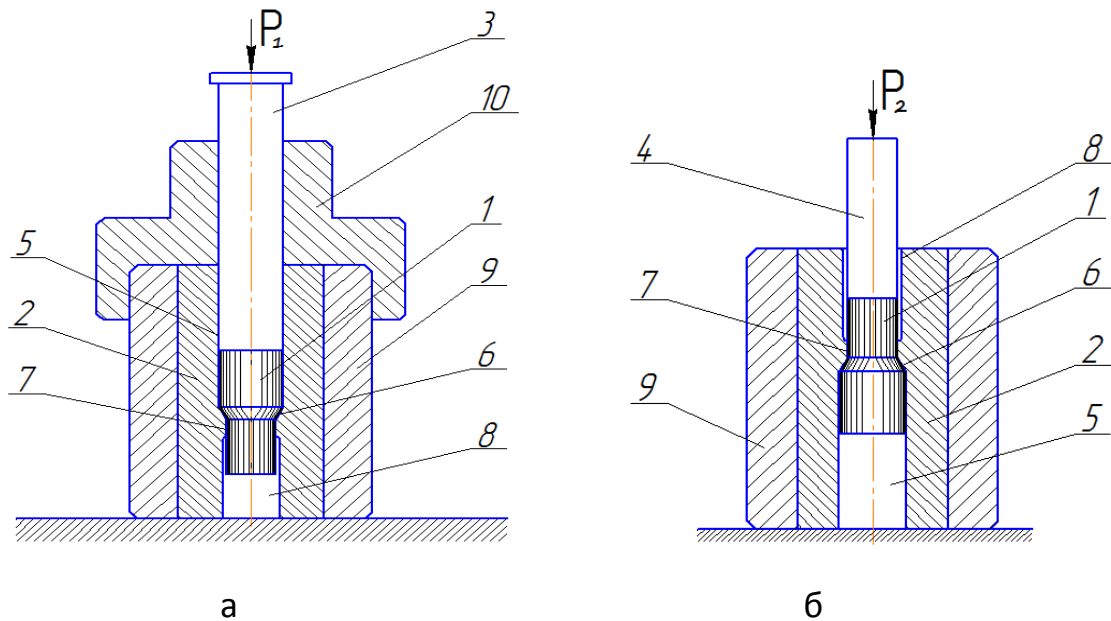


Рисунок 2.6 - Схемы процессов деформирования (а) в коническом отверстии и выталкивания (б): 1 – заготовка; 2 – матрица; 3 – пуансон;

4 – выталкиватель; 5 - заходное отверстие; 6 – деформирующий конус;

7- калибрующий пояс; 8- выходное отверстие; 9 - корпус матрицы;

10 - направляющая пуансона

На начальном этапе процесса выдавливания исходная заготовка 1, диаметр которой несколько меньше диаметра заходного отверстия 5 матрицы 2, под действием пуансона 3 осаживается в заходном отверстии 5, а на последующем этапе проталкивается через рабочий конус 6 и калибрующий пояс 7. В процессе выдавливания (см. рисунок 2.6а) работа силы  $P_1$  действия пуансона 3 на заготовку 1 тратится на работу внутренних сил деформирования и работу сил трения на поверхностях контакта металла с заходным отверстием 5, рабочим конусом 6 и калибрующим пояском 7. При этом работа внутренних сил деформирования существенно больше работы на преодоление сил трения.

В процессе выдавливания, из-за больших контактных давлений, в случае применения неэффективного смазочного материала может иметь место разрыв смазочной пленки. При этом в местах разрыва происходит схватывание поверхности деформируемого металла с поверхностью инструмента, что приводит к проблемам выталкивания деформированной заготовки из матрицы, вплоть до поломки выталкивателя.

При выталкивании деформированной заготовки 1 из матрицы 2 (см. рисунок 2.6б) работа силы  $P_2$  действия выталкивателя 4 на заготовку 1, тратится на работу сил трения на поверхностях контакта металла с заходным отверстием 5 и калибрующим пояском 7.

По силе трения при выталкивании можно судить о том, как смазочный материал обеспечивает разделение контактирующих поверхностей. Таким образом, величина силы при выталкивании заготовки из матрицы характеризует, во-первых, степень экранирующей способности смазочного материала, а во-вторых, величину прилипания (схватывание) материалов заготовки и инструмента [69].

В процессе редуцирования степень деформации существенно меньше, чем при выдавливании, заготовка пластически не деформируется в заходном отверстии 5 (см. рисунок 2.6а). Поэтому силы  $P_1$  действия пуансона 3 на заготовку 1 тратится на работу внутренних сил деформирования и работу сил трения на поверхностях контакта металла с рабочим конусом 6 и калибрующим пояском 7. При выталкивании проредуцированной заготовки (см. рисунок 2.5б) работа силы  $P_2$  действия выталкивателя 4 на заготовку 1 тратится только на работу сил трения на поверхности контакта металла с калибрующим пояском 7.

Испытания проводились на аттестованной разрывной машине ZD-100 (Германия) с использованием инструментальной оснастки (рисунок 2.7), с помощью которой моделировались процессы выдавливания и редуцирования исходной заготовки, а также процесс выталкивания деформированной заготовки из матрицы [70].



*Рисунок 2.7 - Инструментальная оснастка: 1 – матрица; 2 – пуансон; 3 – исходная заготовка; 4 – заготовка после деформации; 5 - выталкиватель; 6 – корпус для центрирования инструмента*

На этапе проверки технологических свойств СОТС моделировался процесс выдавливания, при котором заготовки из стали I2X18N10T (диаметр 11,65 мм, длина 24 мм) деформировались в коническом отверстии с углом рабочего конуса  $2\alpha = 90^\circ$  на диаметр 9,1 мм. Смазка на заготовки наносилась методом окунания. Для каждого вида смазок испытывалось по 6 образцов. Оценка технологических свойств СОТС осуществлялась по усредненным значениям максимальных сил выдавливания  $P_1$  и выталкивания  $P_2$ . Результаты испытаний представлены в таблице 2.9.

Анализ полученных результатов показал, что минимальные силы выдавливания возникают в случае использования СОТС: Эмбол-4, Форсол и КТИОЛ. По силам выталкивания наиболее эффективны Твол, Эмбол-4, и Форсол. Таким образом, из испытываемых смазок наилучшие результаты показали Эмбол-4, Форсол, КТИОЛ и Твол. Оптимальная вязкость СОТС составляет  $(20-40) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Таблица 2.9 - Силы выдавливания исходных заготовок и выталкивания из матрицы деформированных образцов при испытаниях СОТС

№ п/п	Наименование применяемых СОТС	Силы					
		$P_{1,}$ кН			$P_{2,}$ кН		
		min	max	$\bar{x}$	min	max	$\bar{x}$
1	Укринол 5/5	105	114,5	108	16	20	17,9
2	СН-М	104	111,5	108,2	18	22	19,3
3	СН-Ц	105	109	106,7	16	19,5	18,1
4	Эмобл-4	96,5	103	100,5	17	22	17,4
5	ХС-170	101	105,5	103,3	16	21,5	18,3
6	Форсол	98,5	103,5	101,3	17	19	17,6
7	Игнол	115	123,5	120,3	16,5	23,5	19,2
8	ХС-163	100	107	103,3	15	22	18
9	Твол	103,5	115	109,9	10	19,5	16,8
10	КТИОЛ	103	111,0	107,6	17	19	17,7

При высоких степенях деформирования нержавеющей сталей (более 50%) и удельных давлениях более 1000 МПа без экранирования поверхностей заготовки и инструмента имеет место образование задиров, а иногда «залипание» заготовки в матрице и в итоге поломка выталкивателя. Склонность нержавеющей сталей к налипанию на инструмент вызывает необходимость нанесения перед штамповкой подмазочных покрытий. Поэтому в ходе испытаний осуществлялся поиск эффективного способа подготовки поверхности [70,71]. При этом исходные заготовки диаметром 11,65 мм из стали I2X18Н10Т с различными покрытиями (фосфатное, оксидное и медное, наносимое различными способами) деформировались в конической отверстии с углом рабочего конуса  $2\alpha = 30^\circ$  на диаметр 10,78 мм. В качестве СОТС использовался Эмбол-4, который наносился методом окунания. Для каждого вида покрытия использовалось не менее 5 образцов. По усредненным значениям усилий деформирования и выталкивания оценивалась эффективность подмазочного покрытия.

При выполнении данного этапа исследований использовались фосфатное, оксалатное и медное покрытия, наносимые на предварительно отрезанные от калиброванного металла заготовки.

Технологический процесс нанесения фосфатного покрытия включал следующие операции:

1. Активация поверхности, то есть обработка в растворе серной кислоты  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (концентрация 23 %) при температуре  $70^\circ\text{C}$  в течение 5 мин.

2. Промывка водой.

3. Фосфатирование в растворе состава:  $\text{Zn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  –  $50 \div 70$  г/л;  $\text{CaCl}_2$  –  $5 \div 40$  г/л;  $\text{FeCl}_3$  –  $1,0 \div 1,5$  г/л, Температура раствора –  $80^\circ\text{C}$ . Продолжительность - 20 мин.

4. Промывка водой.

При нанесении оксалатного покрытия использовался раствор следующего состава: щавелевая кислота – 24 г/л; щавелевокислое железо – 12 г/л; двуххромовокислый калий - 6 г/л и поваренная соль - 180 г/л. Температура раствора -  $45 \div 50^\circ\text{C}$ . Время выдержки - 15 мин.

Медное покрытие на заготовки наносилось тремя методами: электролитическим, химико-термическим и фрикционным плакированием.

При электролитическом меднении заготовок состав электролита включал:  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  –  $180 \div 220$  г/л;  $\text{H}_2\text{SO}_4$  –  $40 \div 50$  г/л. Температура электролита -  $40 \div 50^\circ\text{C}$ .

Для получения различной толщины покрытия варьировались продолжительность процесса в диапазоне  $10 \div 30$  мин. и сила тока  $1 \div 4$  а. При этом наносились покрытия с толщиной от 10 мкм до 20 мкм.

Химико-термическое меднение заготовок из нержавеющей стали осуществлялось по технологии, разработанной специалистами «Института

электрохимии» РАН и «УрФУ им. Первого президента РФ Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург) [73-75]. При этом покрытие наносилось путем погружения заготовок в солевой расплав, имеющий температуру  $450\div 470$  °С, с выдержкой в течение 5 мин. После меднения заготовки промывались в горячей ( $t \geq 60$ °С) и холодной воде.

Нанесение медного покрытия способом фрикционного плакирования осуществлялось по технологии, разработанной специалистами Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова [76]. Сущность способа (рисунок 2.8) заключается в том, что вращающаяся металлическая щетка 2 снимает частицы материала покрытия с бруска 4 и переносит их на поверхность обрабатываемой детали 1, образуя слой 3 покрытия.

Результаты лабораторных и промышленных испытаний, а также многолетний опыт эксплуатации быстроизнашиваемых деталей пар трения (штоков гидроцилиндров, опор подшипниковых узлов, вкладышей шпиндельных устройств, метчиков и т.п.) показывают, что формирование на их поверхности медьсодержащих и полимерных покрытий позволяет от 1,5 до 10 раз снизить скорость износа [76].

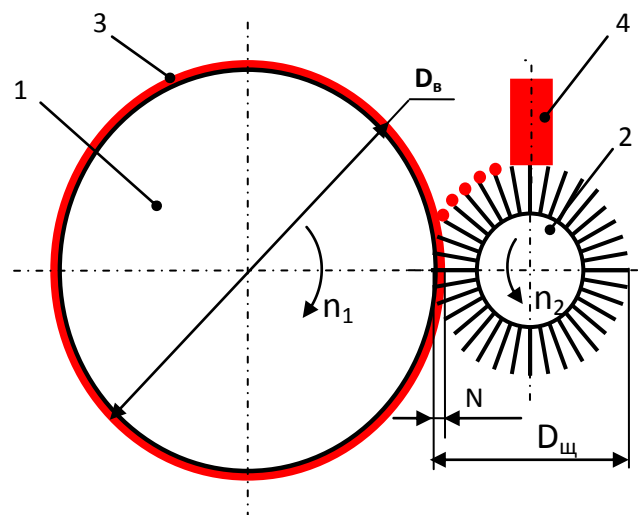


Рисунок 2.8 - Способ фрикционного плакирования:

1 – обрабатываемая деталь; 2 – вращающаяся металлическая щетка;

3 – слой покрытия на детали; 4 – брусок из материала покрытия.

При фрикционном плакировании наблюдаются следующие явления:

- при взаимодействии вращающейся щетки с деталью происходит разрушение и удаление загрязнений (даже масляных плёнок, т.к. процесс протекает с выделением тепловой энергии) и окисных пленок из зоны контакта;
- замятие микронеровностей и поверхностное течение металла приводит к образованию ювенильных поверхностей детали и инструмента, в результате чего происходит схватывание контактирующих с материалом ворсины;
- интенсивное тепловыделение при трении ворсины о поверхность изделия способствует схватыванию материала покрытия с обрабатываемой поверхностью.

Результаты испытаний представлены в таблице 2.10.

*Таблица 2.10 - Силы деформирования  $P_1$  и выталкивания  $P_2$  при редуцировании заготовок из стали 12Х18Н10Т с различными видами покрытий*

№ п/п	Тип подготовки поверхности	Усилие					
		$P_1$ , кН			$P_2$ , кН		
		min	max	$\bar{X}$	min	max	$\bar{X}$
1	Электролитическое меднение, $\Delta = 10$ мкм	48,2	49,6	48,76	5,0	5,8	5,48
2	Электролитическое меднение, $\Delta = 15$ мкм	49,5	52,0	50,5	5,0	9,0	6,21
3	Электролитическое меднение, $\Delta = 20$ мкм	47,0	53,0	47,55	4,0	6,0	4,98
4	Меднение фрикционным	46,0	51,0	48,7	4,8	6,5	5,45
5	Химико-термическое меднение	45,3	47,3	46,3	5,1	6,0	5,21
6	Оксалатирование	44,0	46,0	44,95	4,2	6,2	4,95
7	Фосфатирование	47,0	48,0	47,68	5,1	6,5	5,52

Анализ полученных результатов показывает, что наиболее эффективными покрытиями являются оксалатное и медное, нанесенное химико-термическим способом.

Специалистами Уфимского государственного авиационного технического университета при участии работников АО «Белебеевский завод «Автонормаль» проведен большой комплекс исследований, направленных на поиск эффективных смазочных материалов зарубежного и отечественного производства [80-83]. В частности, проведены испытания импортных СОТС, таких как «НFF-22» фирмы «Файншнайдоль» (Германия), «Илоформ ФН-276» фирмы «Кастрол» (Англия), «PW-1655» фирмы «Сульфохем», «Макко-Экструдойл-51» и «Экструдинг-641» фирмы «Витко Кемикал» (США) на операциях штамповки крепежных изделий и формообразования внутренних резьб, как резанием, так и пластическим деформированием с использованием бесстружечных метчиков. Анализ результатов испытаний показал, что наиболее эффективными СОТС являются «Макко-Экструдойл-51» и «Экструдинг-641», обеспечивающие хорошую технологическую деформируемость, стабильность свойств при эксплуатации, независимость от степени и скорости деформирования и высокую стойкость инструмента. Хорошие показатели у смазочного материала «Эмбол-4», но при его использовании при накатке резьб отмечался неприятный запах, а возникающий масляный туман раздражал слизистую оболочку глаз. Другие опробованные СОТС обладают более худшими свойствами, особенно по проблемам стойкости инструмента.

На основе проведения большого комплекса лабораторных исследований и опытно-промышленных испытаний специалистами Уфимского государственного авиационного технического университета была разработана композиция «Росойл-ШОК» [84], не уступающей по технологическим свойствам смазочному материалу «Экструдинг-641». В частности, проводились сравнительные испытания эффективности применения СОТС «Экструдинг-641», «Белойл» (ООО «Белойл») и «Росойл-ШОК». При этом осуществлялось прямое выдавливание образцов из стали 08Х18Н10Т (диаметр – 5 мм, длина – 15 мм) со скоростью деформирования 100 мм/мин при различной степени деформации.

На основании анализа результатов исследования установлено, что применение смазочного материала «Росойл-ШОК» по сравнению «Экструдинг-641» обеспечивает снижения силы выдавливания при степени деформации 20% на 6%, а при  $\varepsilon = 50\%$  на 9%. Силы выталкивания снижаются на 10% при  $\varepsilon = 20\%$  и на 15% при  $\varepsilon = 50\%$ .

### **2.3. Исследование процесса отрезки заготовок и оценка качества реза**

При изготовлении стержневых крепежных изделий холодной объемной штамповкой на холодновысадочных автоматах первой технологической операцией является отрезка заготовки от калиброванного металла [13,25]. Качество отрезанной заготовки существенно влияет на процесс деформирования и в конечном итоге на качество отштампованного изделия.

Отрезка заготовок на холодновысадочных прессах - автоматах в зависимости от их конструктивных особенностей машин производится различными способами. На однопозиционных автоматах с цельной матрицей и некоторых многопозиционных автоматах отрезка производится специальным ножом, который затем с помощью придерживающих элементов переносит заготовку на линию высадки. На однопозиционных автоматах с разъемной матрицей отрезка производится задней торцевой поверхностью одной из полуматриц при ее движении к линии высадки.

На современных многопозиционных автоматах отрезка заготовки осуществляется закрытым ножом в виде втулки. Отрезанная заготовка переносится в ноже-втулке на промежуточную позицию, где специальным стержнем заталкивается в переносящие клещи, которые транспортируют ее на линию штамповки. В этом случае повышается качество реза и значительно улучшаются условия работы механизма отрезки, так как уменьшается ход ножа.

На качество отрезанной заготовки, а, следовательно, и на качество готовых изделий существенное влияние оказывают механическая схема отрезки, форма и состояние ножей, жесткость режущего инструмента, скорость отрезки, контактное трение и т.д. Механическая схема отрезки определяется взаимным положением прутка и рабочих частей ножа, а также силовым воздействием на пруток. Она характеризуется геометрическими и силовыми параметрами. К геометрическим параметрам относятся осевой зазор между ножами, радиальный зазор между поверхностью прутка и ножом, угол наклона оси прутка. Силовыми параметрами являются усилия отрезки, усилия поперечного зажима и усилия осевого сжатия.

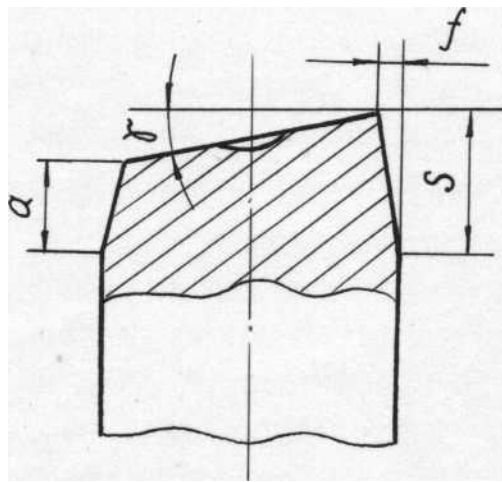
Согласно классификации, представленной в работах [85,86], механическая схема отрезки заготовок на однопозиционных автоматах с цельной матрицей может быть отнесена к неполной открытой, а отрезка на автоматах с разъемной матрицей и многопозиционных с ножом - втулкой - к неполной закрытой. А в работе [85] отмечается, что переход от неполной открытой к неполной закрытой схеме резки сопровождается изменением схемы напряженного состояния в очаге деформации и ведет к улучшению качества отрезки заготовки.

Для получения качественных заготовок форма рабочей части ножа должна быть близка к форме контура поперечного сечения прутка, а радиус скругления режущей кромки не должен превышать  $0,02 \div 0,03$  диаметра прутка.

Недостаточная жесткость режущего инструмента приводит к упругой деформации его частей, в результате чего нарушаются осевой и радиальные зазоры, угол наклона прутка, а следовательно, ухудшается качество отрезки заготовок. Поэтому применение твердосплавного отрезного инструмента вместо стального обеспечивает получение более качественных заготовок [86].

В общем случае отрезанная заготовка имеет форму, показанную на рисунке 2.9. Основные параметры искажения формы: утяжка продольная  $S$  и поперечная  $f$ , смятие  $a$ , угол скоса торца  $\gamma$  количественно зависят от конкретных условий отрезки.

Отрезка заготовок осуществлялась на холодновысадочном автомате-комбайне АВ-1921. Узел отрезки автомата и применяемый инструмент обеспечивают осуществление закрытого втулочного реза.



*Рисунок 2.9 - Форма концевого участка отрезанной заготовки и параметры, характеризующие качество реза*

Качество реза оценивалось визуально по наличию заусенцев, сколов, трещин, а также путем замера параметров  $S$ ,  $f$ ,  $a$ ,  $\gamma$  (см. рисунок 2.9), где  $S$  - продольная утяжка;  $f$  - поперечная утяжка,  $a$  - смятие;  $\gamma$  - угол скоса торца.

Для сравнительного анализа качества реза заготовок из стали I2X18H10T дополнительно производилась отрезка заготовок из стали 10 и оценка их качества реза.

Замеры параметров  $S$ ,  $f$ ,  $a$   $\gamma$  осуществлялись на инструментальном микроскопе. Результаты замеров представлены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 - Параметры, характеризующие качество реза

Марка стали	№ образца	S, мм	a, мм	f, мм	γ, град
10	1	0,331	4,597	0,585	7°40'
	2	0,318	4,155	0,451	4°45'
	3	0,17	4,112	1,026	2°22'
	4	0,288	2,622	0,398	6°20'
	5	0,316	3,843	0,139	8°30'
	среднее	0,285	3,866	0,528	5°55'
I2X18H10T	1	5,848	0,781	0,661	3°10'
	2	5,321	0,823	0,675	1°10'
	3	6,88	0,759	0,669	1°20'
	4	5,991	0,805	0,672	1°50'
	5	5,751	0,816	0,551	3°10'
	6	6,43	0,821	0,620	3°25'
	7	5,368	0,792	0,524	3°15'
	8	4,298	0,786	0,542	1°25'
	9	5,021	0,798	0,581	1°30'
	10	4,903	0,808	0,597	3°10'
	среднее	5,581	0,802	0,609	2°26'

Анализ результатов экспериментов [89] показал, что качество заготовок, отрезанных от калиброванной стали I2X183I0T выше качества заготовок из стали 10.

## 2.4. Выводы по главе 2

1. Выполнен анализ химического состава и проведены испытания механических свойств горячекатаных нержавеющей сталей I2X18H10T и I0X17H13M2T, которые использовались в экспериментах. Испытания на

осадку цилиндрических образцов до  $1/3$  первоначальной высоты не выявили наличие поверхностных дефектов.

2. Проведена подготовка нержавеющей стали к штамповке, которая включала обезжиривание, термобработку, разрыхление окалины, травление, промывку, нанесение подмазочного слоя и калибровку. Проведены испытания калиброванного металла, определены механические свойства и построены кривые упрочнения, для описания которых использовалась экспоненциальная зависимость, предложенная Г.А. Смирновым-Аляевым.

3. Выполнен поиск эффективных подмазочных покрытий и смазочных материалов для штамповки изделий из нержавеющей стали. Оценивая эффективность подмазочных покрытий и смазочных материалов по силам деформирования заготовок в коническом отверстии (выдавливание и редуцирование) и их выталкивания из матрицы, установлено, что при холодной штамповке крепежных изделий из нержавеющей стали:

- наиболее эффективными подмазочными покрытиями являются оксидное и медное, нанесенное химико-термическим способом;
- среди традиционных СОТС хорошие результаты обеспечивают Эмбол-4, Форсол, КТИОЛ и Твол;
- среди современных СОТС зарубежного производства наиболее эффективными являются «Макко-Экструдойл-51» и «Экструдинг-641» (фирма «Витко Кемикал», США), а отечественный смазочный материал «Росойл-ШОК» и его модификации по технико-экономическим показателям не уступают лучшим мировым аналогам.

### 3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ШЕСТИГРАННЫХ ГОЛОВЕК БОЛТОВ И ВИНТОВ

#### 3.1. Метод конечных элементов и программный комплекс «DEFORM-3D»

В настоящее время метод конечных элементов (МКЭ) является наиболее широко используемым методом математического моделирования процессов деформирования различных материалов [91-97]. Среди известных программных продуктов («MARC», «ANSYS», «QForm», «MARC», «ABAQUS» и др.), применяемых для моделирования процессов деформирования, можно выделить программный комплекс «DEFORM-3D», разработанный американской компанией «Scientific Forming Technologies Corporation «SFTC» (США) [98]. Этот комплекс позволяет с высокой степенью точности моделировать процессы трехмерного объемного деформирования при обработке металлов давлением.

Математическая задача, положенная в основу программного комплекса «DEFORM» решается с использованием известных уравнений механики сплошной среды, теории пластичности, обработки металлов давлением и теплопроводности при определенных начальных и граничных условиях для различных зон деформируемого тела. В программном комплексе используются следующие зависимости и соотношения:

#### 1. Дифференциальные уравнения равновесия

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial X_j} + G_i = 0, \text{ или } \frac{\partial \sigma_{ix}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{iy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{iz}}{\partial z} + G_i = 0, \quad (3.1)$$

где  $G_i$  – сила, приходящаяся на единицу объема.

При этом объемная сила представляет собой силу инерции  $G_i = -a_i \rho$ , где  $\rho$  – плотность деформируемого материала ( $\text{кг/м}^3$ ),  $a_i$  – ускорение на  $i$  – ом этапе деформирования, которое определяется по формуле

$$a_i = \frac{v_{i1} - v_{i0}}{\Delta t}, \quad (3.2)$$

где  $v_{i0}$  и  $v_{i1}$  - скорости в начале и конце каждого деформационного шага (м/с),  $\Delta t$  - продолжительность этапа деформирования (с).

2. Уравнения связи компонент тензора деформации и вектора перемещений выражаются в виде дифференциальных зависимостей Коши

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \frac{\partial U_k}{\partial x_j} \right). \quad (3.3)$$

3. Скорость перемещения узлов конечных элементов выражается в матричном виде

$$v_i = [N] \{v_e\}, \quad (3.4)$$

где  $[N]$  - функция, описывающая форму элемента;  $\{v_e\}$  - вектор скоростей узловых точек.

Скорость деформации выражается из уравнения (3.4) путем дифференцирования

$$\xi = [B] \{v_e\}, \quad (3.5)$$

где  $[B]$  - матрица, выражающая связь компонент скоростей деформации с компонентами узловых скоростей.

4. Используется условие пластичности Губера-Мизеса

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)} = \sigma_T, \quad (3.6)$$

где  $\sigma_T$  - предел текучести материала.

5. Для учета теплового эффекта при пластической деформации используется уравнение теплового баланса

$$cT\rho = k_l T_{li,i} + \beta \bar{\sigma} \bar{\varepsilon}, \quad (3.7)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость материала при постоянном объеме;  $T$  – средняя температура деформируемой среды в градусах Кельвина;  $k_l$  – коэффициенты, определяющие условия теплообмена на границе  $l$ ;  $T_{li,i}$  – тепловое поле на границе  $l$ ;  $\beta$  – коэффициент, учитывающий тепловыделение при деформации;  $\bar{\varepsilon} = \int_0^{\tau} \xi d\tau$  – накопленная деформация.

6. Для описания условий трения используются соответствующие законы трения.

При исследовании процессов холодной пластической деформации используется закона Кулона-Амонтона, согласно которому касательные напряжения на поверхности контакта деформируемого материала с инструментом прямо пропорциональны нормальным

$$\vec{\tau} = f \vec{\sigma}, \quad (3.8)$$

где  $f$  – коэффициент трения.

При горячей пластической деформации применяется закон трения по Зибелю

$$\vec{\tau} = f \vec{\sigma}_s, \quad (3.9)$$

где  $\vec{\sigma}_s$  – предел текучести.

7. При решении упругопластических задач для областей, находящихся в упругом состоянии, связь между деформациями и напряжениями выражается в виде обобщенного закона Гука, куда входят  $E$  – модуль упругости Юнга;  $G$  – модуль сдвига;  $\mu$  – коэффициент Пуассона. Эти параметры связаны между собой зависимостью

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (3.10)$$

Для пластических зон вводятся переменные параметры упругости  $E^*$  и  $G^*$ , уравнение связь между которыми аналогично (3.10), и применяются уравнения, подобные закону Гука.

При горячем пластическом деформировании используется модель среды, выражающая напряжение течения в зависимости от степени деформации, скорости деформации и температуры

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\varepsilon, \xi, T). \quad (3.11)$$

В теории ОМД применяются эмпирические формулы для аппроксимации уравнения (3.11) аналитическими зависимостями [59-61,99-101]. Однако эти формулы недостаточно точно передают количественный и качественный характер зависимости (3.11). В программном комплексе «DEFORM-3D» аппроксимацию сопротивления деформации в зависимости от термомеханических параметров осуществляют непосредственно на основе экспериментальных данных, представленных в виде таблиц.

8. При решении задач с использованием ПК «DEFORM-3D» используется вариационный принцип Лагранжа, то есть принято, что истинное состояние деформируемой среды отличается от всех возможных тем, что полная энергии деформации принимает минимальное значение [90].

Расчеты производятся пошагово. Значения параметров (перемещения, деформации и напряжения) на каждом шаге определяются как

$$U = U_* + \Delta U ; \quad \varepsilon = \varepsilon_* + \Delta \varepsilon ; \quad \sigma = \sigma_* + \Delta \sigma , \quad (2.12)$$

где  $U_*, \varepsilon_*, \sigma_*$  - значения параметров на предыдущем шаге, которые обеспечивают минимум функционала полной энергии деформации.

Таким образом, задача сводится к определению приращений функций  $\Delta U, \Delta \varepsilon, \Delta \sigma$ , при которых функционал принимает минимальное значение.

В итоге функционал, описывающий полную работу деформации на  $i$ -ом этапе деформирования, принимает вид

$$\chi = \frac{1}{2} \iiint_V (\sigma \Delta \varepsilon + \Delta \sigma \varepsilon + \Delta \sigma \Delta \varepsilon) dV - \iiint_V G_i \Delta U dV - \iint_S \tau \Delta U dS \quad (3.13)$$

В представленном функционале (3.13) первое слагаемое есть работа внутренних сил, второе слагаемое – работа массовых сил, третье слагаемое – работа поверхностных сил трения.

Входящие в функционал (3.13) параметры выражаются через матричные и векторные составляющие, интегралы заменяются суммами и задача сводится к решению систем линейных уравнений относительно перемещений. По найденным значениям  $\Delta U_1, \Delta U_2, \dots, \Delta U_n$  определяются перемещения  $U$ , деформации  $\varepsilon$ , скорости деформации  $\xi$ , напряжения  $\sigma$ , компоненты тензоров деформации и напряжений, интенсивность деформаций, интенсивность напряжений, силы нормального давления, силы трения на контактной поверхности, критерий разрушения, распределение температуры по объему деформируемой среды и другие параметры.

При сопоставительном анализе различных вариантов технологии изготовления одностипных изделий, с целью оценки влияния напряженно-деформированного состояния на образование микродефектов в процессах холодной пластической деформации, используется известный критерий разрушения Кокрофта-Лэтэма (Cockcroft & Latham) [102-106]. Этот критерий определяется непосредственно в процессе расчета с использованием программного комплекса «DEFORM-3D».

Критерий разрушения Кокрофта-Лэтэма

$$D = \int_0^{\varepsilon_i} \frac{\sigma^*}{\sigma_i} d\varepsilon_i \quad (3.14)$$

где  $\varepsilon_i$  – интенсивность деформаций по Мизесу;

$\sigma^*$  – максимальное главное растягивающее напряжение;

$\sigma_i$  – интенсивность напряжений по Мизесу.

Работа с использованием программного комплекса «DEFORM-3D» осуществляется в следующей последовательности:

1. В зависимости от формы заготовки и формы изделия, конструкции инструмента и условий деформирования выбирается тип конечно-элементного анализа (задача плоская или осесимметричная или объемная).

2. Используя графические программные комплексы типа «COMPAS», создаются геометрические модели исходной заготовки и инструмента, которые переносятся в ПК «DEFORM-3D».

3. Деформируемая среда разбивается на элементы путем нанесения сетки конечных элементов. В программном комплексе «DEFORM-3D» форма элементов может быть в виде треугольников, четырехугольников, тетраэдров, трехгранных призм, пятигранников, шестигранников и др. Все зависит от того, какая решается задача (плоская, осесимметричная или объемная). От этого этапа моделирования существенно зависят трудоемкость и точность расчетов. ПК «DEFORM-3D» позволяет автоматически разбивать деформируемый объем на требуемое количество элементов и изменять плотность сетки в некоторых зонах деформируемого тела.

4. Задаются реологические свойства деформируемого материала. Для известных материалов, заложенных в базе данных ПК «DEFORM-3D», используется соответствующая информация. А в случае использования новых материалов их термомеханические свойства задаются в виде табличных данных.

5. Задается температура начала процесса деформирования заготовки.

6. Задаются условия контактного взаимодействия заготовки и инструмента (закон трения, коэффициент трения и т.п.).

7. Определяется закон движения подвижного инструмента. При моделировании процесса штамповки на кривошипных прессах задаются угловая скорость вращения кривошипа, длины кривошипа и шатуна.

8. По результатам выполненных с заданной точностью расчетов определяются перемещения  $U$ , деформации  $\varepsilon$ , скорости деформации  $\xi$ , напряжения  $\sigma$ , компоненты тензоров деформации и напряжений, интенсивность деформаций, интенсивность напряжений, сила нормального давления, сила трения на поверхности контакта металла с инструментом, распределение температуры по объему деформируемой среды и другие параметры.

9. Результаты выполненных с помощью ПК «DEFORM-3D» расчетов представляются либо в виде полей распределения соответствующих параметров по объему деформированного тела, либо в виде численных значений в узлах деформированной сетки, либо в отдельных выделенных точках.

### 3.2. Моделирование процесса обрезки головки на шестигранник

Резьбовые стержневые крепежные изделия типа болтов и винтов выполняются с головками, у которых для передачи крутящего момента, как правило, выполняются элементы в виде многогранников с четырьмя, шестью и двенадцатью гранями, либо шлицев. Наиболее широко используются изделия с шестигранными головками, объем производства которых составляет порядка 25% от общего выпуска стержневых крепежных изделий.

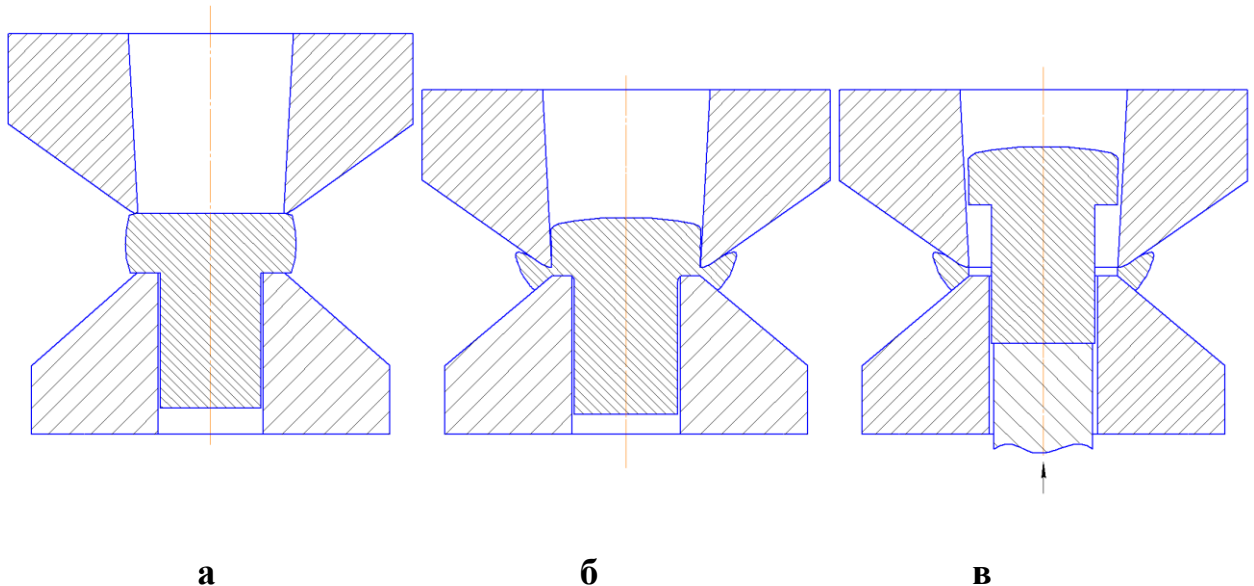
При изготовлении стержневых крепежных изделий с диаметром стержня до 22÷24 мм наиболее эффективно применение технологий, включающих холодную объемную штамповку (ХОШ) с использованием высокопроизводительных многопозиционных кузнечно-прессовых автоматов (КПА). Такие технологии, как правило, включают высадку бочкообразной головки за один или два перехода и обрезку головки на многогранник.

В зависимости от конструктивного исполнения обрезного инструмента (пуансон и матрица) применяются процессы односторонней [3,13,25] и двухсторонней обрезки [29, 31].

При односторонней обрезке используется инструмент, содержащий соосно установленные в корпусах матрицу и пуансон. У матрицы выполнено центральное сквозное отверстие, диаметр которого чуть больше диаметра стержня обрезаемого болта, и гладкая торцевая рабочая плоскость. Пуансон имеет сквозное отверстие в виде усеченной пирамиды и торцевую рабочую поверхность в форме шестигранной усеченной пирамиды, причем меньшее основание пирамиды образовано плоскостью, перпендикулярной оси отверстия. На пересечении поверхности пирамидального отверстия и торцевой рабочей поверхности образуются режущие кромки, профиль которых соответствует профилю обрезаемой головки.

При холодной штамповке болтов с использованием КПА обрезка граней осуществляется за два этапа (рисунок 3.1). На первом этапе одно-

сторонней обрезки пуансон внедряется в головку, а срезаемый металл зажимается между торцевыми поверхностями матрицы и пуансона, образуя облой. На втором этапе выталкиватель, воздействуя на торец стержня заготовки болта, проталкивает её через пуансон, отделяя облой от головки.



*Рисунок 3.1 - Схема процесса односторонней обрезки шестигранной головки: а – начало первого этапа; б - окончание первого этапа; в – второй этап*

Недостатком односторонней обрезки является неравномерный износ инструмента и низкий срок службы пуансона. Это обусловлено тем, что пуансон обрезает практически всю головку по высоте и в процессе обрезки испытывает значительные осевые и радиальные усилия, в то время как матрица испытывает только сжимающие усилия на торцевой контактной поверхности. Частая замена пуансона приводит к затратам рабочего времени на замену и настройку инструмента. Кроме того, применение односторонней обрезки, зачастую, приводит к образованию заусенца на торцевой опорной поверхности головки изделия, что снижает качество изделий.

Экспериментальные исследования, результаты которых представлены в главе 4, показали, что при формировании головки болта из нержавеющей стали I2X18Н10Т односторонней обрезкой качество шестигранника низкое из-

за образования значительных заусенцев, сколов, вырывов и рябизны (рисунок 3.2).

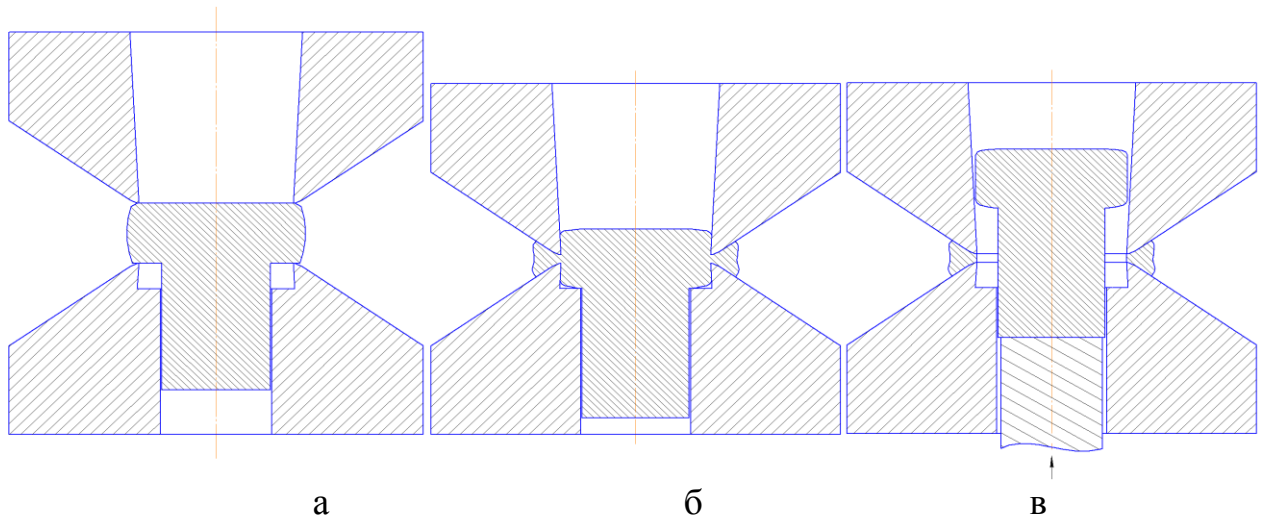


*Рисунок 3.2 - Фотография головки болта М12 из нержавеющей стали 12Х18Н10Т после односторонней обрезки на шестигранник*

При двухсторонней обрезке (рисунок 3.3) матрица имеет ступенчатое отверстие, один участок которого выполнен в виде цилиндрического отверстия под стержень обрезаемого болта, а другой - в виде шестигранной призмы. На пресечении шестигранного отверстия с рабочей торцевой поверхностью матрицы образуются режущие кромки, профиль которых соответствует профилю обрезаемой головки и профилю режущих кромок пуансона.

На первом этапе процесса двухсторонней обрезки металл срезается с двух сторон и зажимается между торцевыми поверхностями матрицы и пуансона, образуя облой, а на втором этапе при движении выталкивателя происходит отделение облоя от головки.

Преимущества двухсторонней обрезки заключаются в снижении усилий на пуансон, что обеспечивает повышение его стойкости. Кроме того, возникающий заусенец не выходит на опорную поверхность головки болта, а сглаживается боковыми гранями отверстия пуансона при проталкивании головки через пуансон, что обеспечивает повышение качества изделий.



*Рисунок 3.3 - Схема процесса двухсторонней обрезки шестигранной головки: а – начало первого этапа; б - окончание первого этапа; в – второй этап*

Цель данного этапа исследования - поиск эффективных схем и режимов деформирования в процессах одно- и двухсторонней обрезки шестигранных головок болтов на основе конечно-элементного моделирования.

Конечно-элементное моделирование процессов обрезки осуществлялось с использованием программного комплекса «DEFORM-3D» (лицензия: Machine 38808), применение которого позволяет оценить влияние технологических факторов (реологические свойства металла, форма и размеры инструмента и заготовки, параметры очага деформации и др.) на напряженно-деформированное состояние. Полученные по результатам компьютерного моделирования поля распределения компонентов тензора напряжений  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  и тензора деформаций  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$  интенсивности напряжений  $\sigma_i$  и интенсивности деформаций  $\varepsilon_i$  по всему объему обрабатываемого металла позволяют оценить и проанализировать полученные данные и выбрать рациональные режимы деформирования.

При моделировании процесса обрезки головки на шестигранник с использованием ПК «DEFORM-3D» приняты следующие допущения: рабочий инструмент рассматривался как абсолютно жесткое тело с постоянной

температурой; исходный деформируемый материал считался однородным и изотропным; деформируемая среда упруго-пластическая; температура заготовки постоянная; контактное трение задавалось по закону Кулона-Аматона. Коэффициент трения принимался постоянным по всей длине контактной поверхности. Геометрия инструмента и обрезаемой заготовки проектировалась в системе «COMPAS» и затем импортировалась в «DEFORM-3D».

С позиции негативного влияния на процесс обрезки наибольший интерес представляет распределение в деформируемом металле растягивающих нормальных напряжений и напряжений сдвига. При локальном действии значительных нормальных растягивающих напряжений и напряжений сдвига в деформируемом металле образуются зоны, в которых возможно образование микродефектов в виде трещин, вырывов, заусенцев, пор и т.п., что приводит к образованию брака.

По результатам моделирования с использованием ПК «DEFORM-3D» построены поля распределения растягивающих напряжений при односторонней (рисунок 3.4, а) и двухсторонней (рисунок 3.4, б) обрезке головок на шестигранник. При этом использовалась следующая система осей координат: ось  $z$  направлялась вверх, ось  $x$  - перпендикулярна плоскости разреза головки, а ось  $y$  - вправо. На рисунке 3.4 также отмечены точки, расположенные вблизи зоны отрезки, в которых определялись нормальные напряжения  $\sigma_y$ . Отсчет велся от опорной поверхности головки.

На рисунке 3.5 представлены графики изменения нормального напряжения  $\sigma_y$  при односторонней и двухсторонней обрезке по высоте головки.

При этом по оси абсцисс откладывалась относительная координата точек  $\frac{z}{K}$ , где  $K$  – высота головки болта.

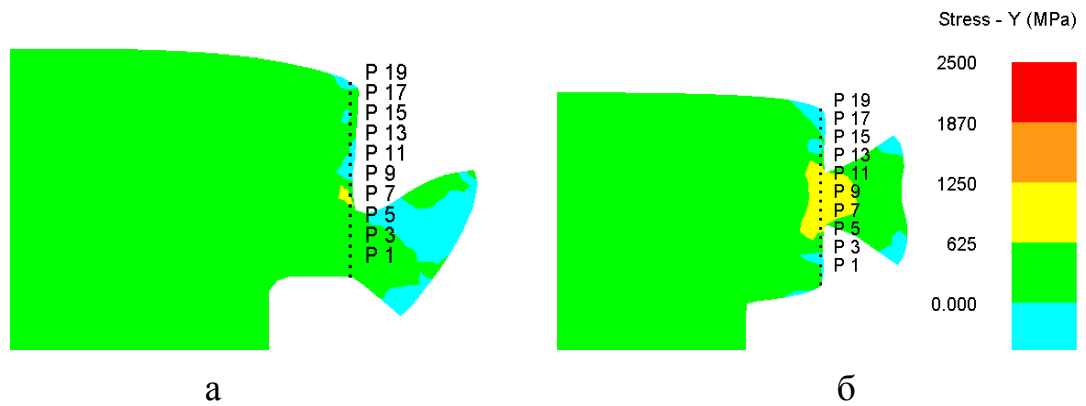


Рисунок 3.4 - Поля распределения нормальных напряжений  $\sigma_y$  и точки, в которых определялись напряжения: а - при односторонней обрезке; б - при двухсторонней обрезке

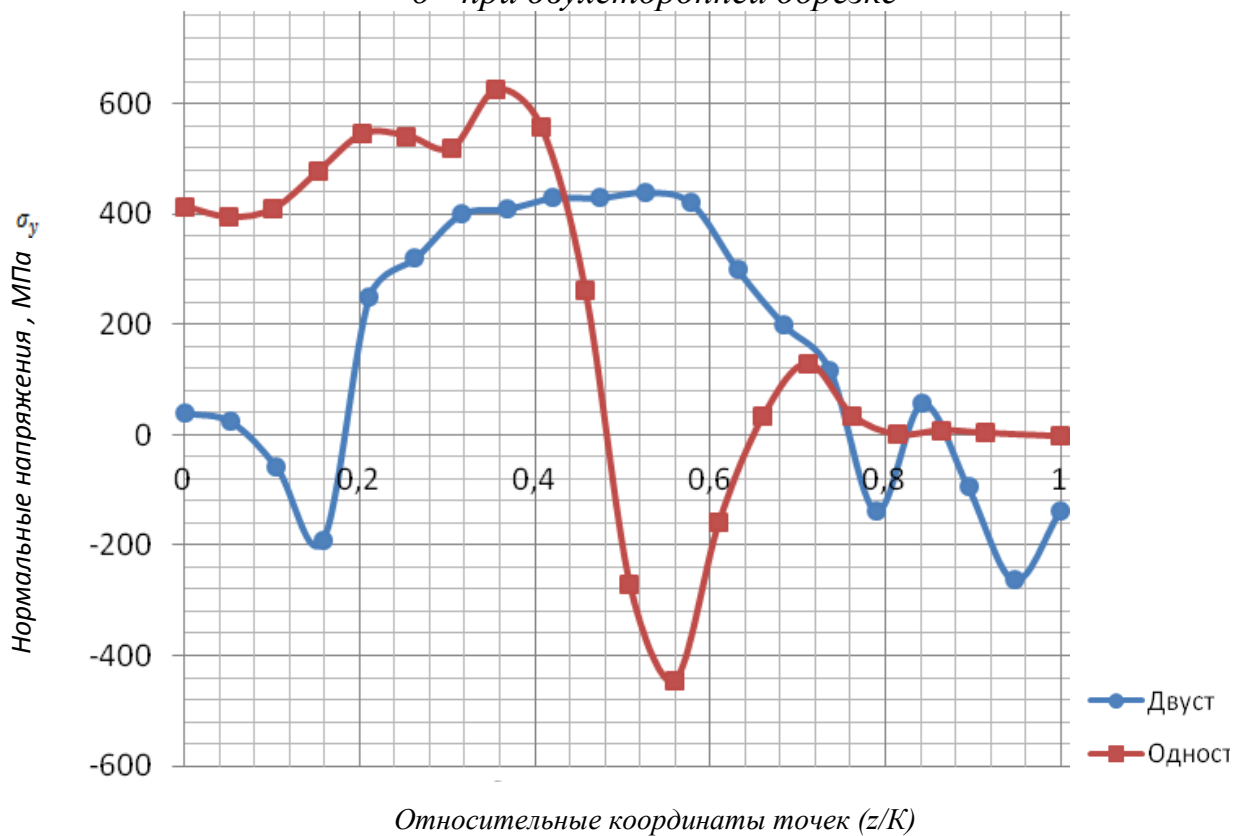


Рисунок 3.5 - Изменение нормальных напряжений  $\sigma_y$  по высоте зоны обрезки

Анализируя полученные результаты, следует отметить следующее. Максимальные растягивающие напряжения в точках, расположенных вблизи зоны деформации, при односторонней обрезке головки на шестигранник в 1,45 раз больше, чем в соответствующих точках при двухсторонней обрезке.

На следующем этапе исследования процесса обрезки головки на шести-гранник определялись касательные напряжения  $\tau_{yz}$  вблизи зоны контакта обрезного инструмента с заготовкой.

На рисунке 3.6 представлены поля распределения касательных напряжений  $\tau_{yz}$  при односторонней (а) и двухсторонней (б) обрезке. Графики изменения этих напряжений по высоте головки показан на рисунке 3.7.

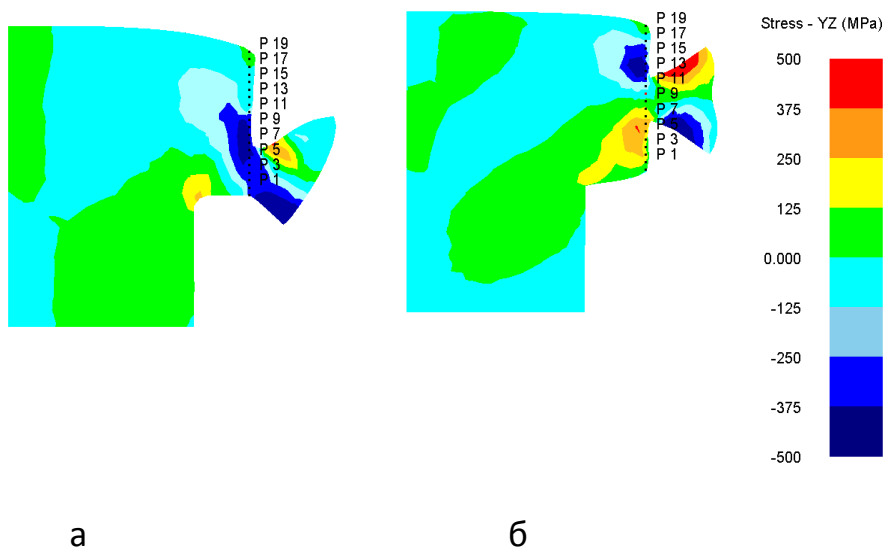


Рисунок 3.6. Поля распределения касательных напряжений  $\tau_{yz}$  обрезке и точки, в которых определялись напряжения: а - при односторонней обрезке; б - при двухсторонней обрезке

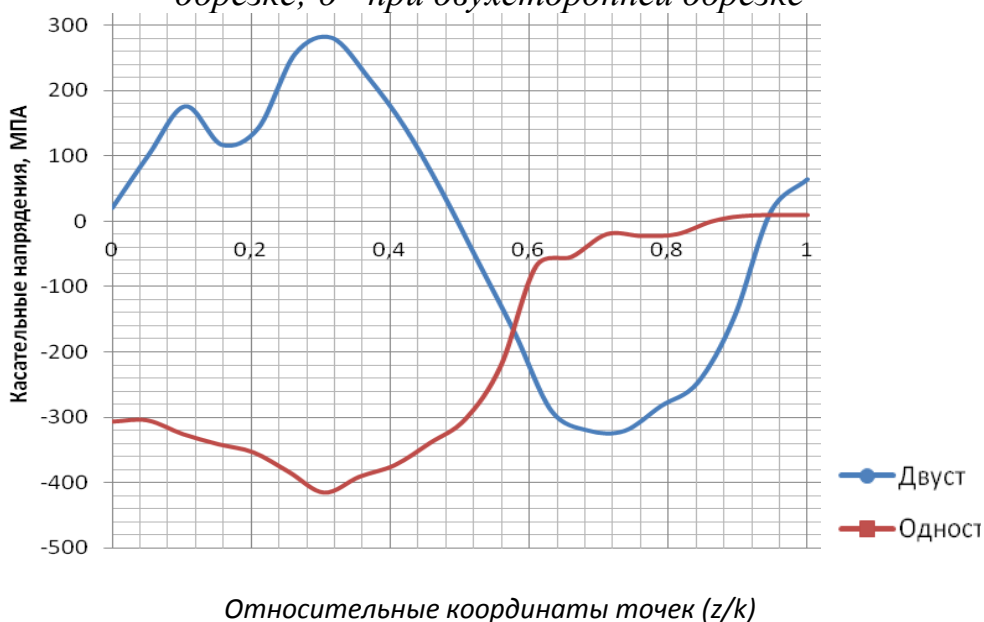


Рисунок 3.7 - Изменение касательных напряжений  $\tau_{yz}$  по высоте головки

Анализ полученных результатов показал, что при односторонней обрезке головки на шестигранник максимальные касательные напряжения  $\tau_{yz}$  в 1,51 раза больше, чем при двухсторонней.

Для комплексной оценки возможности бездефектной штамповки крепежных изделий из нержавеющей стали можно использовать традиционные методики, с помощью которых определяются ресурс пластичности и критерии разрушения [107-109]. Однако эти методики достаточно трудоемкие, так как вначале по результатам достаточно сложных экспериментов определяются данные, по которым строятся диаграммы пластичности, затем вычисляются параметры напряженно-деформированного состояния исследуемого процесса, сопоставляя которые с диаграммой пластичности, оценивается ресурс пластичности.

Значительно проще и менее трудоемко при сопоставительном анализе различных вариантов технологии изготовления однотипных изделий использовать известный критерий разрушения Кокрофта-Лэтэма [102-106]. Этот критерий определяется непосредственно в процессах моделирования с использованием ПК «DEFORM-3D».

По результатам моделирования процессов обрезки с использованием ПК «DEFORM-3D» определялись критерии разрушения Кокрофта-Лэтэма [102] в процессах формирования шестигранных головок болтов с использованием одно- и двухсторонней обрезки. На рисунке 3.8 представлены поля распределения критерия Кокрофта-Лэтэма  $D$  при односторонней (а) и двухсторонней (б) обрезке.

Используя полученные данные, построены графики изменения критерия Кокрофта-Лэтэма  $D$  по высоте головки по высоте головки при односторонней и двухсторонней обрезке (рисунок 3.9).

На основании анализа полученные результаты установлено, что максимальный критерии разрушения Кокрофта-Лэтэма в точках, расположенных вблизи зоны отрезки, при односторонней обрезке головки на шестигранник в 1,28 раз больше, чем в соответствующих точках при двухсторонней обрезке.

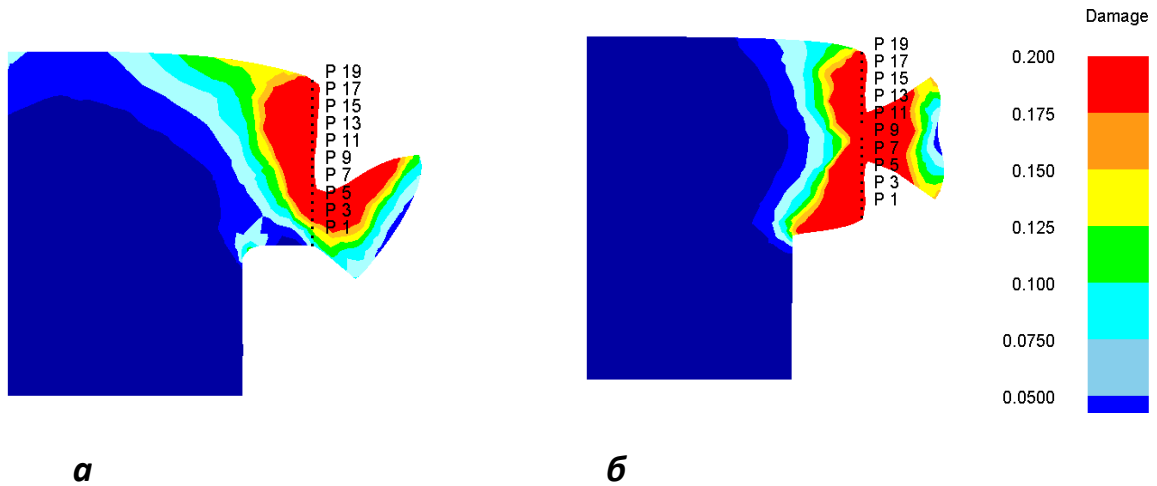


Рисунок 3.8 - Поля распределения критерия Кокрофта-Лэтэма и точки, в которых определялся критерий  $D$ : а - при односторонней обрезке; б - при двухсторонней обрезке

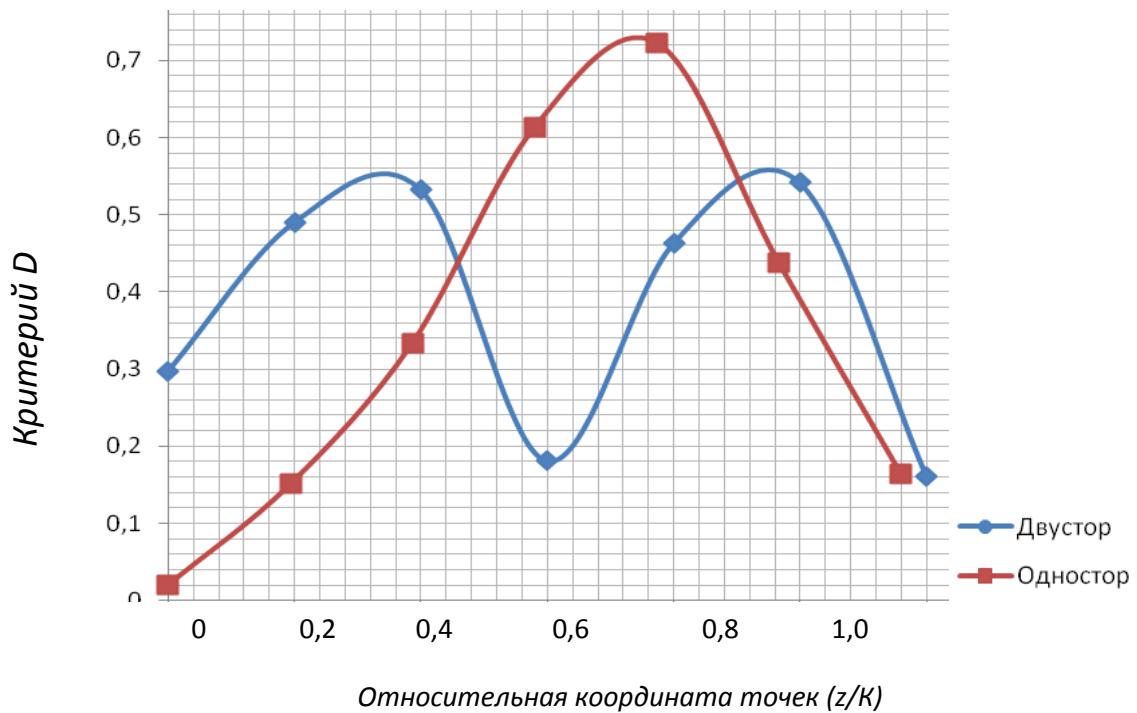


Рисунок 3.9 - Изменение критерия Кокрофта-Лэтэма  $D$  по высоте головки: а - при односторонней обрезке; б - при двухсторонней обрезке

Результаты вышеизложенных исследований использовались при разработке нового технического решения, направленного на повышение стойкости инструмента для двухсторонней обрезки шестигранных головок болтов и винтов (патент РФ № 178623 полезную модель «Инструмент для обрезки шестигранных головок стержневых изделий» [135]).

На рисунке 3.10 представлена разработанная конструкция инструмента для обрезки шестигранных головок. У пуансона 1, который закреплен в корпусе 3, выполнено сквозное отверстие в виде усеченной шестигранной пирамиды 4. Пересечение пирамиды 4 с торцевой рабочей поверхностью образует режущие кромки 5, шестиугольный профиль которых соответствует профилю обрезаемой головки. На нерабочем торце пуансона 1 выполнен фланец 6 для крепления в корпусе 3. Матрица 2, которая по форме и размерам выполнена идентичной пуансону 1, закреплена в корпусе 7 и опирается на опорную втулку 8. Опорная втулка 8 выполнена с центральным отверстием 9, диаметр которого чуть больше диаметра стержня изделия, и имеет выступ 10 в виде усеченной шестигранной пирамиды. Боковые поверхности пирамиды 10 контактируют с пирамидальной поверхностью отверстия матрицы 2. При этом расстояние  $h$  от режущих кромок 5 матрицы 2 до рабочего торца 11 опорной втулки 8 составляет  $(0,4 \div 0,45)$  высоты  $K$  обрезаемой головки 12. Расстояние  $h$  регламентировано на основании анализа следующих экспериментальных данных. При  $h$  менее 0,4 высоты  $K$  обрезаемой головки снижается стойкость пуансона 1, так как увеличиваются толщина срезаемого им слоя, что приводит к росту усилия, действующие на него. При  $h$  больше 0,45  $K$  возрастают усилия на матрицу 2, что приводит к снижению её стойкости.

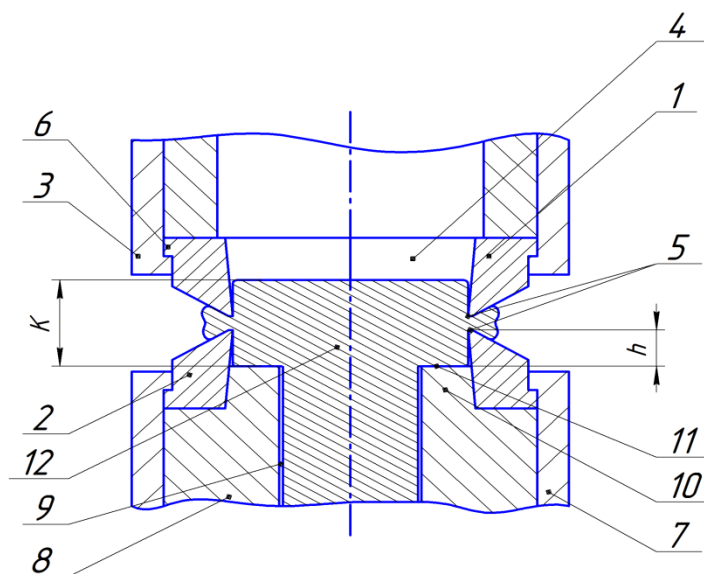


Рисунок 3.10 - Инструмент для обрезки шестигранных головок [135]

Инструмент работает следующим образом. Перед началом процесса обрезки заготовка с головкой 12 бочкообразной формы стержневой частью помещается в центральное отверстие 9 опорной втулки 8 таким образом, что обрезаемая головка 12 опирается на режущие кромку 5 матрицы 2. При движении ползуна прессы, укрепленный на нем пунсон 1, внедряется в головку, обрезая её на шестигранник. При этом обрезка происходит с двух сторон: со стороны пуансона 1 и со стороны матрицы 2. Срезаемый металл зажимается между торцевыми рабочими поверхностями пуансона 1 и матрицы 2, образуя облой. Затем в действие вступает выталкиватель (на рисунке 3.10 не показан), который давит на торец стержневого участка заготовки и проталкивает головку 12 через сквозное отверстие 4 пуансона 1, окончательно отделяя облой от головки.

Применение разработанного технического решения обеспечивает уменьшение высоты срезаемого пуансоном слоя и на 30÷40 % и снижение усилия на пунсон, что повышает срок его службы и сокращает потери рабочего времени на замену и наладку инструмента. Кроме того, выполнение пуансона и матрицы однотипными по форме и размерам снижает затраты на изготовление инструмента.

Разработанная конструкция использовалась при изготовлении винтов М6 по ОСТ 1 31501-80 из нержавеющей стали 12Х18Н10Т по технологии, включающей предварительную высадку конической головки, окончательную высадку бочкообразной головки и двухстороннюю обрезку головки на шестигранник с использованием разработанной конструкции инструмента. Штамповка винтов осуществлялась в условиях АО «Белебеевский завод «Автономаль» с использованием автомата-комбайна модели 5/16-4ВМ (фирма «National Machinery», США). Применение разработанного технического решения позволило повысить срок службы обрезающего инструмента в 1,3÷1,4 раза и снизить затраты на изготовление инструмента на 10÷15%.

### 3.3. Оценка влияния формы и размеров торцевой лунки на прочность соединения головки со стержнем

Стержневые крепежные изделия с шестигранной головкой и торцевой лункой находят широкое применение в различных отраслях промышленности [3, 11-15]. Использование таких болтов обеспечивает экономию металла порядка  $2\div 4\%$  (в зависимости от длины изделия). Согласно нормативно-технической документации (ГОСТ 7798-70, ГОСТ 7805-70 и др.) лунка выполняется цилиндрической формы с диаметром  $(0,7\div 0,8)$  размера «под ключ» и глубиной  $(0,2\div 0,4)$  высоты головки [16]. Как правило, такие болты изготавливаются с использованием безоблойной штамповки. Однако качество болтов, изготовленных по такой технологии, низкое в связи с плохим оформлением ребер шестигранника (рисунок 3.11) [116-118]. Кроме того, возникают проблемы обеспечения необходимой прочности соединения головки со стержнем [123].

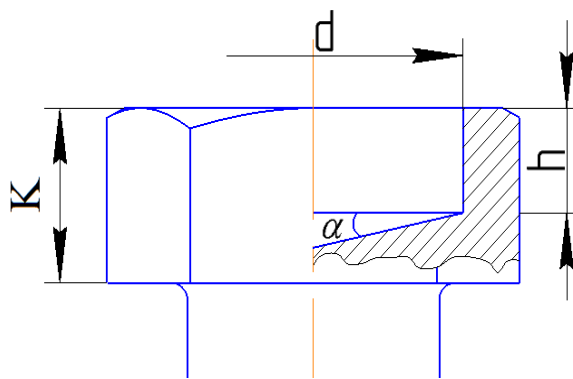


*Рисунок 3.11- Шестигранная головка болта, сформированная безоблойной штамповкой с выдавливанием лунки*

С целью повышения качества формирования ребер шестигранника, за счет более интенсивного вытеснения металла в зоны формирования ребер предложено увеличить глубину лунки и изменить её форму. Однако при этом необходимо исключить вероятность отрыва головки от стержня.

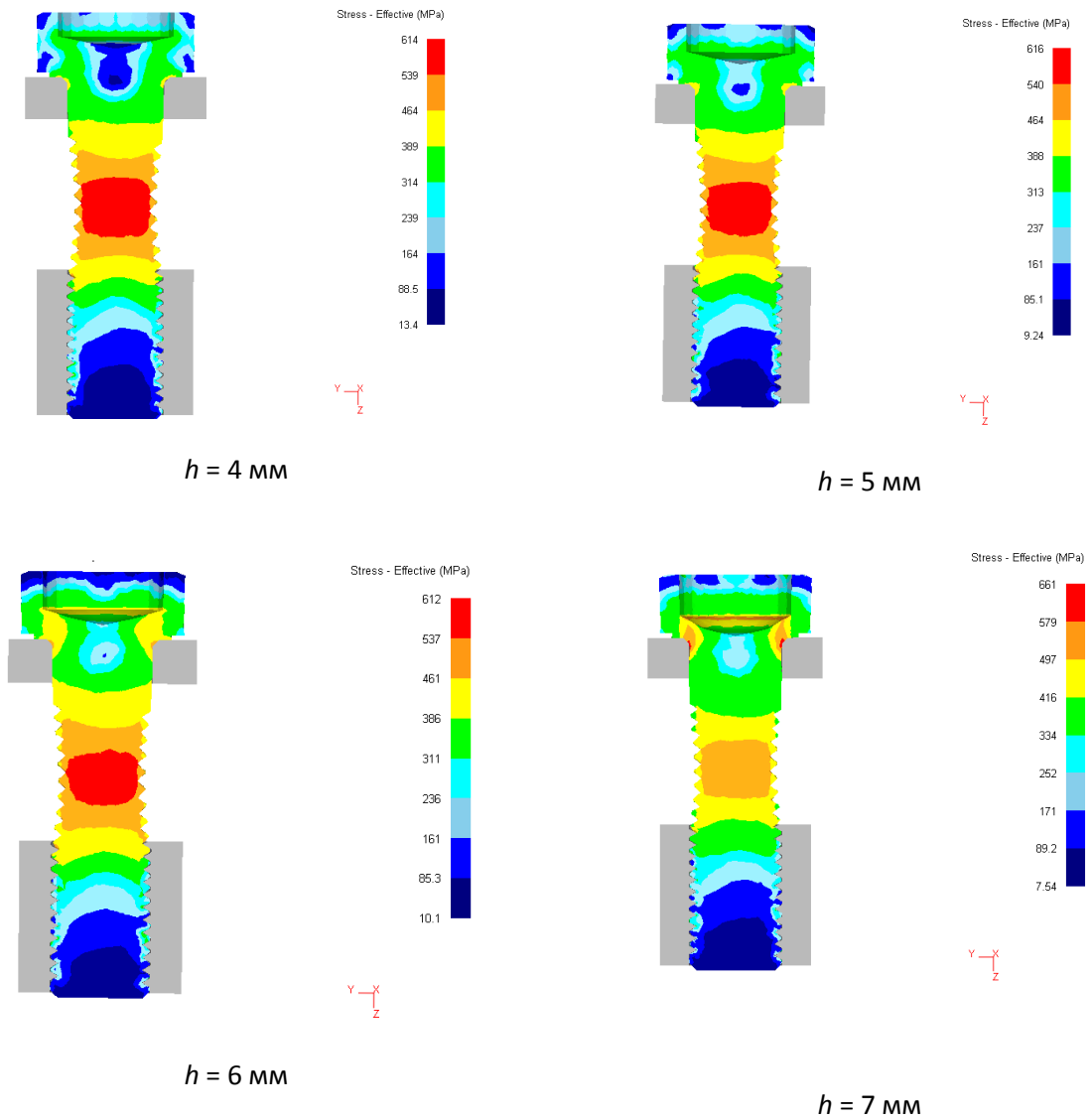
Выполнено компьютерное моделирование процесса нагружения осевой растягивающей нагрузкой крепежного соединения с болтом, на торце головки которого выполнялась лунка различной глубины.

При компьютерном моделировании использовался программный комплекс «DEFORM–3D». Рассматривался процесс растяжения болта М 16 с лункой на торце головки, которая выполнялась в виде цилиндрического и конического участков (рисунок 3.12). Размеры головки: высота головки  $K = 10$  мм, размер «под ключ»  $S = 24$  мм, диаметр лунки  $d = 19,0$  мм, угол  $\alpha = 6^\circ$ , высота  $h$  цилиндрического участка лунки варьировалась в диапазоне от 4,0 мм до 7,0 мм. При этом рассматривались две зоны концентрации напряжений: резьбовой участок и участок соединения головки со стержнем.



*Рисунок 3.12 - Головка болта с торцевой лункой*

На основании выполненных расчетов определены параметры напряженно-деформированного состояния в зонах вероятного разрушения болта при его нагружении. На рисунке 3.13 показаны поля распределения интенсивности напряжений в продольном сечении болта с торцевой лунки глубиной  $h = 4 \div 7$  мм. Установлено, что с увеличением глубины лунки происходит перераспределение интенсивности напряжений – наибольшая концентрация напряжений из стержневой части болта переходит в область под головкой.



*Рисунок 3.13- Распределение интенсивности напряжений в продольном сечении болта с торцевой лункой различной глубины  $h$*

На рисунке 3.14 показано расположение точек, в которых определялись осевые  $\sigma_z$  и касательные  $\tau_{yz}$  напряжения в продольном осевом сечении.

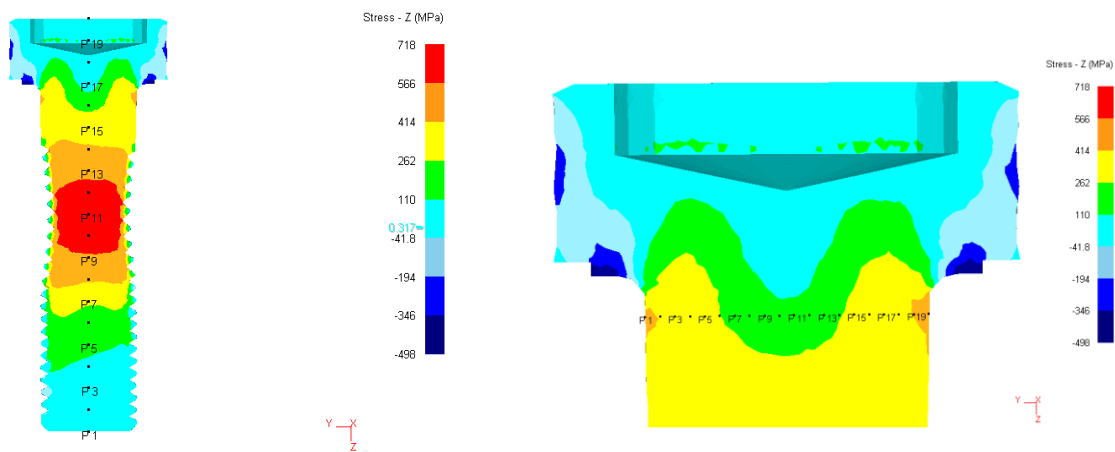


Рисунок 3.14 - Расположение точек, в которых определялись осевые напряжения  $\sigma_z$  при растяжении болта с торцевой лункой

По данным моделирования построены графики распределения осевых напряжений  $\sigma_z$  в продольном сечении болта с лункой в головке различной глубины  $h$  (рисунок 3.15).

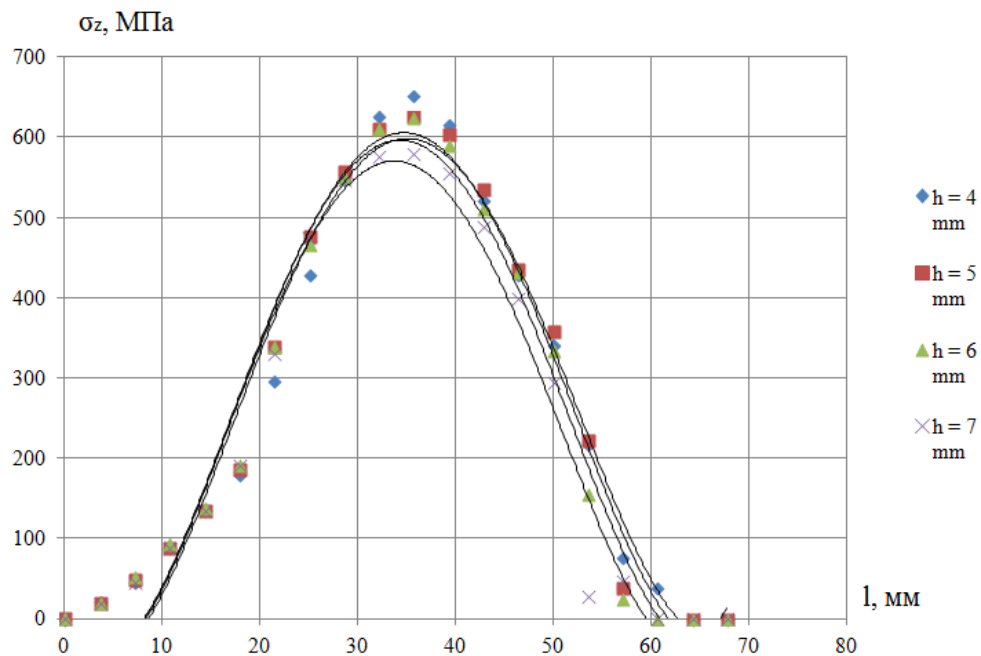


Рисунок 3.15 - Распределение осевых напряжений  $\sigma_z$  при растяжении болта с торцевой лункой глубиной  $h$  по длине болта

Для аппроксимации полученных зависимостей использовался полином четвертой степени вида

$$\sigma_z = K_1 z^4 + K_2 z^3 + K_3 z^2 + K_4 z, \quad (3.15)$$

Рассчитанные значения коэффициентов представлены в таблице 3.15.

Таблица 3.1 - Коэффициенты уравнения 3.15

Глубина $h$ , мм	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$R^2$
4	0,0007	-0,0977	3,7913	-25,868	0,9677
5	0,0007	-0,1003	3,8518	-25,63	0,9736
6	0,0007	-0,1023	3,8804	-25,494	0,9719
7	0,0008	-0,1032	3,8554	-25,05	0,9604

На рисунке 3.16 показан характер изменения максимальных растягивающих напряжений  $\sigma_{z_{max}}$  в зоне концентрации напряжений на резьбовом участке в зависимости от глубины торцевой лунки  $h$ .

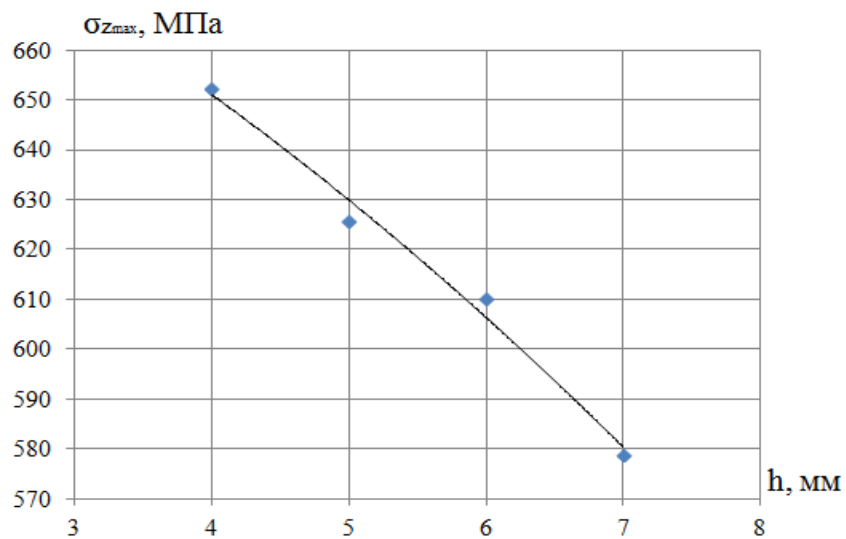


Рисунок 3.16 - Изменение максимальных растягивающих напряжений  $\sigma_{z_{max}}$  в зоне концентрации напряжений на резьбовом участке в зависимости от глубины торцевой лунки  $h$ .

Из рисунка 3.16 видно, что с увеличением глубины лунки  $h$  с 4 до 7 мм максимальная величина осевых растягивающих напряжений на резьбовом участке уменьшается на  $\sim 12\%$ , что может привести к изменению расположения опасного сечения из резьбовой части в область соединения головки со стержнем.

Построены графики распределения осевых напряжений  $\sigma_z$  по ширине участка соединения головки со стержнем в зависимости от глубины торцевой лунки  $h$  (рисунок 3.17).

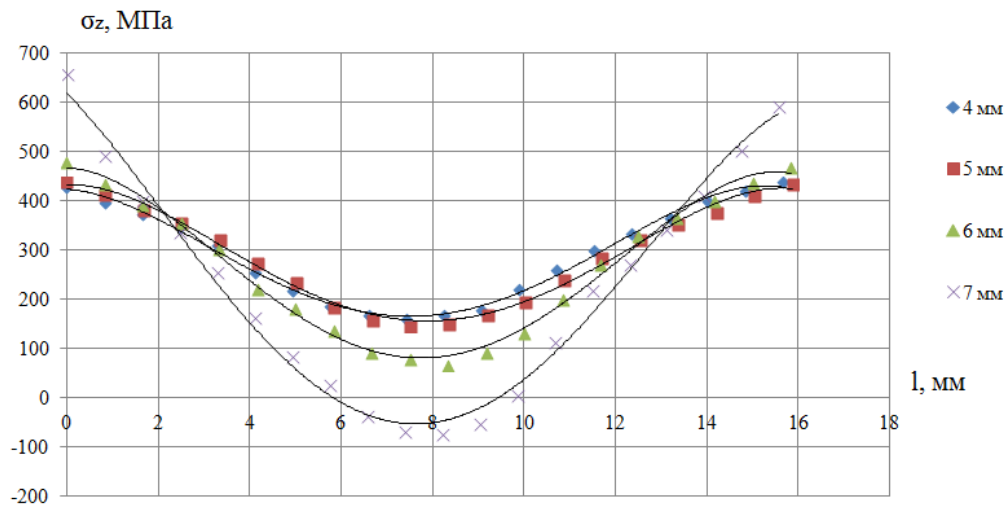


Рисунок 3.17 - Распределение осевых напряжений  $\sigma_z$  по ширине зоны концентрации напряжений на участке соединения головки со стержнем в зависимости от глубины торцевой лунки  $h$ .

Анализируя данные, представленные на рисунке 3.17, установлено, что растягивающие осевые напряжения  $\sigma_z$  достигают своих максимальных значений  $\sigma_z^{\max}$  в точках, наиболее удаленных от оси стержня, то есть на боковых поверхностях стержневого участка болта. По данным графика (рисунок 3.17) получены уравнения распределения осевых напряжений  $\sigma_z$  по ширине зоны концентрации напряжений на участке соединения головки со стержнем в виде полинома четвертой степени

$$\sigma_z = K_1 x^4 + K_2 x^3 + K_3 x^2 + K_4 x + K_5, \quad (3.16)$$

Расчитанные значения коэффициентов представлены в таблице.3.2.

Таблица 3.2 - Коэффициенты уравнения 3.16

Глубина $h$ , мм	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$R^2$
4	-0,073	2,1972	-16,06	- 6,7659	422,23	0,9932
5	-0,074	2,3292	-18,49	-2,1719	431,55	0,991
6	-0,1039	3,2146	-24,712	- 2,9953	465,37	0,9915
7	-0,0975	2,905	-15,751	- 93,762	618,07	0,9872

На рисунке 3.18 показаны максимальные значения растягивающих напряжений  $\sigma_{z,max}$  на боковых поверхностях стержневого участка болта с торцевой лункой в зависимости от глубины лунки  $h$ .

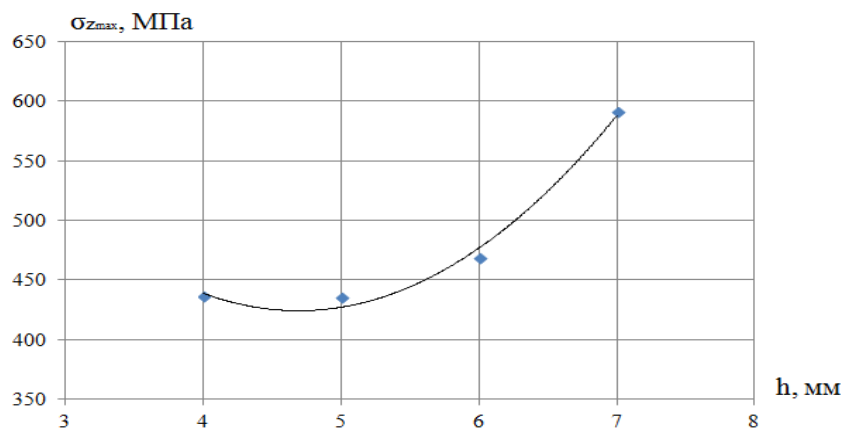


Рисунок 3.18 - Изменение максимальных растягивающих напряжений  $\sigma_{z,max}$  в зоне концентрации напряжений на участке соединения головки со стержнем в зависимости от глубины торцевой лунки  $h$ .

С увеличением глубины лунки  $h$  с 4 до 7 мм максимальная величина осевых растягивающих напряжений увеличивается на ~30%. Наибольший рост растягивающих напряжений наблюдается при увеличении глубины лунки  $h$  с 6 до 7 мм, что может привести к разрушению болта, связанному с

отрывом головки от стрежня, при соответствующем росте касательных напряжений.

Таким образом, результаты моделирования свидетельствуют о том, что глубина лунки  $h$  значительно влияет на напряженное состояние болта при одноосном растяжении. С увеличением глубины лунки  $h$  происходит рост как осевых, так и касательных напряжений в области соединения головки болта со стержнем.

Выполнены расчеты на прочность болта с торцевой лункой различной глубины. В расчетах использовалась IV теория прочности – теория, согласно которой опасное состояние наступает тогда, когда удельная потенциальная энергия изменения формы достигает предельного значения [110-111]. Условие прочности по IV теории (энергетическая теория прочности) определяют по формуле

$$\sigma_{\text{экв IV}} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq [\sigma], \quad (3.17)$$

где  $[\sigma]$  - допускаемые напряжения, которые для пластичных материалов находятся по уравнению

$$[\sigma] = \frac{\sigma_T}{K_{3.п.}}, \quad (3.18)$$

где  $\sigma_T$  - предел текучести;

$K_{3.п.}$  – коэффициент запаса прочности.

В теории пластичности [112] и ОМД [113, 114] интенсивность напряжений определяется по формуле

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (3.19)$$

Сопоставляя уравнения (3.17), (3.18) и (3.19), получаем

$$K_{3.п.} = \frac{\sigma_T}{\sigma_i} \quad (3.20)$$

По результатам компьютерного моделирования, используя зависимость (3.20), построены графики изменения коэффициента запаса прочности  $K_{з,П}$  в резьбовой части и голове в зависимости от глубины лунки  $h$ .

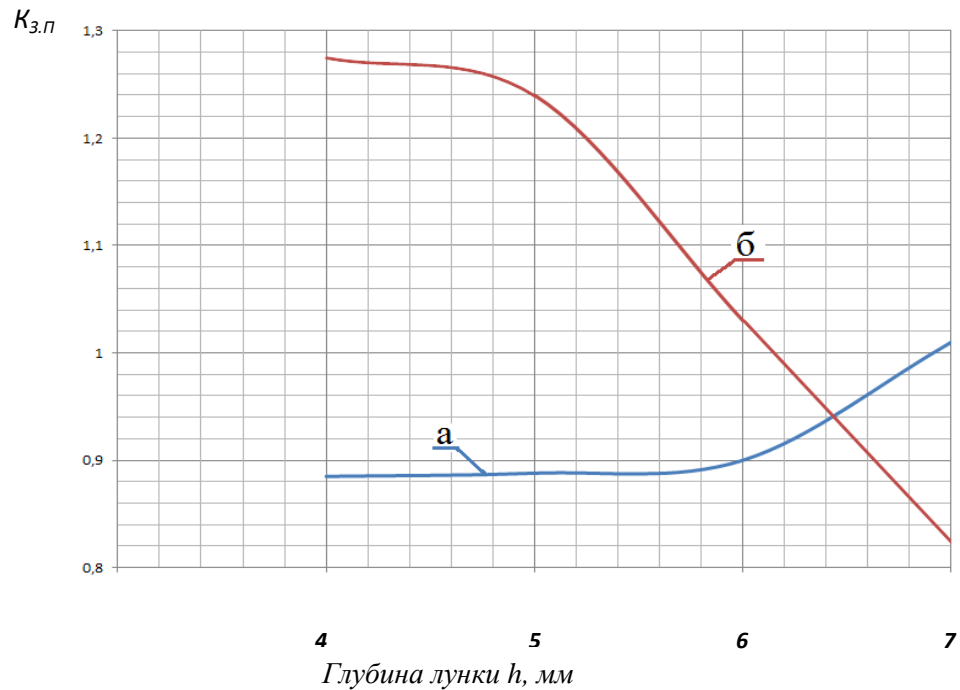


Рисунок 3.19 - Изменение коэффициентов запаса прочности  $K_{з,П}$  в резьбовой части (а) и голове (б) в зависимости от глубины лунки  $h$

В работе [123] приведены результаты экспериментов по оценке влияния формы и размеров торцевой лунки на прочность болтов. Болты М 16х50 из стали марки 20 изготавливались холодной объемной штамповкой на четырехпозиционном автомате-комбайне QPBA-161 (фирма «Malmedi», Германия). Технология изготовления болтов включала подачу калиброванного металла, отрезку заготовки, предварительную высадку конической головки, окончательную высадку бочкообразной головки, редуцирование участка стержня под накатку резьбы, обрезку головки на шестигранник и накатку резьбы. Лунка формировалась сверлением.

Испытания болтов на растяжение до разрушения проводились с использованием аттестованной испытательной машины EU-100 (Германия). В ходе экспериментов установлено, что в зависимости от глубины лунки часть

болтов разрушается по резьбовому участку, а часть - по головке. На рисунке 3.20 представлены фотографии разрушившихся болтов.



Рисунок 3.20 - Фотографии разрушившихся болтов с торцевой лункой:  
*а* –разрушение по резьбе ( $h = 5,42$  мм); *б* – разрушение по головке  
 ( $h = 7,24$  мм)

Для обобщения результатов экспериментов определялись средние нормальные напряжения в резьбовом участке стержня болта и средние касательные напряжения на поверхности сдвига в головке. Средние нормальные напряжения в резьбе

$$\sigma = \frac{P}{A_p}, \quad (3.21)$$

где  $A_p = 157 \text{ мм}^2$  – площадь поперечного сечения резьбы М16.

Средние касательные напряжения на поверхности сдвига в головке

$$\tau = \frac{P}{A_c}, \quad (3.22)$$

где  $A_c = \pi d_c (K - h)$  - площадь поверхности среза, где  $d_c$  - диаметр стержня болта.

По результатам выполненных расчетов построены графики изменения средних нормальных напряжений  $\sigma$  в резьбе и средних касательных напряжений  $\tau$  в головке в зависимости от глубины лунки (рисунок 3.21).

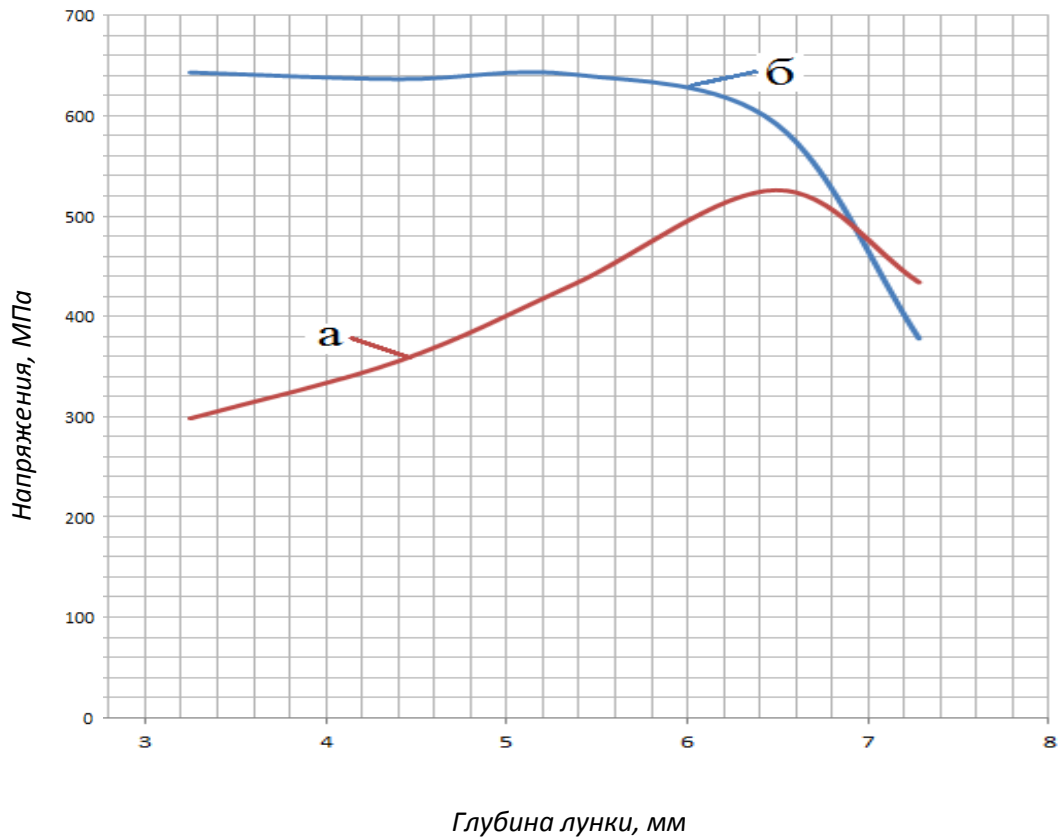


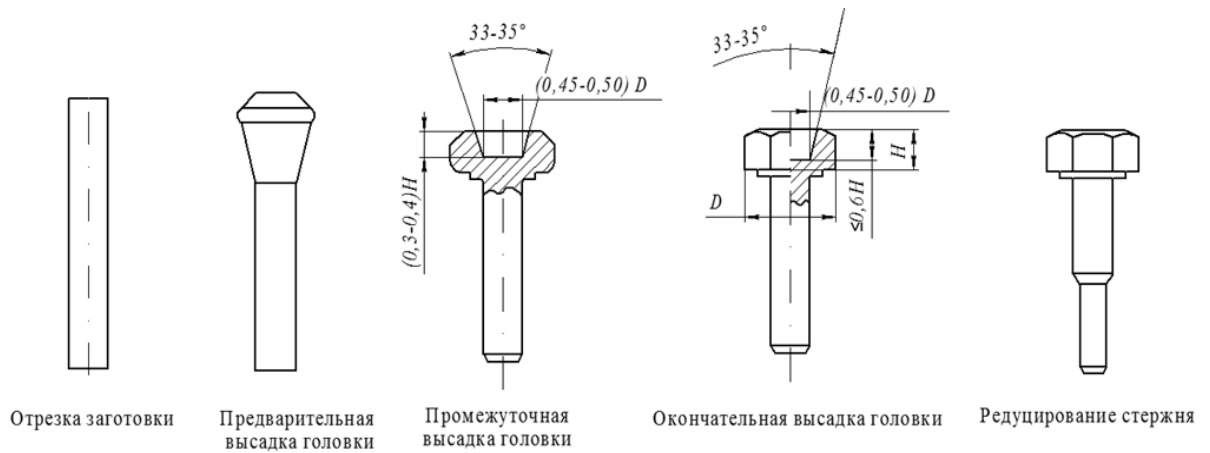
Рисунок 3.21 - Изменение средних нормальных напряжений  $\sigma$  в резьбе (б) и средних касательных напряжений  $\tau$  в головке (а) в зависимости от глубины  $h$  лунки

Анализируя теоретические и экспериментальные данные, можно сделать вывод: при глубине лунки более 0,6 высоты головки изделия, высока вероятность разрушения головки, что недопустимо по нормативно-технической документации.

Результаты выше представленных исследований легли в основу разработки нового технического решения «Способ изготовления стержневых изделий с многогранной головкой» (патент РФ на изобретение № 2635495) [115].

Цель изобретения – повышение качества изделий за счет качественного оформления ребер многогранника по всей высоте головки и предотвращения образования трещин и надрывов на торце головки по периметру углубления, а также повышение стойкости штампового инструмента за счет снижения усилий штамповки.

На рисунке 3.22 показана схема разработанного технологического процесса изготовления болтов с шестигранной головкой с лункой на торце.



*Рисунок. 3.22 – Схема технологического процесса штамповки болтов с шестигранной головкой по способу [115]*

Технологический процесс осуществляется следующим образом. Отрезанную от калиброванного металла заготовку подают на первую формообразующую позицию, где осуществляют предварительную высадку головки в виде двух усеченных конусов. На второй позиции осуществляют предварительную штамповку многогранной головки путем выдавливания конической полости с диаметром меньшего основания  $(0,45 \div 0,50)D$ , углом конусности  $33 \div 35^\circ$  и глубиной  $(0,3 \div 0,4)H$ , где  $D$  – диаметр описанной окружности шестигранника, а  $H$  – высота головки готового изделия. На третьей позиции окончательно штампуют многогранную головки путем выдавливания полости глубиной не более  $0,6H$ . При этом головка изделия приобретает окончательную форму и размеры. На данной позиции пуансон внедряется в ранее сформированную коническую полость и увеличивает ее в размерах, при этом происходит осадка головки на требуемую величину, заполнение металлом граней и ребер многогранника. Выполнение полости в торце головки виде усеченного конуса с углом конусности  $33 \div 35^\circ$  позволяет интенсифицировать процесс течения металла заготовки в радиальном направлении, что обеспечивает качественное формирование ребер многогранника и пред-

отвращает образование штамповочных трещин за счет изменения направления действия сил трения между пуансоном и заготовкой. К тому же направленная деформация головки, определяемая геометрическими параметрами полости, позволяет упрочнить место соединения головки и стержня, что обеспечивает увеличение прочности соединения головки со стержнем. Однако, при выдавливании полость глубиной более  $0,6 H$  повышается вероятность отрыва головки от стержня при нагружении изделия. На четвертой позиции осуществляют редуцирование стержня под накатку резьбы.

Применение разработанного способа изготовлению стержневых изделий типа болтов и винтов с многогранными головками холодной объемной штамповкой позволяет повысить качество изделий и стойкость технологического инструмента, а также снизить на 2-3% расход металла.

### 3.4. Моделирование процесса безоблойной штамповки шестигранной головки с торцевой лункой различной формы

Как отмечено в разделе 1.2, среди известных способов безоблойной штамповки болтов с шестигранными головками наиболее широко используется технология формирования шестигранника головки за счет выдавливания торцевой лунки цилиндрической формы. Однако при использовании такой технологии возникают проблемы, связанные с низким качеством изделий, в основном, из-за плохого оформления ребер многогранника. Улучшить качество формирования ребер возможно за счет изменения формы и размеров выдавливаемой торцевой лунки.

Предложено изменить форму торцевой лунки и определить глубину выдавливаемого углубления, при которых обеспечивается качественное оформление ребер шестигранника головки. Рассматривалось два варианта формы торцевой лунки: в виде цилиндра и конуса (рисунок 3.23,а) и в виде усеченного конуса (рисунок 3.23, б)

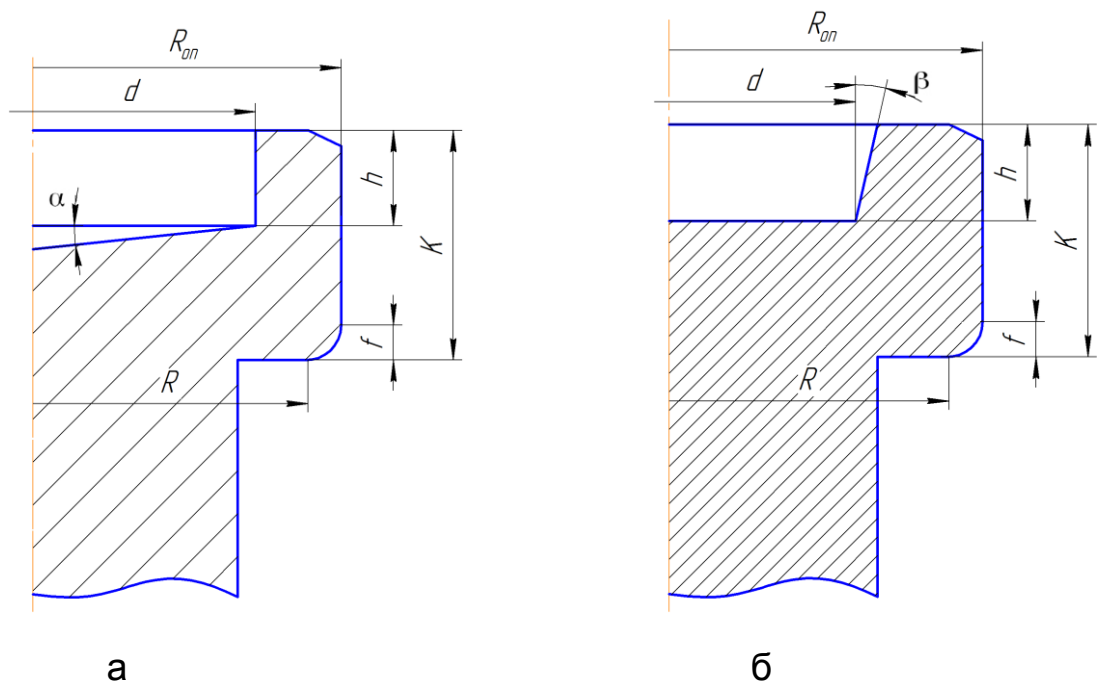


Рисунок 3.23- Основные размеры для оценки качества формирования ребер шестигранника при выдавливании лунки в виде:

а – цилиндра с конусом; б – усеченного конуса

Моделирование процессов штамповки шестигранной головки с торцевой лунки в виде цилиндра с конусом и усеченного конуса осуществлялось с использованием программного комплекса «DEFORM-3D».

Основные размеры головки: размер «под ключ»  $S = 17$  мм, диаметр описанной окружности шестигранника  $D_o = 19,63$  мм, высота головки  $K = 7$  мм. Глубина лунки  $h$  (высота выступа пуансона) варьировалась от 0 до 4,2 мм с шагом 1,4 мм. Для лунки в форме цилиндра с конусом (см. рисунок 3.23а) диаметр  $d = 14,5$  мм,  $\alpha = 6^\circ$ . Для лунки в форме усеченного конуса (см. рисунок 3.23б)  $d = 10,2$  мм,  $\beta = 35^\circ$

Оценка качества формирования ребер шестигранника осуществлялась с использованием введенных безразмерных параметров:

$$r = \frac{R}{R_{on}} \quad - \text{относительный радиус описанной окружности на опорной}$$

поверхности;

$$z = \frac{f}{K} \quad - \text{относительная высота незаполнения ребра,}$$

где  $R$  – расстояние от оси головки до точки начала скругления ребра на опорной поверхности;  $R_{on}$  – радиус описанной окружности шестигранника;  $f$  – высота скругления ребра (см. рисунок 3.1).

По результатам выполненных расчетов построены графики зависимости относительного радиуса описанной окружности на опорной поверхности  $r = R/R_{on}$  от относительной глубины лунки  $z = h/K$  для двух вариантов формы лунки (рисунок 3.24)

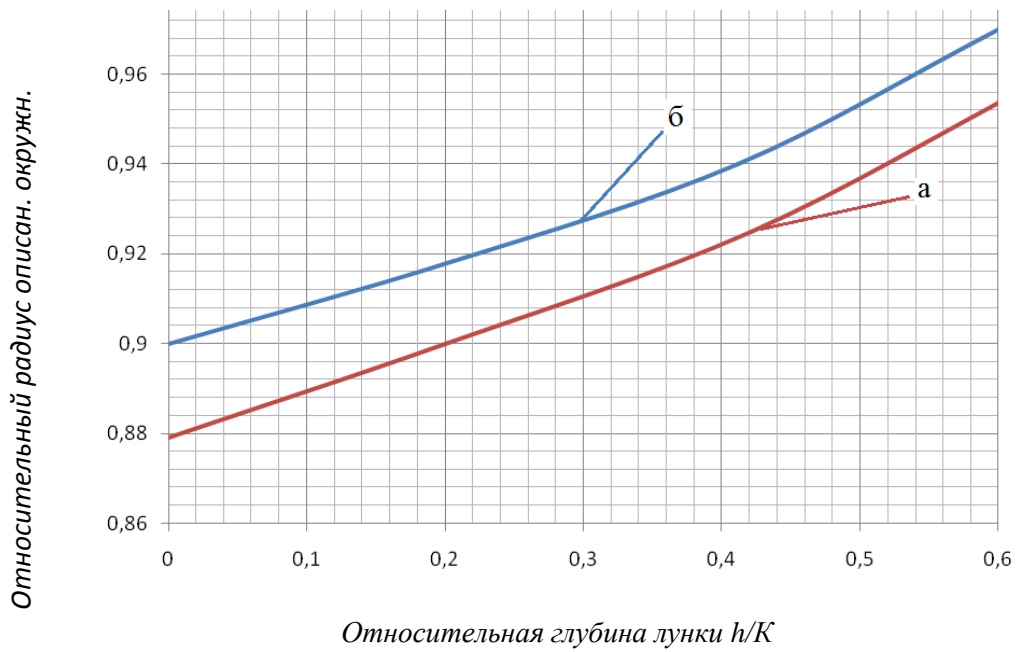


Рисунок 3.24- Зависимость относительного радиуса описанной окружности на опорной поверхности  $r = R/R_{оп}$  от относительной глубины лунки  $z=h/K$ : а – цилиндр с конусом; б – усеченный конус

На рисунке 3.25 представлены графики зависимости относительной высоты незаполнения ребра  $z=f/K$  от относительной глубины лунки  $z=h/K$ .

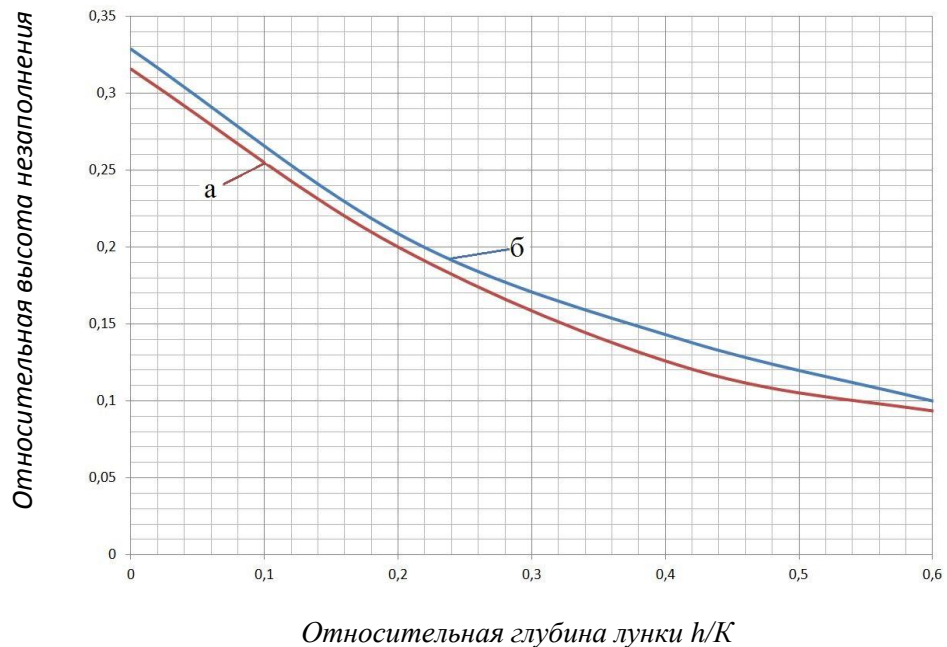


Рисунок 3.25– Зависимость относительной высоты незаполнения ребра  $z=f/K$  от относительной глубины лунки  $z=h/K$ : а – усеченный конус; б – цилиндр с конусом.

По результатам выполненных расчетов определены максимальные усилия штамповки при различной глубине и форме лунки. Графики изменения максимальных усилий штамповки в зависимости от относительной глубины лунки  $z=h/K$  представлены на рисунке 3.26.

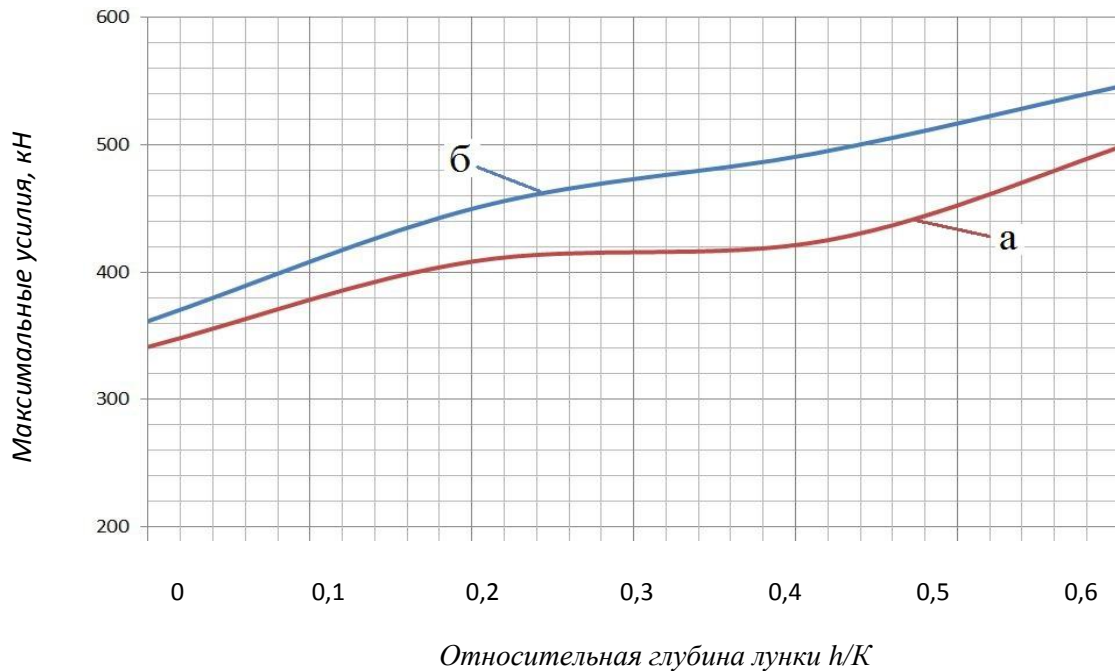


Рисунок 3.26 - Максимальные усилия штамповки в зависимости от относительной глубины лунки  $z=h/K$  : а – усеченный конус;

б – цилиндр с конусом

Программный комплекс «DEFORM-3D» позволяет определять нормальные давления  $\sigma_N$  на поверхности контактные заготовки с инструментом (рисунок 3.27). Этот параметр позволяет прогнозировать стойкости инструмента, так как он существенно влияет на силы трения и предел выносливости. На основе практического опыта установлено, что при нормальных давлениях  $\sigma_N \geq 3000 \text{ МПа}$  стойкость инструмента неудовлетворительная.

На рисунке 3.28 представлена картина распределения нормальных давлений на поверхности контакта металла с инструментом и точки, в которых определялись давления, а также графики изменения нормальных давлений в процессах штамповки шестигранника с выдавливанием лунки в виде цилиндра конусом и усеченного конуса.

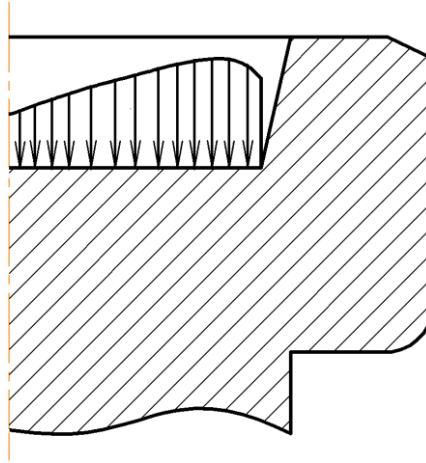


Рисунок 3.27 - Схема распределения нормальных давлений  $\sigma_N$  на поверхности контакта выступа пуансона с заготовкой

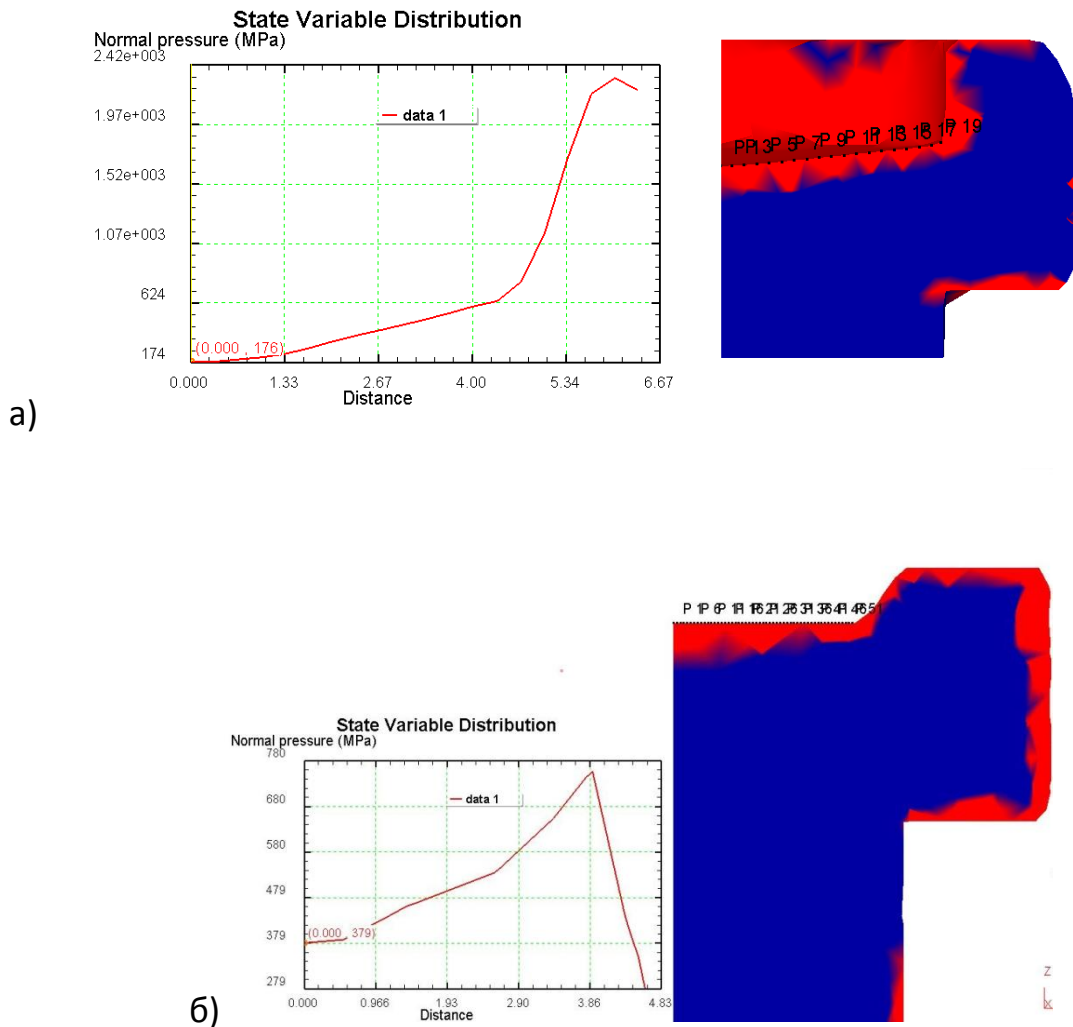


Рисунок 3.28 - Картины распределения нормальных давлений  $\sigma_N$  на поверхности контакта металла с инструментом и точки, в которых определялись давления : а – цилиндр с конусом; б – усеченный конус

На рисунке 3.29 представлены полученные графики изменения максимальных нормальных давлений на рабочей поверхности выступа пуансона в зависимости от относительной глубины лунки  $z=h/K$ .

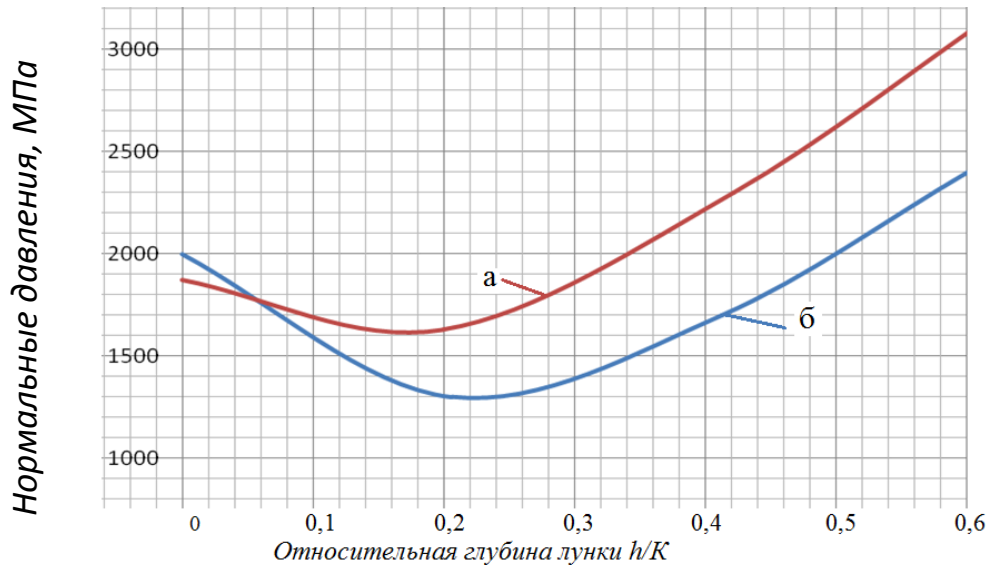


Рисунок 3.29 - Максимальные нормальные давления  $\sigma_N$  на рабочей поверхности выступа пуансона в зависимости от относительной глубины лунки  $z=h/K$ : а – цилиндр с конусом; б – усеченный конус

На основании анализа результатов полученных расчетов установлено, что при формировании шестигранной головки за счет выдавливания лунки в виде цилиндра с конусом по сравнению с выдавливанием усеченного конуса:

- относительный радиус  $r$  описанной окружности повышается на 2-3%, а относительная высота  $z$  незаполнения ребра снижается на 5-12%;
- максимальные усилия штамповки повышаются на 13-15%, а нормальные давления  $\sigma_N$  на поверхности контактные заготовки с инструментом повышаются на 12-16%.

Таким образом, применение технологии, включающей формирование шестигранной головки за счет выдавливания лунки в виде усеченного конуса, при незначительном снижении качества оформления ребер обеспечивает снижение усилий на инструмент, что повышает его стойкость.

### Выводы по главе 3

1. Определены нормальные растягивающие и касательные напряжения, а также критерий разрушения Кокрофта-Лэтэма в точках, расположенных вблизи зоны обрезки. Установлено, что при использовании двухсторонней обрезки по сравнению с односторонней: максимальные растягивающие напряжения  $\sigma_y$  в точках, расположенных вблизи зоны деформирования, снижаются в 1,45 раз; максимальные касательные напряжения  $\tau_{yz}$  - в 1,51 раза; а критерии разрушения Кокрофта-Латама - в 1,28 раз. Таким образом, применение двухсторонней обрезки вместо односторонней снижает вероятность образования на гранях головки дефектов в виде трещин, сколов, вырывов и т.п.

2. По результатам исследования процесса нагружения осевой растягивающей нагрузкой крепежного соединения с болтом, на торце головки которого выполнялась лунка различной глубины, установлено, что при относительной глубине лунки  $(h / K)$  более 0,60 повышается вероятность разрушения болта по головке, что недопустимо по нормативно-технической документации. А при  $(h / K)$  менее 0,55 ÷ 0,60 разрушение происходит по резьбовому участку без разрушения головки.

3. По результатам компьютерного моделирования установлено, что при формировании шестигранной головки за счет выдавливания лунки в виде усеченного конуса по сравнению с выдавливанием цилиндра с конусом: максимальные усилия штамповки снижаются на 13÷15%, а нормальные давления  $\sigma_N$  на поверхности контактные заготовки с инструментом снижаются на 12÷16%; относительный радиус  $r$  описанной окружности снижается на 2÷3%, а относительная высота  $z$  незаполнения ребра повышается на 5÷10%. Таким образом, применение технологии, включающей формирование шестигранной головки за счет выдавливания лунки в виде усеченного конуса, обеспечивает снижение усилий на инструмент, что повышает его стойкость при незначительном снижении качества оформления ребер.

## **4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОИСК РАЦИОНАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ. ПРОМЫШЛЕННОЕ ОПРОБОВАНИЕ**

### 4.1. Экспериментальные исследования основных переходов штамповки шестигранных головок стержневых изделий

По результатам патентно-информационного поиска установлено, что при формировании шестигранной головки болтов и винтов наиболее широко используются:

- штамповка бочкообразной головки с последующей обрезкой на шестигранник;
- безоблойная штамповка шестигранника.

В ходе проведенных экспериментов исследовались процессы деформирования на отдельных переходах формирования шестигранных головок с использованием вышеотмеченных технологий [116-118]. При этом рассматривались следующие варианты технологического процесса:

- холодная штамповка с обрезной головки на шестигранник (вариант I);
- холодная безоблойная штамповка с выдавливанием торцевой лунки (вариант II);
- комбинированный способ, включающий холодную штамповку цилиндрической головки и полугорячую безоблойную штамповку шестигранной головки (вариант III).

Технологический процесс изготовления болтов по варианту I (рисунок 4.1) включал следующие операции: предварительная высадка конической головки; окончательная высадка бочкообразной головки и формирование фаски на конце стержня; редуцирование участка стержня под накатку резьбы и односторонняя обрезка граней головки на шестигранник. Обрезка граней осуществляется за два этапа. На первом этапе инструмент внедряется в головку, а срезаемый металл зажимается между торцевыми поверхностями матрицы и пуансона, образуя облой. На втором этапе выталкиватель,

воздействуя на торец стержня, проталкивает заготовку болта через пуансон, отделяя облой от головки.

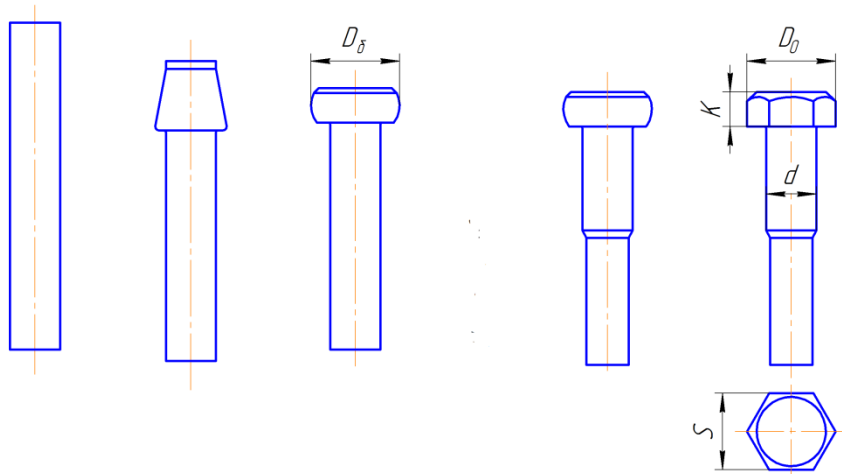


Рисунок 4.1 – Схема технологического процесса изготовления болтов с обрезкой головки на шестигранник (вариант I)

Вариант II технологического процесса (рисунок 4.2) включал операции: предварительная высадка конической головки; штамповку цилиндрической головки с диаметром чуть меньше размера «под ключ»; окончательная штамповка шестигранника с выдавливанием углубления на торце и редуцирование участка стержня под накатку резьбы.

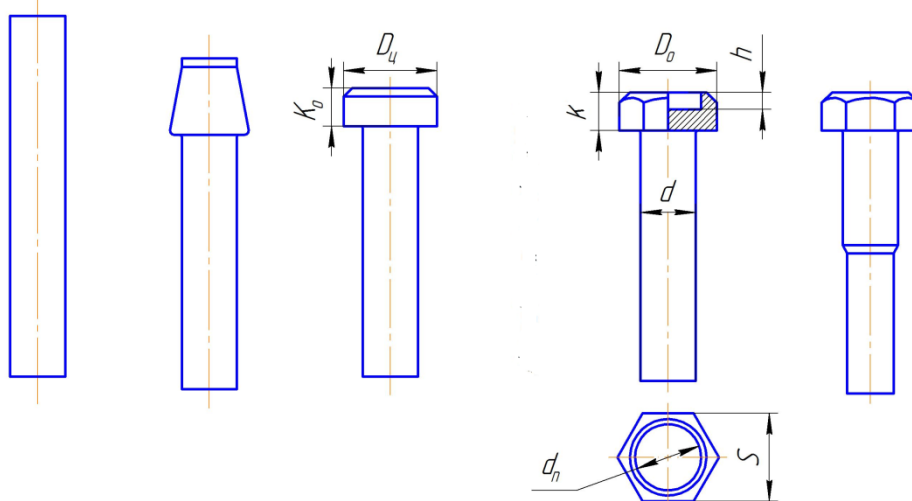
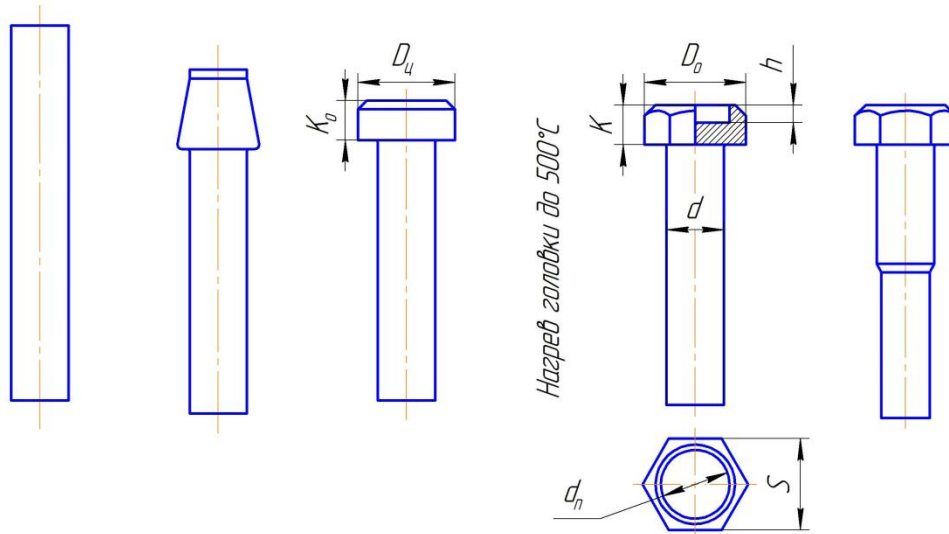


Рисунок 4.2 - Схема технологического процесса с использованием безоблойной штамповки головки (вариант II)

Комбинированный способ безотходной штамповки заготовок болтов (рисунок 4.3) состоял из следующих операций: предварительная высадка конической головки; штамповка цилиндрической головки; нагрев головки до температуры  $400\div 500^{\circ}\text{C}$ ; полугорячая штамповка шестигранной головки с выдавливанием лунки на торце и редуцирование стержня под накатку резьбы. Применение полугорячей штамповки позволяет снизить усилия деформирования [119].



*Рисунок 4.3 - Схема комбинированного способа с использованием полугорячей безоблойной штамповки головки (вариант III)*

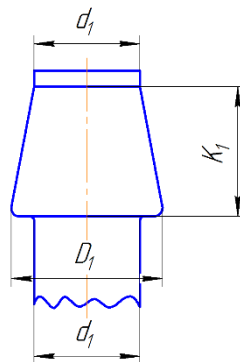
Для экспериментальной проверки и отработки процесса формирования шестигранника были спроектированы и изготовлены инструмент и специальное приспособление, применение которого обеспечивало соосность пуансона и матрицы. Эксперименты проводились на аттестованной гидравлической испытательной машине EU-100 (Германия). При этом записывались диаграммы изменения технологических усилий в процессе деформирования. В ходе экспериментов формировались головки болтов М12 из стали марки 12Х18Н10Т.

На рисунке 4.4 представлена фотография инструмента для проведения экспериментальных исследований (матрицы, пуансоны, выталкиватели, проставки и корпус для центрирования инструмента).



*Рисунок 4.4 - Инструмент для экспериментов по формированию шестигранных головок болтов из нержавеющей стали*

При исследовании процесса формирования головки по варианту I (см. рисунок 4.1) высаживалась коническая головка (рисунок 4.5) с размерами:  $d_1 = 11,8$  мм;  $D_1 = 14,9 \div 15,1$  мм;  $K_1 = 14,8 \div 15,2$  мм.



*Рисунок 4.5 - Форма и размеры головки, штампуемой на первом переходе*

Машинная диаграмма процесса штамповки предварительного конуса представлена на рисунке 4.6.

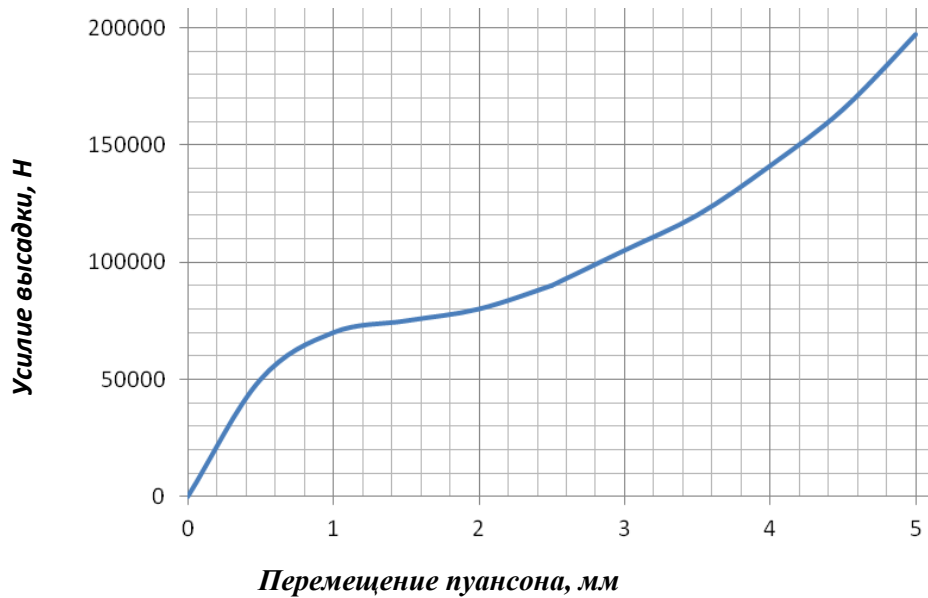


Рисунок 4.6 – Усилия высадки предварительного конуса

Для обобщения полученных результатов диаграмма перестраивалась в координатной системе с безразмерными параметрами  $p = P/(F \cdot \sigma_b)$  и  $l_i = h_i/H$ , где  $F$  – площадь основания большего конуса головки ( $F = 280,5 \text{ мм}^2$ );  $\sigma_b$  – предел прочности калиброванного металла ( $\sigma_b = 694 \text{ Н/мм}^2$ ),  $h_i$  – ход пуансона на  $i$ -ом тапе высадки;  $H$  – полный ход пуансона. Диаграмма изменения относительного усилия предварительного конуса представлена на рисунке 4.7.

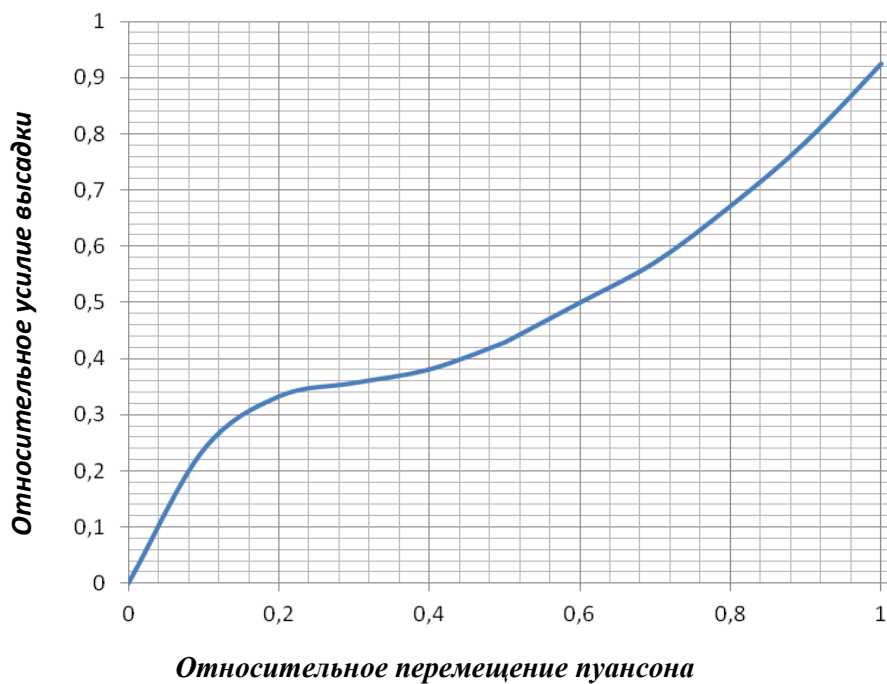
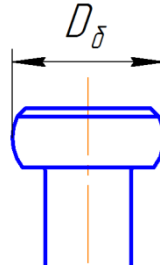


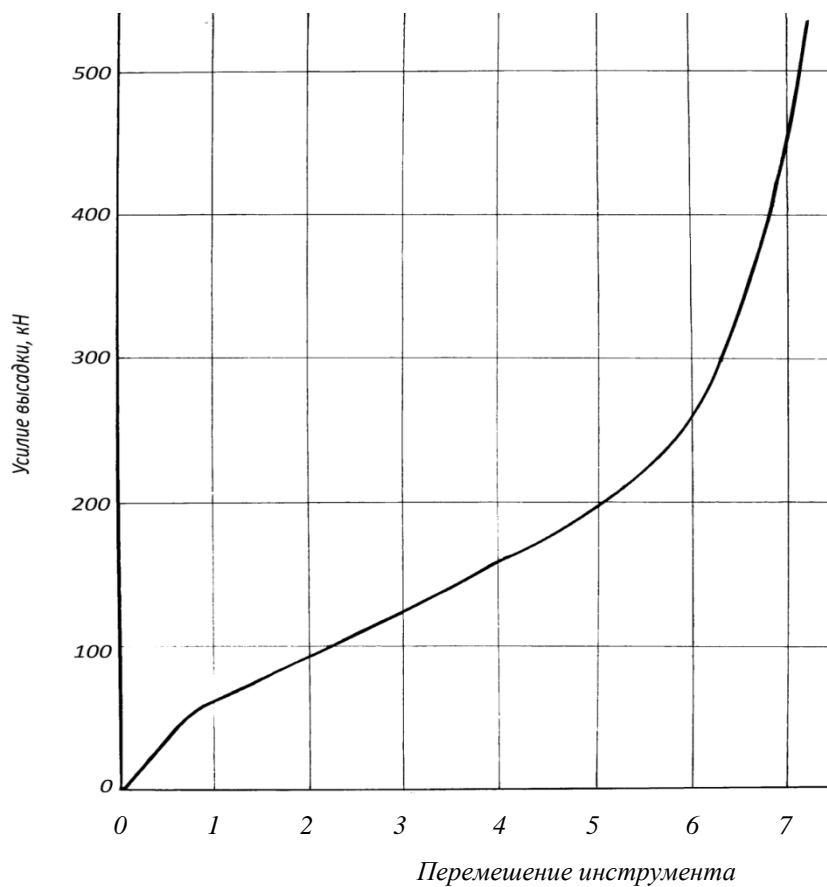
Рисунок 4.7 – Относительные усилия высадки предварительного конуса

При исследовании процесса окончательной высадки бочкообразной головки по варианту I (см. рисунок 4.1) высаживалась головка с диаметром бочки  $D_{\delta} = 19,6 \div 19,8$  мм и высотой  $K = 7$  мм (рисунок 4.5).



*Рисунок 4.8 - Форма и размеры бочкообразной головки, высаживаемой на втором переходе*

Диаграмма изменения усилий в процессе окончательной высадки бочкообразной головки представлена на рисунке 4.9. При высадке бочкообразной головки максимальные технологические усилия составляют  $490 \div 520$  кН.



*Рисунок 4.9 - Усилия высадки бочкообразной головки*

Для обобщения полученных результатов диаграмма перестраивалась в координатной системе с безразмерными параметрами  $p = P/(F \cdot \sigma_6)$  и  $l_i = h_i/H$  (рисунок 4.10), где  $F$  - площадь поперечного сечения головки болта ( $F = 301,7 \text{ мм}^2$ );  $\sigma_6$  - предел прочности калиброванного металла ( $\sigma_6 = 694 \text{ Н/мм}^2$ ),  $K$  - высота отштампованной головки ( $K = 7 \text{ мм}$ ).

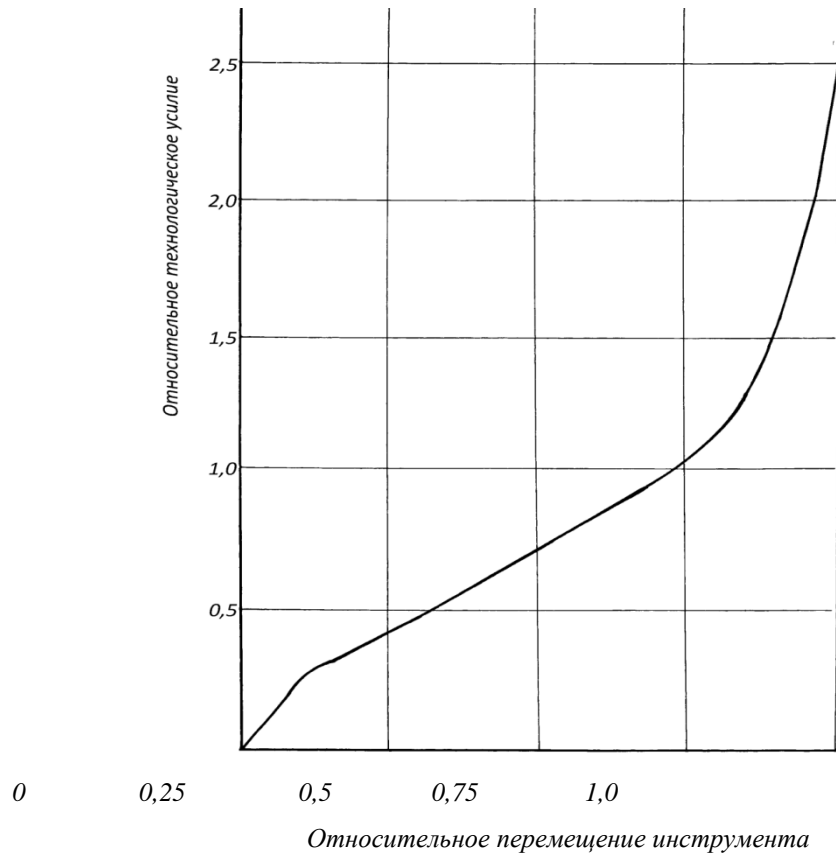
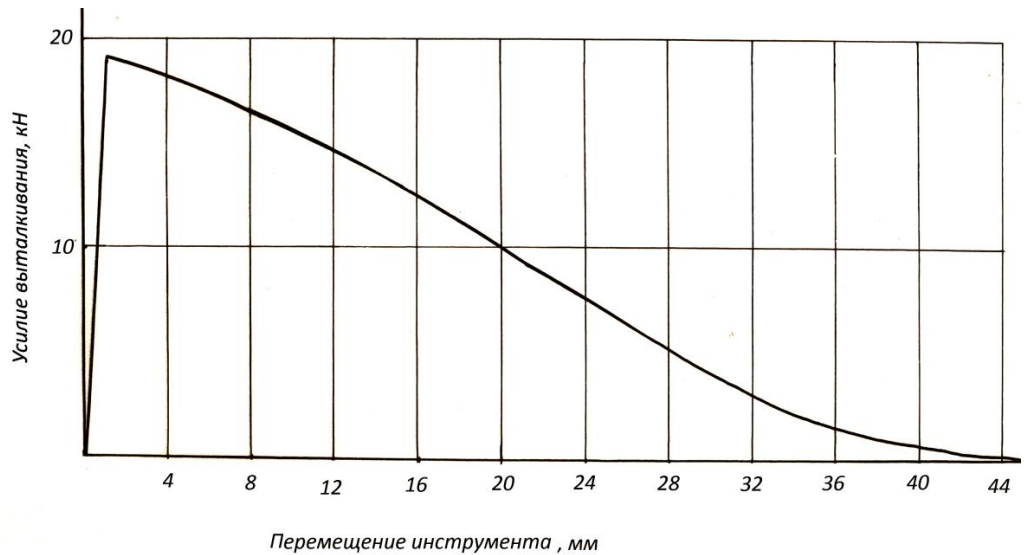


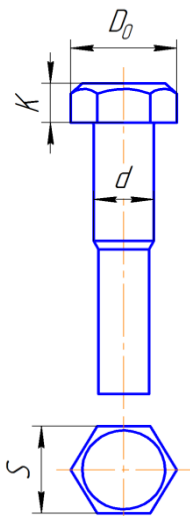
Рисунок 4.10 – Относительные усилия высадки бочкообразной головки

На рисунке 4.11 представлена диаграмма изменения усилий выталкивания полуфабриката из матрицы с высаженной бочкообразной головкой и длиной стержневой части  $l = 45 \text{ мм}$ .



*Рисунок 4.11 - Усилия выталкивания заготовки после высадки  
бочкообразной головки*

В процессе односторонней обрезки на шестигранник формировалась головка с размерами: высота  $K = 7$  мм, размер «под ключ»  $S = 17$  мм и диаметром описанной окружности  $D_o \approx 18,9$  мм (рисунок 4.12).



*Рисунок 4.12 – Форма и размеры обрезанной головки*

Диаграмм изменения усилия  $P$  односторонней обрезки на первом и втором этапах в зависимости от перемещения  $h_i$  обрезного пуансона представлена на рисунке 4.13.

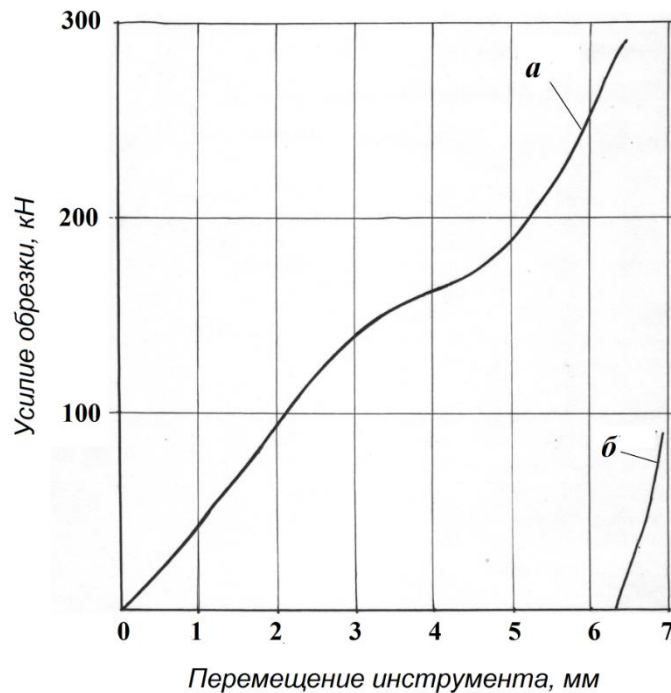
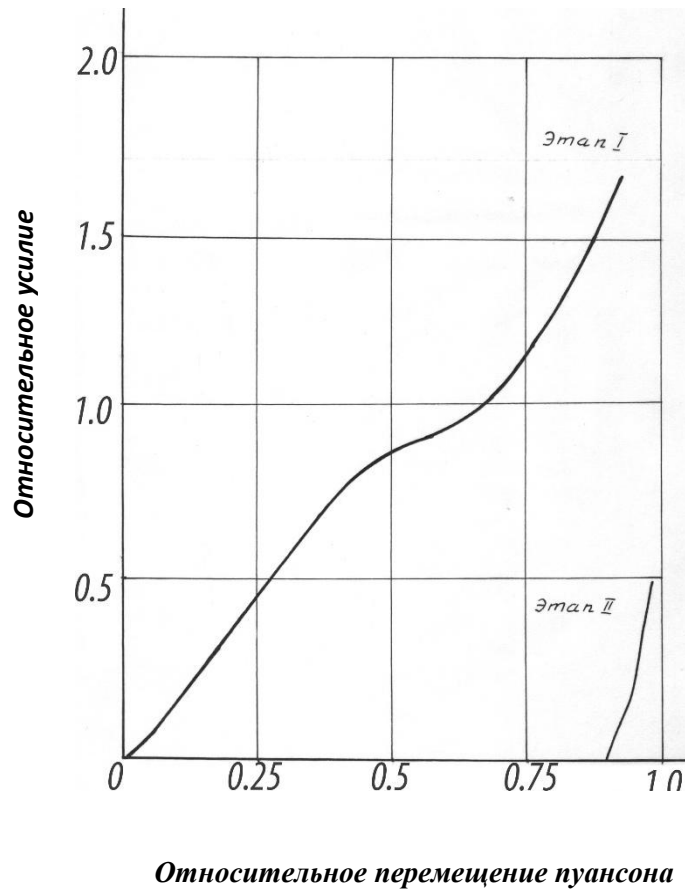


Рисунок 4.13 - Усилия обрезки граней головки: а – первый этап;  
б - второй этап

Максимальное усилие на первом этапе обрезки составляет  $270 \div 290$  кН, а на втором этапе –  $70 \div 90$  кН. Сравнивая полученные данные с усилиями, которые возникают при обрезке подобной головки болтов из стали марки 20, установлено, что усилия возрастают в  $1,6 \div 1,8$  раза.

Для обобщения полученных результатов диаграмма  $P = f(h_i)$  перестраивалась в координатной системе с безразмерными параметрами: удельное усилие  $p = P/(F \cdot \sigma_s)$  и относительное перемещение пуансона  $l_i = h_i/K$ , где  $F$  - площадь поперечного сечения 6-гранной головки ( $F = 250,27$  мм<sup>2</sup>);  $\sigma_s$  – предел прочности калиброванного металла ( $\sigma_s = 694$  Н/мм<sup>2</sup>),  $K$  – высота отштампованной головки. Характер изменения удельного усилий обрезки в показан на рисунке 4.14.



*Рисунок 4.14 - Зависимость удельного усилия обрезки от относительного перемещения пуансона*

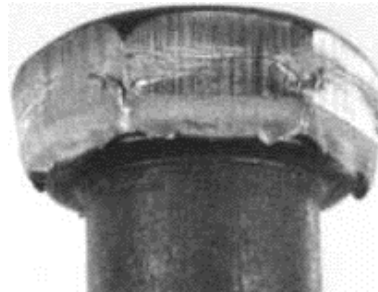
Оценивая качество обрезанных головок, выявлено наличие значительных заусенцев, сколов, вырывов и рябизны (рисунок 4.15).



*Рисунок 4.15 - Головка болта из стали I2X18H10T после односторонней обрезки на шестигранник*

С целью исследования возможности снижения усилий обрезки и повышения качества изделий, заготовки болтов с отштампованными бочкообразными головками подвергались термообработке. Режим термообработки:

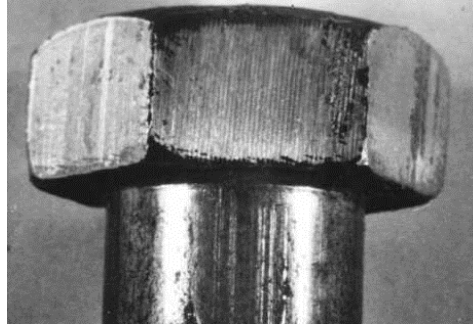
нагрев до температуры 900 °С, выдержка – 40÷50 мин. и ускоренное охлаждение. При обрезке предварительно отожженных бочкообразных головок усилия снижаются на 7÷10 %, а качество головки улучшается незначительно (рисунок 4.16).



*Рисунок 4.16 - Головка болта из стали I2X18H10T после односторонней обрезки на шестигранник из отожженной заготовки*

Анализ результатов экспериментов показал, что формообразование шестигранника болта путем холодной штамповки бочкообразной головки с последующей односторонней обрезкой, тарифицируемой на многопозиционных прессах-автоматах, не обеспечивает получение качественных изделий, а высокие технологические усилия, по всей вероятности, вызовут существенное снижение стойкости обрезного инструмента.

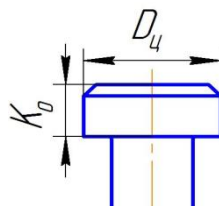
Рассматривалась возможность применения разновидности варианта I, когда шестигранник формировался обработкой резанием (фрезерование). Фрезерование головок болтов осуществлялось на вертикально фрезерном станке F-315V (Германия) с помощью скоростной многолезцовой головки (шесть резцов из твердого сплава T5K10) с диаметром 120 мм. Фактические режимы резания: скорость  $V = 211$  м/мин ( $n = 560$  об/мин.), подача  $S = 250$  мм/мин. Фотография головки, сформированной фрезерованием представлена на рисунке 4.17.



*Рисунок.4.17 - Головка болт, сформированная фрезерованием из бочкообразной заготовки*

Качество головок болтов, полученных холодной штамповкой бочкообразной головки с последующим фрезерованием граней, сравнительно хорошее (см. рисунок.4.17). Однако, формирование шестигранной головки обработкой резанием (фрезерование, протяжка и т.п.) требует либо применения соответствующего металлорежущего оборудования, которое должно встраиваться в линию с кузнечно-прессовыми автоматами, либо создания принципиально нового оборудования типа автоматических роторных или роторно-конвейерных линий (АРЛ и АРКЛ) [44-50] с дополнительным ротором обработки резанием.

При исследовании процессов формирования головки по варианту II (см. рисунок 4.2) на втором переходе штамповалась цилиндрическая головка диаметром  $D_{ц} = 16,5$  мм и высотой  $K_0 = 6,8$  мм (рисунок 4.18)



*Рисунок 4.18 –Цилиндрическая головка, формируемая на втором переходе безоблойной штамповки*

Диаграмма изменения усилия штамповки цилиндрической головки представлена на рисунке 4.19. Установлено, что максимальные усилия на втором переходе составляют 300÷320 кН.

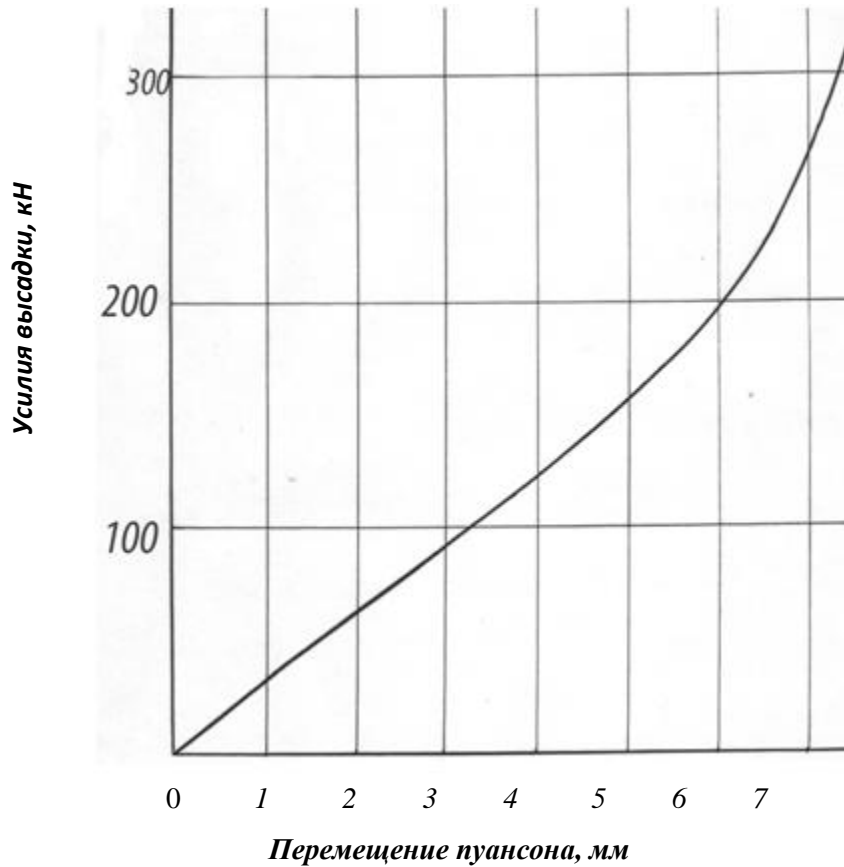


Рисунок 4.19 – Усилия штамповки цилиндрической головки

Для обобщения полученных результатов вводились безразмерные координаты и строилась диаграмма изменения относительных усилий штамповки  $p = P/(F \cdot \sigma_s)$  в зависимости от относительного перемещения пуансона  $l_i = h_i/H$  (рисунок 4.20). При этом  $F$  - площадь поперечного сечения головки ( $F = 213,8 \text{ мм}^2$ );  $\sigma_s$  – предел прочности калиброванного металла ( $\sigma_s = 694 \text{ Н/мм}^2$ ),  $K$  – высота отштампованной головки ( $K = 7 \text{ мм}$ ).



Рисунок 4.20 - Относительные усилия штамповки цилиндрической головки

На третьем переходе варианта II штамповалась шестигранная головка (размер «под ключ»  $S = 17$  мм и диаметр описанной окружности  $D_o \approx 18,9$  мм, высота  $K = 7$  мм.) с лункой, у которой диаметр  $d_n = 14,5$  мм и глубина  $h = 2,2 \div 2,4$  мм (рисунок 4.21).

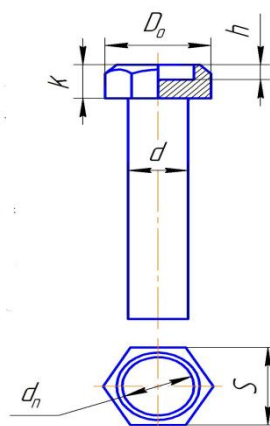
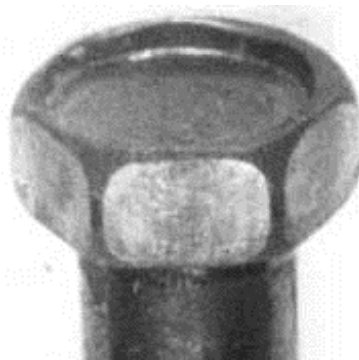


Рисунок 4.21 –Шестигранная головка, формируемая на третьем переходе

При экспериментальном моделировании процессов штамповки на третьем переходе (безоблойная штамповка шестигранника с выдавливанием

лунки) записывались диаграммы изменения усилий  $P$  в зависимости от перемещения пуансона.

Установлено, что при безооблойной холодной штамповке шестигранной головки с лункой на торце (вариант П, см. рисунок 4.2), максимальные усилия при формировании шестигранной головки за счет выдавливания лунки на торце составляют 600÷650 кН. Качество оформления рёбер шестигранника не соответствует требованиям стандартов (рисунок 4.22).



*Рисунок 4.22 - Головка болта, сформированная холодной безооблойной штамповкой*

Анализ полученных результатов показал, что высокие удельные усилия на матрицу и пуансон, составляющие 3000÷3200 Н/мм<sup>2</sup>, по всей вероятности, вызовут существенное снижение стойкости инструмента и значительные потери рабочего времени на его замену и настройку.

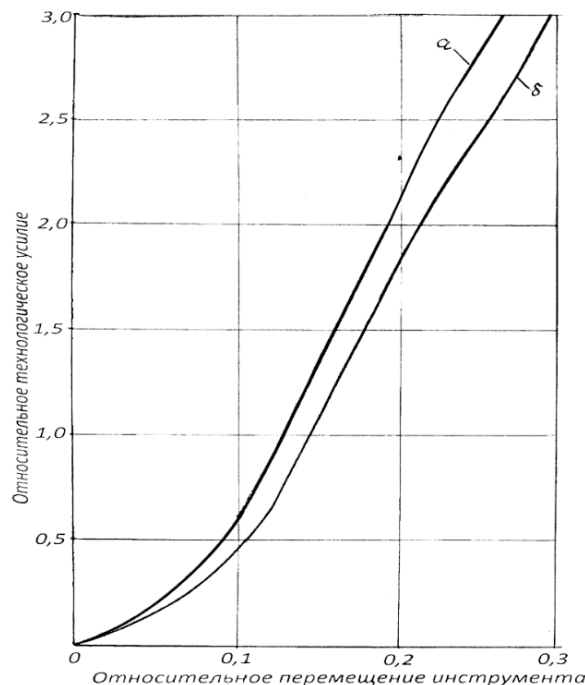
Для снижения технологических усилий на операции безооблойной штамповки шестигранных головок заготовки с предварительно высаженными цилиндрическими головками подвергались термообработке по следующему режиму: нагрев до температуры 900 °С, выдержка в течение 60 мин., охлаждение с печью до 700°С и охлаждение на воздухе.

В случае безотходной штамповки из предварительно отожженной заготовки с цилиндрической головкой при технологических усилиях ~ 500 кН качество оформления ребер шестигранника удовлетворяет требованиям стандартов (рисунок 4.23).



*Рисунок 4.23 - Головка болта, сформированная из отожженной заготовки*

В ходе экспериментов записывались диаграммы изменения усилий штамповки в зависимости от перемещения пуансона, которые перестраивались в безразмерные параметры  $p = P/F \cdot \sigma_0$  и  $l_i = h_i/K$ , где  $F$  - площадь поперечного сечения головки болта ( $F = 250,27 \text{ мм}^2$ );  $\sigma_0$  - предел прочности калиброванного металла ( $\sigma_0 = 694 \text{ Н/мм}^2$ ),  $K$  - высота отштампованной головки ( $K = 7 \text{ мм}$ ). Диаграммы представлены на рисунке 4.24.



*Рисунок 4.24 - Относительные усилия безоблойной штамповки головки: а - без отжига; б - после отжига*

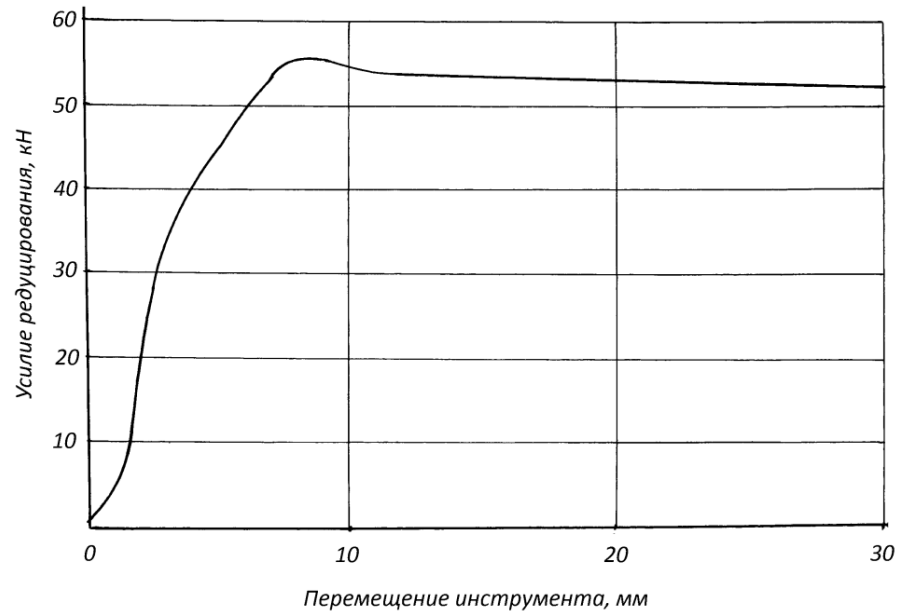
Анализ результатов экспериментов показал, что для реализации технологии, включающей холодную безоблойную штамповку стандартной головки с лункой, необходимо решить проблему качественного формирования ребер шестигранника. Это возможно сделать за счет поиска и применения рациональной формы и размеров выдавливаемой торцевой лунки [118]. Однако изменение конструкции торцевой лунки требует обеспечения прочности соединения головки со стержнем [120] и внесения соответствующих изменений в нормативно-техническую документацию. Эти проблемы рассмотрены в разделах 3.2 и 3.3.

При опробовании комбинированного способа безотходной штамповки (вариант III см. рисунок 4.3) нагрев заготовок с предварительно отштампованными цилиндрическими головками осуществлялся вместе с матрицей в муфельной печи МП-23М до температуры  $\sim 400^\circ\text{C}$ . При усилиях штамповки 350-400 кН качество оформления ребер шестигранника удовлетворительное. Однако, возникают некоторые трудности при выталкивании отштампованных заготовок из матрицы, что по всей вероятности, связано с ухудшением свойств подмазочного покрытия и смазки при нагреве. Усилия выталкивания составляют 150-180 кН. При этом имели место случаи поломки выталкивателей. Выявленные факторы делают проблематичным применение комбинированного способа штамповки шестигранных головок болтов.

Во всех рассматриваемых вариантах технологии (см. рисунки 4.1-4.3) для формирования резьбового участка стержня болта используется операция редуцирования. Используя разработанные инструмент и приспособление (см. рисунок 4.4), проведена серия экспериментов по опробованию этой операции. При экспериментальном моделировании процесса редуцирования на поверхность исходных заготовок наносился подмазочный слой в виде фосфатного покрытия и смазочный материал «Эмбол». Исходные заготовки с диаметром  $d_0 = 11,65$  мм деформировались в редуцирующей матрице с углом рабочего конуса  $2\alpha = 30^\circ$  на диаметр  $d = 10,78$  мм. Рассматривалось два варианта: редуцирование полуфабрикатов с головкой без проведения проме-

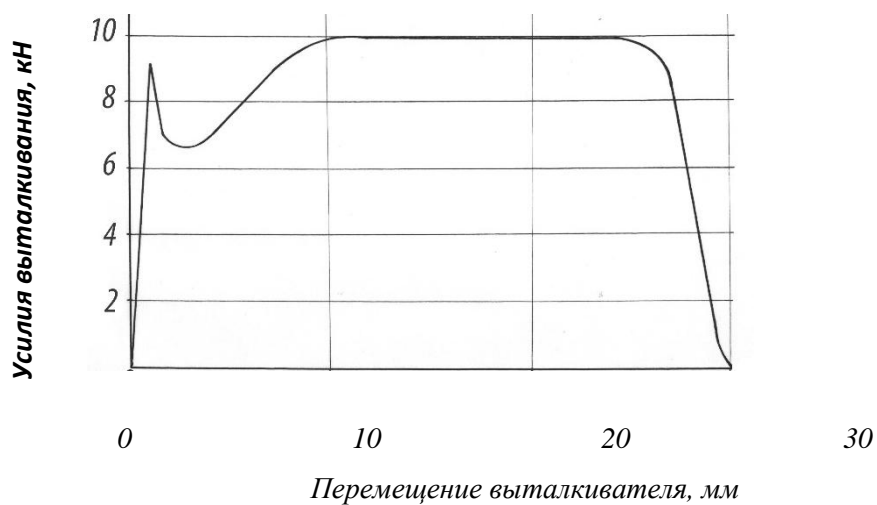
жуточного отжига и редуцирование после проведения промежуточного отжига.

Диаграмма изменения усилия редуцирования заготовок без промежуточного отжига представлена на рисунке 4.25.



*Рисунок 4.25 - Диаграмма усилий редуцирования нетермообработанных заготовок*

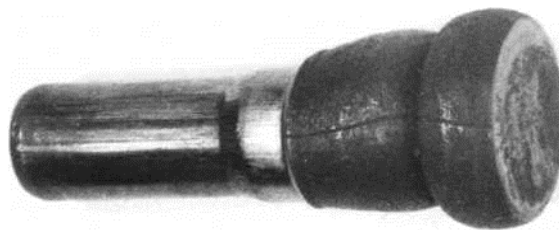
На рисунке 4.26 представлена диаграмма усилий выталкивания.



*Рисунок 4.26 - Диаграмма усилий выталкивания проредуцированной заготовки*

Результаты экспериментов показали, что для стабильного протекания процесса редуцирования необходимо на предыдущих операциях техпроцесса формировать фаску на конце стержня заготовки. В противном случае имеют место искривление и осадка стержневого участка заготовки болта.

При редуцировании отожженных полуфабрикатов с головками даже при наличии фаски на стержне происходит пластическая деформация участка стержня перед деформирующим конусом матрицы (рисунок 4.27). Это связано с тем, что усилия редуцирования отожжённых заготовок становятся больше усилий свободной осадки, в связи с нелинейным характером снижения сопротивления деформации при отжиге. Поэтому, если в технологических процессах использовать промежуточный отжиг полуфабрикатов, то операцию редуцирования необходимо проводить до термообработки.



*Рисунок 4.27 - Деформация отожженного полуфабриката при редуцировании*

Операция накатки резьбы апробирована на четырехпозиционном автомате-комбайне АВ-192I. Процесс накатки протекал стабильно. Качество резьбы, накатанной с помощью встроенного в автомат резьбонакатного устройства типа "ролик-сегмент", соответствует требованиям стандартов. Проверка осуществлялась с помощью калибра и измерительного инструмента.

## **4.2. Применение комплексного критериального подхода для поиска рационального процесса изготовления болтов и винтов с шестигранными головками**

При разработке многопереходных процессов штамповки деталей сложной формы необходимо учитывать большое количество факторов, влияющих на эффективность процессов и качество изделий. Применяемые расчеты далеко не всегда позволяют с высокой точностью и надежностью определять рациональные параметры и режимы деформирования, что приводит к необходимости проведения опытных штамповок и корректировок технологий. При этом поиск рациональной технологии во многом зависит от опыта и интуиции конструктора-технолога. Следует отметить, что результаты расчетов отдельных параметров процессов деформирования (усилие деформирования, параметры напряженно-деформированного состояния, ресурс пластичности и др.) не позволяют комплексно оценить эффективности разрабатываемых технологий в целом.

В работе [121] предложена методика поиска рациональной технологии изготовления изделий сложной формы с использованием многопереходных процессов пластического деформирования на основе комплексного критериального подхода. Дальнейшее развитие методики отражено в работе [122]. Согласно разработанной методике вначале определяется несколько вариантов возможных технологии с различными режимами и формоизменением на отдельных переходах. Затем, используя современные методы натурного и компьютерного моделирования процессов ОМД, по каждому варианту технологии определяются основные параметры (напряженно-деформированное состояние, энергосиловые параметры, параметры устойчивости штампуемой заготовки, ресурс пластичности, качество изделий и т.п.). Для каждого параметра определяется свой критерий:

$$K_{\Pi} = \frac{\Pi_i}{\Pi_{\max}}, \quad (4.1)$$

где  $P_i$  – параметр для  $i$ -го варианта технологии;

$P_{max}$  – параметр для варианта технологии, при которой он принимает самое большое значение.

По каждому варианту технологии критерии суммируются и за основу принимается технология, для которой суммарный критерий имеет минимальное значение.

При поиске рациональной технологии изготовления стержневых изделий с шестигранной головкой из нержавеющей стали с использованием комплексного критериального подхода рассматривались три варианта технологического процесса:

- холодная штамповка бочкообразной головки и обрезка на шестигранник (вариант I, см. рисунок 4.1);
- холодная штамповка цилиндрической головки и безоблойная штамповка шестигранника с выдавливанием лунки (вариант II, см. рисунок 4.2);
- комбинированный способ, включающий холодную штамповку цилиндрической головки, нагрев и полугорячую безоблойную штамповку шестигранной головки с выдавливанием лунки (вариант III, см. рисунок 4.3).

В данной работе оценка производилась с использованием критерия продольной устойчивости, силового критерия, энергетического критерия, критерия износа инструмента, критерия разрушения и критерия расхода металла.

### ***Критерий продольной устойчивости***

При изготовлении болтов и винтов стабильность процесса высадки зависит от размеров штампуемого участка заготовки. Для оценки возможности осуществления процесса деформирования используется параметр, который называется коэффициентом высадки

$$k_g = l_0 / d_0, \quad (4.2)$$

где  $l_0$  - длина высаживаемого участка;

$d_0$  – диаметр исходной заготовки.

Чем меньше величина  $k_{\epsilon}$ , тем стабильнее протекает процесс деформации, так как снижается вероятность продольного изгиба. При большой величине  $k_{\epsilon}$  возможна потеря устойчивости, то есть продольный изгиб штампуемого участка стержня, что приводит к возникновению брака.

На основании многочисленных теоретических и экспериментальных исследований, а также практического опыта установлено, что при штамповке за один переход коэффициент высадки  $k_{\epsilon}$  не должен превышать 2,3 [13, 25]. Если  $k_{\epsilon} \geq 2,3$ , то штамповку головки необходимо осуществлять за несколько переходов.

Следует отметить, что при высадке болтов с предельным коэффициентом высадки  $k_{\epsilon}$  необходимо обеспечить качественный чистый срез заготовки и перпендикулярность плоскости отреза к продольной оси, что отмечено в разделе 2.5. При осадке заготовки с «косым» срезом торцевой поверхности повышается вероятность продольного изгиба и, как следствие, возникновения брака.

Следует отметить, что возможность изгиба заготовки при осадке увеличивается со снижением сил трения по контактируемым поверхностям заготовки и пуансона. Поэтому при неблагоприятных условиях для исключения продольного изгиба заготовки ее концевую часть зажимают в пуансоне. С этой точки зрения схемы штамповки с использованием инструмента с конусной рабочей поверхностью более предпочтительны, поскольку обеспечивают большую площадь контактной поверхности при деформировании.

Таким образом, критерий продольной устойчивости:

$$K_{IV} = \frac{k_{\epsilon i}}{k_{\epsilon \max}}. \quad (4.3)$$

где  $k_{\epsilon i}$  - коэффициент высадки по  $i$ -ой технологии;

$k_{\epsilon \max}$  - коэффициент высадки по технологии, при которой он принимает максимальное значение.

### *Силовой и энергетический критерии*

С развитием новых процессов штамповки и конструкции оборудования, с расширением области применения обработки металлов давлением, с повышением качества исходного материала и скоростей обработки все большее значение приобретает вопрос о потребных усилиях, работе деформации и мощности. Определение этих величин необходимо при переходе на изготовление новых изделий, например, изделий с новыми формами и технологическими параметрами штамповки, для выбора исходного материала или для решения вопросов о повышении производительности оборудования. Эффективная мощность оборудования ограничивается, с одной стороны, наибольшим допусаемым усилием деформирования, а с другой стороны, перегрузочной способностью электродвигателя. Лишь при одновременном учете усилий и эффективной мощности можно наиболее рационально и полно использовать кузнечно-прессовое оборудование, не опасаясь его перегрузки.

При разработке технологического процесса следует подобрать такие методы, при которых требуемая форма изделия получалась бы простейшим путем, с наименьшей затратой сил и энергии.

Используя результаты компьютерного и натурного моделирования (см. разделы 3.2-3.4 и 4.1), для каждого варианта технологии определяли максимальные усилия деформирования и рассчитывали силовой критерий  $K_c$

$$K_c = \frac{F_i}{F_{\max}}, \quad (4.4)$$

где  $F_i$  – максимальное усилие штамповки для  $i$ -го варианта технологии;

$F_{\max}$  - максимальное усилие штамповки для варианта технологии, при которой  $F$  принимает самое большое значение.

При нахождении энергетического критерия вначале для каждого варианта технологии на основании либо компьютерного моделирования, либо экспериментальных данных строится диаграмма  $F=f(z)$  зависимости усилия

деформирования  $F$  от перемещения инструмента  $z$ . Типичная кривая представлена на рисунке 4.25.

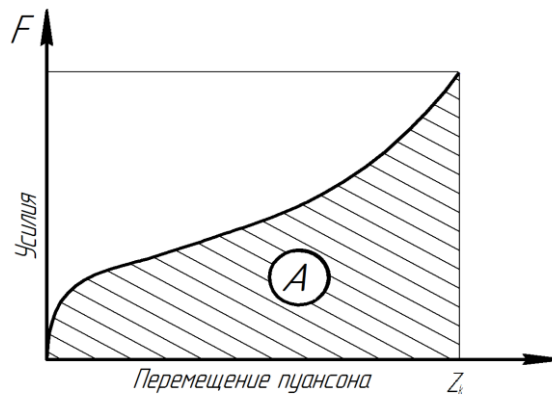


Рисунок 4.25 – Типичная диаграмма зависимости усилия  $F$  деформирования от перемещения пуансона  $z$

С высокой степенью точности кривую  $F=f(z)$  можно аппроксимировали полиномом пятой степени:

$$F=k_1(z)^5+k_2(z)^4+k_3(z)^3+k_4(z)^2+k_5(z) \quad (4.5)$$

Затем определяется работа деформации  $A^*$  как площадь фигуры, ограниченной кривой  $F=f(z)$  и осью абсцисс  $z$  (см.рисунок 4.25). Для этого определяется интеграл уравнения (4.5) в пределах от 0 до  $z_k$ , где  $z_k$  - полный ход инструмента за весь этап деформирования:

$$A^* = \int_0^{z_k} [k_1(z)^5 + k_2(z)^4 + k_3(z)^3 + k_4(z)^2 + k_5(z)]d(z). \quad (4.6)$$

После интегрирования имеем:

$$A^* = \left[ \frac{1}{6}k_1(z)^6 + \frac{1}{5}k_2(z)^5 + \frac{1}{4}k_3(z)^4 + \frac{1}{3}k_4(z)^3 + \frac{1}{2}k_5(z)^2 \right] \Big|_0^{z_k}. \quad (4.7)$$

Энергетический критерий:

$$K_j = \frac{A_i^*}{A_{\max}^*}, \quad (4.8)$$

где  $A_i^*$  - работа деформации при штамповке по  $i$ - ому варианту технологии;  $A_{\max}^*$  - работа деформации при штамповке по варианту, при котором работа имеет максимальное значение.

### ***Критерий износа инструмента.***

Проблемам повышения износостойкости деталей и инструмента из различных материалов посвящены работы И.В. Крагельского [124], Д.Н. Гаркунова [125] В.Н. Виноградова [126], М.М. Хрущева [127] и др. Многообразие критериев оценки износостойкости свидетельствует о существенно различных подходах исследователей к объяснению и описанию механизмов изнашивания материалов.

В основу критерия износостойкости инструмента положена энергетическая теория изнашивания твердых тел [123,124], согласно которой объемный износ  $\Delta W$  пропорционален работе сил на преодоление трения  $A_{тр}$  в зоне контакта, то есть

$$\Delta W = J_{\omega} \cdot A_{тр}, \quad (4.9)$$

где  $J_{\omega}$  ( $\text{м}^3/\text{Дж}$ ) - показателя энергетической интенсивности изнашивания (ПЭИИ), который определяется на основании экспериментальных исследований с использованием специального оборудования (машины трения).

В общем случае:

$$A_{тр} = F_{тр} s = \mu F_{норм} s, \quad (4.10)$$

где  $F_{тр}$  - сила трения, Н;

$\mu$  - коэффициент трения;

$F_{норм}$  - сила нормального давления, Н;

$s$  - перемещение, м.

Таким образом критерий износа инструмента

$$K_{И} = \frac{A_{мп_i}}{A_{мп_{\max}}}, \quad (4.11)$$

где  $A_{мп_i}$  - работа сил трения при штамповке по  $i$ -ому варианту технологии;

$A_{mp \max}$  - работа сил трения при штамповке по варианту технологии с максимальными силами трения.

### ***Относительный критерий разрушения***

При сопоставительном анализе различных вариантов технологии изготовления стержневых изделий применялся известный критерий разрушения Кокрофта-Лэтэма (Cockcroft & Latham) [102], который определяется непосредственно в процессах компьютерного моделирования с использованием ПК «DEFORM-3D». Формула (3.14) определения этого критерия представлена в разделе 3.1.

Относительный критерий разрушения

$$K_D = \frac{D_i}{D_{\max}}, \quad (4.12)$$

где  $D_i$  - максимальное значение критерия Кокрофта-Лэтэма при штамповке по  $i$ -му варианту технологии;

$D_{\max}$  - максимальное значение критерия Кокрофта-Лэтэма по варианту, при котором этот критерий принимает самое максимальное значение.

### ***Критерий расхода металла***

Важным экономическим фактором, влияющим на эффективность процесса, изготовления крепежных изделий является расход металла на единицу выпущенной продукции. Отходы металла возникают в связи с необходимостью удаления переднего и заднего концов прутка или бунта, удаления заготовок при отработке и наладке процесса штамповки, а также при реализации отработанной технологии. Например, в случае использования технологии по варианту I (см. рисунок 4.1) при обрезке бочкообразной головки на шестигранник срезаемый металл уходит в отходы. А при использовании безоблойной штамповки с выдавливанием лунки (варианты II и III) обеспечивается экономия металла.

Критерий расхода металла

$$K_{PM} = \frac{V_i}{V_{\max}}, \quad (4.13)$$

где  $V_i$  - объем головки перед окончательным формированием шестигранника для  $i$ -ой технологии;

$V_{\max}$  - объем головки перед окончательным формированием шестигранника для технологии, по которой объем максимальный.

При определении итогового показателя критериальной оценки используется зависимость

$$K_{\Sigma} = \sum_1^n K_i a_i ,$$

где  $a_i$  - весовой коэффициент значимости для  $i$ -ого критерия.

Весовые коэффициенты значимости  $a_i$  можно определять с использованием метода экспертных оценок [132-134].

После проведения соответствующих расчетов за основу принимается технология, по которой итоговый показатель критериальной оценки  $K_{\Sigma}$  имеет минимальное значение.

В таблице 4.1 представлены результаты поиска рациональной технологии изготовления стержневых изделий с шестигранной головкой из нержавеющей стали с использованием комплексного критериального подхода.

Таблица 4.1 - Результаты поиска рациональной технологии изготовления болтов и винтов из нержавеющей стали

Вариант технологии	Особенности	$K_{ПУ}$	$K_C$	$K_Э$	$K_H$	$K_D$	$K_{PM}$	$\sum K$
Штамповка бочкообразной головки и обрезка на шестигранник (вариант I)	Односторонняя обрезка	1	0,89	0,85	1	1	1	5,74
	Двухсторонняя обрезка	1	0,87	0,86	0,81	0,78	1	5,32
Штамповка цилиндрической головки и штамповка шестигранника с выдавливанием лунки (вариант II)	$\frac{h}{K} = 0,3$	0,72	0,93	0,91	0,89	0,61	0,91	4,97
	$\frac{h}{K} = 0,6$	0,63	1	1	0,95	0,65	0,81	5,04
Штамповка цилиндрической головки, нагрев и штамповка шестигранника с выдавливанием лунки (вариант III)	$\frac{h}{K} = 0,3$	0,72	0,83	0,75*	0,84	0,58	0,91	4,63
	$\frac{h}{K} = 0,6$	0,63	0,86	0,77*	0,87	0,60	0,81	4,54

\*Примечание: Без учета затрат энергии на нагрев

Анализируя результаты расчетов, можно сделать выводы:

1. При использовании технологий по варианту I, включающих высадку бочкообразной головки с последующей её обрезкой на шестигранник, предпочтительно использовать двухстороннюю обрезку.

2. В случае использования технологий, включающих безоблойную штамповку с выдавливанием торцевой лунки, лучший суммарный критерий у технологии по варианту III, в которой используется комбинированный способ, состоящий из холодной штамповки цилиндрической головки, нагрева до температуры  $400 \div 500^\circ\text{C}$  и полугорячей штамповки шестигранника с выдавливанием торцевой лунки. Однако в этом случае требуется создание нового технологического оборудования: либо линии, включающей холодно-высадочный автомат, нагревательное устройство и автомат для горячей штамповки, либо соответствующей АРЛ или АРКЛ с ротором для нагрева.

3. При использовании технологии, включающей штамповку цилиндрической головки и штамповку шестигранника с выдавливанием лунки (вариант II), при варьировании глубины лунки значения суммарных критериев отличаются незначительно.

#### **4.3. Разработка и промышленное опробование технологии изготовления винтов из нержавеющей стали**

Вышеизложенные результаты экспериментальных и теоретических исследований использовались при разработке и освоении технологии изготовления винтов М6 с длиной стержня 12÷20 мм (ОСТ 1 31501-80) с шестигранной головкой из стали марки 12Х18Н10Т.

Требования по ОСТ 1 31501-80 по механическим свойствам к винтам:  
 $\sigma_s = 830 \div 1030$  МПа.

Исходный горячекатаный бунтовой металл диаметром  $9,0 + 0,3 \div 0,5$  мм по ГОСТ 5949-75 производства ОАО «Ижсталь» (партия № 7870, плавка № 1к 9571) имел химический состав: С =0,027%; Мn=0,34%; Cr=17,16%; Ni=9,05%; Мо=0,27%; V=0,05%; W =0,15%; Si=0,034%; P=0,013%.

Металл подвергался подготовке к штамповке, которая включала:

- обточку поверхности со скоростью  $V=18$  м/мин. на диаметр 8,3 мм;
- оксалатирование;
- трехкратное волочение 8,2 (26,2%)– 7,13 (26,8%)– 6,1 (25,4%) - 5,27 (волоочильный стан модели ВСМ 1/650);
- отжиг;
- травление;
- оксалатирование;
- однократное волочение 5,27 (1,9%)– 5,22(волоочильный стан модели ВСМ 1/650)

Результаты испытания калиброванного металла на растяжение:

$$\sigma_{0,2} = 225 \text{ МПа}; \sigma_s = 650 \text{ МПа}; \delta = 47,0 \text{ \%}; \psi = 76 \text{ \%} .$$

Схема технологического процесса изготовления винтов представлена на рисунке 4.26. Технология включала отрезку заготовки, предварительную высадку конической головки, штамповку бочкообразной головки, двухстороннюю обрезку головки на шестигранник, формирование концевой фаски точением и накатку резьбы.

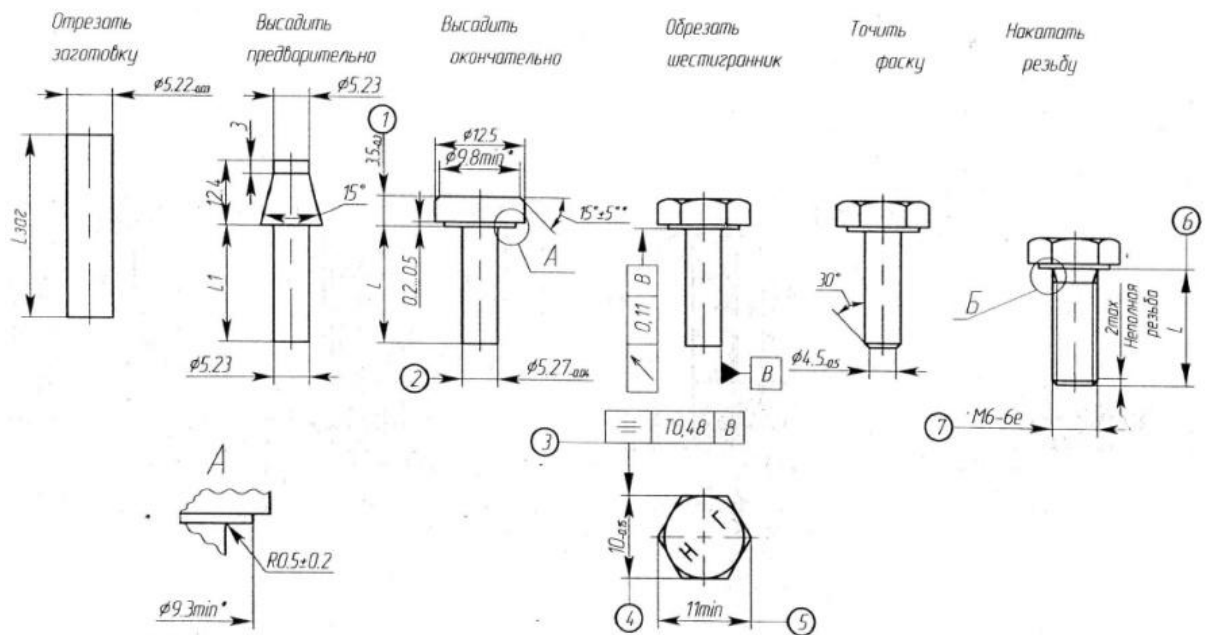


Рисунок 4.26 – Схема технологического процесса изготовления винтов М6 по ОСТ 1 31501-80

Используя результаты исследований, которые представлены в разделах 3.2÷3.4 и 4.1, определены усилия штамповки на отдельных переходах и полное усилие, которое необходимо приложить к штампуемым заготовкам в крайнем положении ползуна прессы для реализации процесса.

$$P_1 = 119 \text{ кН} ; \quad P_2 = 208 \text{ кН} ; \quad P_3 = 165 \text{ кН} ; \quad P_{\Sigma} = 492 \text{ кН}$$

По усилию  $P_{\Sigma}$  для реализации технологии, представленной на рисунке 4.26, выбран кузнечно-прессовый автомат модели 5/16-4ВМ (фирма «National Machinery», США), технические характеристики которого представлены в таблице 4.2

Таблица 4.2 - Техническая характеристика КПА модели 5/16-4ВМ

Параметры	Значения
Количество позиций	3
Макс. диаметр проволоки при $\sigma_s = 600$ МПа	8,7
Макс. длина выталкивания из матрицы, мм	80
Мин. длина выталкивания из матрицы, мм	15
Макс. длина отрезанной заготовки, мм	96
Мин. длина отрезанной заготовки, мм	20
Номинальное усилие штамповки, кН	630
Мощность двигателя, кВт	11
Масса автомата, тн.	7,6
Производительность, шт./мин.	90
Инструмент для наката резьбы	плашки
Макс. длина накатываемой резьбы, мм	38

Фотография автомата 5/16-4ВМ представлена на рисунке 4. 27.



Рисунок 4.27 – Фотография автомата 5/16-4ВМ

На рисунке 4.28 представлена фотография заготовок по переходам штамповки и готовый винт М6 по ОСТ 1 31501-80.



*Рисунок 4.28 – Фотография заготовок, изготовленных на автомате 5/16-4ВМ, на отдельных переходах штамповки и готовый винт*

Процесс штамповки винтов М6х20 после соответствующей наладки автомата 5/16-4ВМ протекал стабильно. Отштампованные изделия по механическим свойствам и размерам соответствовало требованиям ОСТ 1 31501-80.

#### **4.4. Выводы по главе 4**

1. Применение традиционного способа формирования шестигранной головки односторонней обрезкой при штамповке крепежных изделий из нержавеющей сталей с использованием кузнечно-прессовых автоматов не обеспечивает получение качественных головок в связи с образованием сколов, задиров, вырывов, заусенцев и т.п. Возможно повышение качества обрезки за счет поиска и применения новых технических решений, направленных на совершенствование режимов обрезки и конструкции обрезного пуансона и матрицы (углы резания, новые смазочные материалы и др.).

2. Формирование шестигранной головки болтов и винтов обработкой резанием (фрезерование, протяжка и т.п.) требует либо применения соответствующего металлорежущего оборудования, которое должно встраиваться в

линию с КПА, либо создания роторного оборудования (АРЛ и АРКЛ) с дополнительным ротором обработки резанием.

3. Для реализации технологии, которая включает безоблойную штамповку головки, необходимо решить проблему качественного формирования ребер шестигранника, что возможно сделать за счет поиска рациональных формы и размеров выдавливаемой торцевой лунки. Однако это требует внесения соответствующих изменений в нормативно-техническую документацию (ГОСТ, ОСТ, ТУ и т.п.).

4. Технологии, включающие отжиг промежуточной заготовки или полугорячую безоблойную штамповку, могут быть реализованы при условии создания соответствующих автоматических роторных или роторно-конвейерных линий с роторами для термической обработки.

5. Усовершенствована методика поиска рационального формоизменения в многопереходных процессах штамповки изделий сложной формы на основе комплексного критериального подхода применительно к технологии изготовления болтов и винтов из нержавеющей стали. На основании анализа полученных результатов установлено:

- при использовании технологий, включающих высадку бочкообразной головки с последующей её обрезкой на шестигранник, предпочтительно использовать двухстороннюю обрезку;

- при использовании технологий, включающих безоблойную штамповку с выдавливанием торцевой лунки, лучший суммарный критерий у технологии, в которой используется комбинированный способа, состоящий из холодной штамповки цилиндрической головки, нагрева до температуры  $400\div 500^{\circ}\text{C}$  и полугорячей штамповки шестигранника с выдавливанием торцевой лунки. Однако такая технология требует создания нового технологического оборудования: либо линии, включающей холодновысадочный автомат, нагревательное устройство и автомат для горячей штамповки, либо соответствующей автоматической роторной или роторно-конвейерной линий с ротором для нагрева;

- при использовании технологии, включающей штамповку цилиндрической головки и штамповку шестигранника с выдавливанием лунки, при варьировании глубины лунки значения суммарных критериев отличаются незначительно.

5. Результаты экспериментальных и теоретических исследований использовались в условиях АО «Белебеевский завод «Автономаль» при разработке и освоении технологии изготовления винтов М6 с длиной стержня  $12\div 20$  мм (ОСТ 1 31501-80) с шестигранной головкой из стали марки 12Х18Н10Т. Экономический эффект – 6,2 млн.руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен анализ химического состава и проведены испытания механических свойств нержавеющей стали I2X18Ni0T и I0X17Ni3M2T, которые использовались в экспериментах. Определены рациональные режимы подготовки и волочения сталей. Проведены испытания калиброванного металла, определены механические свойства и построены кривые упрочнения сталей, для описания которых использовалась экспоненциальная зависимость Г.А. Смирнова-Аляева. Оценивая эффективность подмазочных покрытий и смазочных материалов по силам деформирования заготовок в коническом отверстии (выдавливание и редуцирование) и их выталкивания из матрицы, установлено, что при холодной штамповке крепежных изделий из нержавеющей стали:

- наиболее эффективными подмазочными покрытиями являются оксидное и медное, нанесенное химико-термическим способом;

- среди традиционных СОТС хорошие результаты обеспечивают Эмбол-4, Форсол, КТИОЛ и Твол;

- среди современных СОТС зарубежного производства наиболее эффективными являются «Макко-Экструдойл-51» и «Экструдинг-641» (фирма «Витко Кемикал», США), а отечественный смазочный материал «Росойл-ШОК» и его модификации по технико-экономическим показателям не уступают лучшим мировым аналогам.

2. По результатам конечно-элементное моделирование процесса формирования шестигранной головки болтов из нержавеющей стали с использованием одно- и двухсторонней обрезки определены нормальные растягивающие и касательные напряжения, а также критерий разрушения Кокрофта-Лэтэма в точках, расположенных вблизи зоны обрезки. Установлено, что при использовании двухсторонней обрезки по сравнению с одно-сторонней: максимальные растягивающие напряжения  $\sigma_y$  в точках, расположенных вблизи зоны деформирования, снижаются в 1,45 раз; макси-

максимальные касательные напряжения  $\tau_{yz}$  - в 1,51 раза; а критерии разрушения Кокрофта-Латама - в 1,28 раз. Вышеотмеченные результаты свидетельствуют о том, что применение двухсторонней обрезки вместо односторонней снижает вероятность образования на гранях головки дефектов в виде трещин, сколов, вырывов и т.п.

3. Выполнены исследования процесса нагружения осевой растягивающей нагрузкой крепежного соединения с болтом, на торце головки которого выполнялась лунка различной глубины. Определялись напряжения в резьбовой части, в головке и в месте перехода от головки к стержню. Установлено, что с увеличением глубины лунки  $h$  происходит снижение осевых напряжений в резьбовой части и рост как осевых, так и касательных напряжений в области соединения головки болта со стержнем, а также рост касательных напряжений в головке. Установлено, что при относительной глубине лунки ( $h / K$ ) более 0,60 повышается вероятность разрушения болта по головке, что недопустимо по нормативно-технической документации. А при ( $h / K$ ) менее 0,55 ÷ 0,60 разрушение происходит по резьбовому участку без разрушения головки.

4. С использованием метода конечных элементов выполнено моделирование процесса безоблойной штамповки шестигранной головки болтов из нержавеющей стали с формированием торцевой лунки различной формы и глубины. На основании анализа результатов расчетов установлено, что при формировании шестигранной головки за счет выдавливания лунки в виде усеченного конуса по сравнению с выдавливанием цилиндра с конусом: максимальные усилия штамповки снижаются на 13-15%, а нормальные давления  $\sigma_N$  на поверхности контактные заготовки с инструментом снижаются на 12-16%; относительный радиус  $r$  описанной окружности снижается на 2-3%, а относительная высота  $z$  незаполнения ребра повышается на 5-10%. Таким образом, применение технологии, включающей формирование шестигранной головки за счет выдавливания лунки в виде усеченного кону-

са, обеспечивает снижение усилий на инструмент, что повышает его стойкость при незначительном снижении качества оформления ребер.

5. Усовершенствована методика поиска рационального формоизменения в многопереходных процессах штамповки изделий сложной формы на основе комплексного критериального подхода применительно к технологии изготовления болтов и винтов из нержавеющей стали. Установлено:

- при использовании технологий, включающих высадку бочкообразной головки с последующей её обрезкой на шестигранник, предпочтительно использовать двухстороннюю обрезку;

- при использовании технологий безоблойной штамповки с выдавливанием торцевой лунки, лучший суммарный критерий у технологии, в которой используется комбинированный способа, состоящий из холодной штамповки цилиндрической головки, нагрева до температуры  $400\div 500^{\circ}\text{C}$  и полугорячей штамповки шестигранника с выдавливанием торцевой лунки. Однако такая технология требует создания нового технологического оборудования: либо линии, включающей холодновысадочный автомат, нагревательное устройство и автомат для горячей штамповки, либо соответствующей автоматической роторной или роторно-конвейерной линии с ротором для нагрева;

- при использовании технологии, включающей штамповку цилиндрической головки и штамповку шестигранника с выдавливанием лунки в виде усеченного конуса, либо цилиндра с конусом, суммарные критерии при различной глубине лунки отличаются незначительно. Однако применение таких технологий требует согласование с потребителем изделий внесения изменений в нормативно-техническую документацию в части корректировки формы и размеров торцевой лунки.

6. Применение разработанных технических решений (патенты на изобретения и полезную модель) позволяют повысить качество болтов и винтов из нержавеющей стали, повысить стойкость штампового инструмента и снизить затраты на производство.

7. Результаты исследований использовались в условиях АО «Белебеевский завод «Автономаль» при разработке и освоении технологии изготовления винтов М6 с длиной стержня  $12 \div 20$  мм (ОСТ 1 31501-80) с шестигранной головкой из стали марки 12Х18Н10Т. Экономический эффект - 6,2 млн. руб.

### **Список литературы**

1. Ульянин Е.А. Коррозионностойкие стали и сплавы.- М.: Metallurgy, 1980. – 208 с.
2. Лысенков А.И. Особенности нержавеющей сталей и их влияние на качество крепежа // Крепеж, клеи, инструмент. 2015. № 2. - С. 33-38.
3. Крепежные изделия для современного машиностроения / И.А. Воробьев, С.В. Овчинников, Г.В. Бунатян, Т.Ш. Галиахметов и др. // Нижний Новгород: МПК-сервис. 2016. – 520 с.
4. Приказ Министерства промышленности и торговли РФ № 652 от 31.03.2015 «Об утверждении плана мероприятий по импортозамещению в отрасли черной металлургии Российской Федерации».
5. Нержавеющие коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные стали для изготовления крепежных деталей / И. А. Воробьев, В.А. Володин, А.И. Лашин и др.// НижнийНовгород: Нижегородский гуманитарный центр. 2005.- 317 с.
6. Нержавеющая сталь ВНС-74 для изготовления высокопрочного крепежа / В.А. Володин, О.С. Банных, И.А. Воробьев и др. // Крепеж, клеи, инструмент. 2012, № 1(39). - С. 24-26.
7. Воробьев И.А., Банных О.А. Нержавеющие стали для производства крепежных изделий методом холодной высадки / С-Пб: Стройметалл. 2010, № 2. - С. 32-35.
8. Патент 4295769 США, МКИ С 22 С 38/08.
9. Патент 61-67760 Япония, МКИ С 22 С 38/18.
10. Патент 56-163245 Япония, МКИ С 22 С 38/08.

11. Хохлов Е.Н., Макаров В.А., Галкин В.В. Прогрессивные конструкции головок крепежных деталей и технологии их изготовления холодной объемной штамповкой. Кузнечно-штамповочное производство. 2003, №2. - С. 33-36.
12. Петриков В.Г., Власов А.П. Прогрессивные крепежные изделия. М.: Машиностроение, 1991.- 256 с.
13. Мокринский В.И. Производство болтов холодной объемной штамповкой. - М.: Металлургия. 1978. -78 с.
14. Мокринский В.И., Железков О.С. Новые прогрессивные виды и технологические процессы изготовления крепежных изделий / Сер. Метизное производство. Вып. 2. - М.: Ин-т Черметинформация. 1990. – 22 с.
15. Железков О.С., Морозов Н.П., Семашко В.В. Малоотходные технологии изготовления крепежных изделий с головками / Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением. Сб. науч. тр. – Магнитогорск, Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та. им. Г.И.Носова. 2011.- С.135-139.
16. ГОСТ 1798-70. Болты с шестигранной головкой
17. Бунатян Г.В. Прогрессивный крепеж в российском машиностроении. Страницы и уроки истории / Метизы. 2006, № 2. - С. 86-90.
18. Бунатян Г.В. Жизненный цикл. Анализ крепежных изделий, применяемых в отечественных автомобилях / Метизы. 2006, № 03. - С. 6-8.
19. Бунатян Г.В., Напалков А.В. Пути модернизации крепежных соединений в автомобилях / Автомобильная промышленность. 2011, № 4.- С. 36-39.
20. Направления совершенствования крепежных соединений в автомобильной технике / Ю.А. Лавриненко, Г.В. Бунатян, А.Л. Карташов и др. // Метизы. 2005, № 1. - С. 78-81.
21. Рудаков В.П., Кузнецова А.И., Полякова М.А. Путевые шурупы / Метизы. 2008, № 1. - С. 87-92.

22. Амиров М.Г. Повышение эффективности производства крепежных изделий// Кузнечно-штамповочное производство. 1985, № 9. – С 2-3.
23. Биллигман И. Высадка и другие методы объемной штамповки- М: Машгиз, 1960. - 457 с.
24. Мисоужников В.М., Гринберг М.Я. Технология холодной высадки металлов. - М.: Машгиз, 1951. - 307 с.
25. Васильев С.П. Производство крепежных изделий. М.: Metallurgia, 1981. – 102 с.
26. Напалков А.В. Схемы высадки головок стержневых крепежных деталей / Метизы. 2008, №2. - С. 70-74.
27. Патент РФ на изобретение № 2158650 МКИ<sup>7</sup> В21К 1/46. Способ изготовления изделий типа заготовок болтов с диаметром стержня, примерно равным среднему диаметру резьбы / Тефтелев Е.Н, Трефилов В.А., Веремеенко В.В. и др. / Оpubл. 10.11.2000. Бюл. № 31.
28. Железков О.С., Семашко В.В., Семихатский С.А. Исследование процесса обрезки граней головок болтов // Процессы и оборудование металлургического производства: Межрег. сб. науч. тр. –Магнитогорск. – 2009. - С. 139-142.
29. А.с. № 274632, МКИ В 21 К 1/46 Неподвижная матрица обрезающего автомата / Литвишков В.И., Степанов И.В. Васильченко И.Н. и др.// Оpubл. 10.06.1970. Бюл. № 7.
30. Патент РФ на изобретение № 2041763 МКИ<sup>7</sup> В21К 1/46. Способ обрезки изделий / Веремеенко В.В., Драпеко В.Н., Хмель В.Д. и др. // Оpubл. 20.07.1995. Бюл. № 25.
31. Патент РФ на полезную модель № 88589 МКИ<sup>7</sup> В21К 1/50. Инструмент для обрезки головок стержневых изделий с криволинейной опорной поверхностью / Железков О.С., Семашко В.В., Павлов А.М. и др. // Оpubл. 20.11.2009. Бюл. № 32.
32. Навроцкий Г.А., Миропольский Ю.А., Лебедев В.В. Технология объемной штамповки на автоматах / М.: Машиностроение. 1972. С. 423.

33. А.с. № 1806895 МКИ В 21 К 1/46. Способ безотходной штамповки головок болтов / Железков О.С.// Оpubл. 30.09.1993. Бюл. № 13.

34. А.с. № 373075 МКИ В21К 1/46. Способ изготовления деталей, имеющих многогранное сечение / Б. М. Ригмант, В. И. Куликов, В. И. Мокринский // Оpubл. 20.01.1973.

35. Ефремова Е.А. Безотходная технология получения шестигранных головок болтов // Кузнечно- штамповочное производство. 1992, №4. - С. 9-11.

36. Патент РФ на изобретение № 2191089 МКИ<sup>7</sup> В21К 1/46. Способ штамповки головок болтов / Лавриненко Ю.А., Гильманов Ф.С., Мусин Р.А./ Оpubл. 20.10.2002. Бюл. № 29.

37. А.с. № 878406 МКИ В21К 1/46. Способ изготовления многогранных изделий, преимущественно болтов / Пикулин В.А., Лернер П.С., Ригмант Б.М., и др. / Оpubл. 07.11.1981.

38. Патент РФ на изобретение № 2191089 МКИ<sup>7</sup> В21К 1/46. Способ штамповки головок болтов / Лавриненко Ю.А., Гильманов Ф.С., Мусин Р.А.// Оpubл. 20.10.2002. Бюл. № 29.

39. Патент РФ на изобретение № 2073581 МКИ В21К 1/46. Способ безоблойной высадки клеммных болтов для рельсовых креплений железнодорожных путей / Зяблинцев М.И., Лавриненко Ю.А., Гильманов Ф.С.// Оpubл. 08.10.1995. Бюл. № 19.

40. Патент РФ на изобретение № 2073582 МКИ В21К 1/46. Способ безоблойной высадки закладных болтов для рельсовых креплений железнодорожных путей / Зяблинцев М.И., Лавриненко Ю.А., Гильманов Ф.С. / Оpubл. 08.10.1995. Бюл. № 19.

41. А.с. СССР на изобретение № 1764757 МКИ В21К 1/46. Способ формирования многогранных головок болтов / Железков О.С., Артюхин В.И./ Оpubл. 30.09.1992. Бюл. № 36.

42. Патент РФ на изобретение № 2011462 МКИ<sup>7</sup> В21К 1/46. Способ штамповки болтов / Медников Ю.П., Дербуггов В.В., Калинин А.С. и др. Оpubл. 10.10.1993. Бюл. № 22.

43. А.с. № 1152702 МКИ В21К 1/46. Способ формирования головок болтов / Журавлев А.З. , Моренко Б.Н. , Ефремова Е.А. //Опубл. 30.04.1985.
44. Кошкин Л.Н. Комплексная автоматизация производства на базе роторных линий. - М.: Машиностроение, 1972. - С. 352.
45. Кошкин Л.Н. Роторные и роторно-конвейерные линии. - М.: Машиностроение, 1982. - С. 336.
46. Клусов И.А. Технологические системы роторных машин. - М.:Машиностроение, 1987. - С. 288.
47. Волков Н.В., Золотухин В.И. Автоматические роторные и роторно-конвейерные линии. - М.:ВНИИТЭМР, 1986. - С. 58.
48. Прейс В.В. Технологические роторные машины: вчера, сегодня, завтра. -М.: Машиностроение, 1986. - С. 128.
49. Клусов И.А. Проектирование роторных машин и линий.- М.: Машиностроение, 1990. - С. 320.
50. Железков О.С. Перспективы применения роторных и роторно-конвейерных линий при производстве крепежных изделий / Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2017, № 1. С. 27-31.
51. Бриджмен П. Исследование больших пластических деформаций и разрыва.- М: Машгиз. 1955. – 444 с..
52. Кроха В.А. Кривые упрочнения металлов при холодной деформации.- М.: Машиностроение. 1968. – 131 с.
53. Кроха В.А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации. Справочник.- М. :Машиностроение. 1980. – 157 с.
54. Давиденков Н.Н., Спиридонова Н.И. Анализ напряженного состояния в шейке растянутого образца. - Заводская лаборатория. 1945. № 6. Давиденков Н.Н., Спиридонова Н.И. Анализ напряженного состояния в шейке растянутого образца. - Заводская лаборатория. 1945, № 6. - С. 583-593.
55. Лихарев К.К. К практике построения диаграмм истинных напряжений. Заводская лаборатория. 1949. № 11.- С. 1343-1347.

56. Taylor G.Y., Quinney H. The Latent Energy Remaining in a Metal after Cold Working. «Proc.Roy. Soc.». 1934. Vol. 143, N A849. P. 303-326.

57. Аркулис Г.Э. Метод записи истинных кривых сопротивления металла сжатию / Заводская лаборатория. 1956, № 10. - С. 1217-1220.

58. Растегаев М.В. Новый метод равномерного осаживания образцов для определения истинного сопротивления деформации и коэффициента внешнего трения / Заводская лаборатория». 1940, № 3. - С. 354 - 357.

58. Суяров Д.И., Беняковский М.А., Скрябин Н.П. Определение сопротивления деформации металлов / Заводская лаборатория. 1955, № 1. -С.97-99.

59. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов / М.: Металлургия. 1973. – 224 с.

60. Смирнов-Аляев Г.А., Розенберг В.М. Теория пластических деформаций металлов / М.: Машгиз. 1956. - 368 с.

61. Смирнов-Аляев Г.А. Механические основы пластической обработки металлов / Л.: Машиностроение. 1968. - 266 с.

62. Грудев А.П., Зильберг Ю.В., Тилик В.Т. Трение и смазки при обработке металлов давлением. / М.: Металлургия. 1982. – 312 с.

63. Исаченков Е.И. Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением / М.: Машиностроение. 1978. – 208 с.

64. Леванов А.Н. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением. / А.Н. Леванов, В.Л. Колмогоров, Б.Р. Буркин, Ю.В. - М.: Металлургия, 1976. – 416 с.

65.Зильберг Ю.В. Закон и модели пластического трения / Изв. ВУЗов. Черная металлургия. 2000, № 11. - С. 22-24.

66. Хайкин Б.Е. Операционалистский подход к проблеме трения в условиях ОМД. / Изв. ВУЗов. Черная металлургия. 2000, № 11. - С. 26-27.

67. Леванов А.Н., Вичужанин Д.И. Статистический анализ точности и надежности расчета напряжений контактного трения при обработке давлением. / Кузнечно – штамповочное производство.1999, №10. - С.13-17.

68. К математическому моделированию трения при обработке металлов давлением / Б.А. Никифоров В.А., Г.А. Щеголев, В.Е. Савков и др. // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. 1985, № 10. - С.71-74. № 12. - С. 63-66.

69. Абрамов А.Н., Филиппова Н.А., Корытова О.С. Влияние адгезии на величину силы трения при холодной пластической деформации / Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2014, № 5. - С. 42 - 47.

70. Железков О.С., Абрамов А.Н., Галиахметов Т.Ш. Поиск эффективных смазочных материалов и подсмазочных покрытий для штамповки стержневых крепежных изделий из нержавеющей стали / Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2017, Т. 15. № 4. - С. 47-54.

71. Железков О.С., Галиахметов Т.Ш., Лизов С.Б. Испытания подсмазочных покрытий для штамповки болтов из нержавеющей стали / Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением : Международ. сб. науч. тр. Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И.Носова, 2017. - С.92-97.

72. Шолом В.Ю., Жернаков В.С., Абрамов А.Н. Методология исследований триботехнических характеристик и выбора смазочных материалов для процессов холодной обработки металлов давлением / Кузнечно – штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2016, № 4. - С. 10 -15.

73. Губарев А.П., Бутаков С.В., Мальцев Л.В. Холодная объемная штамповка изделий из коррозионностойких сталей / Машиностроитель. 1987, № 9. - С. 16-18.

74. Губарев А.П., Рытников С.К. Разработка технологических процессов производства крепежных изделий из труднодеформируемых материалов// Теория машин металлургического и горного оборудования.- Свердловск.:1984, № 8. - С.10-13.

75. Подготовка заготовки из коррозионностойкой стали к холодной высадке / А.П. Губарев, Л.В. Мальцев, С.В. Бутаков и др. // Теория машин металлургического и горного оборудования.- Свердловск. 1987, № 11. - С. 27-33.

76. Анцупов В.П. Теория и практика плакирования изделий гибким инструментом / Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 1999. – 241 с.

77. Петров М.А., Петров А.Н., Коротков И.А. Комплексное исследование реологических свойств смазочных материалов / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула. 2017, № 11-1. - С. 253-260.

78. Штейн Ф.С. Жидкие технологические смазки для холодной объемной штамповки и высадки на автоматах. / Ковка и штамповка: Справочник Пер. ред. Г.А. Навроцкого. // М.: Машиностроение, 1987. Т.3.

79. Нефтепродукты. Масла. Смазки. Присадки/ Государственные стандарты СССР. - М.: Изд. Ком. Стандартов, мер и измерит. приборов при СМ СССР, 1970. – 395 с.

80. Новые технологические смазочные материалы, применяемые при производстве крепежных деталей / Д.М. Закиров, Ю.А. Лавриненко, В.Ю. Шолом и др. // Машиностроитель. 1996. №11. С. 34-38.

81. Опыт внедрения новых смазочных материалов серии «Росойл » на Волжском автозаводе / С.Г. Титуренко, Л.Н. Черемухина, Г.В. Турова и др. // Машиностроитель. 1996, №11. - С.25-33.

82. Технологический смазочный материал «Росойл-555» для сложной и особо сложной вытяжки / А.Н. Абрамов, А.В.Майстренко, Ф.Н. Фазлиахметов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2008, №12. - С.24-27.

83. Разработка полифункционального технологического смазочного материала для холодной объемной штамповки / Н.В. Савельева, А.Н. Абрамов, С.А. Саранцева и др. // Кузнечно - штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2014, № 5. - С. 33 - 38.

84. Патент РФ № 2093547 РФ МКИ С 10 М 169/04, С10М169/04. Смазка для холодной обработки металлов «Росойл - ШОК» / В.Ю. Шолом, А.Г. Гилев, С.З. Хотько и др. Оpubл. 20.10.1997. Бюл. № 14.

85. Соловцов С.С. Резка сортового проката на заготовки в штампах и на сортовых ножницах / В кн. Совершенствование кузнечно-штамповочного производства. - Л.: Машиностроение. 1971. - С. 222-232.

86. Соловцов С.С. Факторы, влияющие на точность резки сортового проката в штампах / В кн. Повышение точности и автоматизацияковки и штамповки. - М.: Станкин. 1971. Вып. 9. - С. 3-16.

87. Влияние качества реза заготовок на точность холодновысаженных крепежных изделий / М.Г. Поляков, В.Г, Паршин, В.Я Герасимов и др. // - М.: Бюл. ин-та Черметинформация. 1974, № 3. - С. 49-50. ,

88. Устойчивость внецентренно сжатых заготовок круглого поперечного сечения / В.Я Герасимов, О.С. Железков, В.Г, Паршин и др. // Материалы IV конф. по математике и механике. – Томск, 1974. - С. 150-151.

89. Железков О.С., Галиахметов Т.Ш., Лизов С.Б. Оценка качества заготовок из нержавеющей стали, отрезанных на холодновысадочном автомате / Качество в обработке материалов : Сб. науч. тр. Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И.Носова. 2017, № 2. - С. 11-13.

90. Лагранж Ж.Л. Аналитическая механика. Т.1.- М.-Л.: ГТТИ, 1950.- 594 с.

91 . Stiffness and deflection analysis of complex structures / Turner L.J., Clough R.W., Martin H.C., Topp L.J. // J. Aeronaut Sci., 1956, v. 23, № 9, p. 805-824.

92. Zienkiewicz O.C. Numerical analysis of Forming Processes Swansa // J.Wiley and Sons. 1984. P. 1-44.

93. Kobayashi, S.; Oh, S.-I.; Altan T. Metal Forming and the Finite Element Method / 1st ed., vol. 1. (Series Eds.: Crookall, J.R., Shaw, M.C.) Oxford University Press, Oxford, 1989. - p. 377.

94. Lee, C.H., Kobayashi S. New solutions to rigid-plastic deformation problems using a matrix method // Journal of Engineering for Industry. -1973. №5. - p. 865-873.

95. Сегерлинд Л.Д. Применение метода конечных элементов.- М.: Мир, 1979. – 240 с.
96. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике - М.: Мир, 1975. - 541 с.
97. Морозов В.М., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения.- М.: Наука, 1980. – 256 с.
98. DEFORM-3D Version 6.0 User's Manual // [M].Columbia, Ohio: Scientific Forming Technologies Corporation, 2006.
99. Андреюк Л.В., Тюленев Г.Г. Об учете упрочнения стали при дробной деформации / Сталь. 1969, № 5. - С. 245-249.
100. Остапенко А.Л., Забира Л.А. Сопротивление деформации стали при прокатке и методика его расчета / Бюл. Ин-та «Черметинформация», 2009, №3. = С. 54-79.
101. Железков О.С., Кочуков С.В., Расчет сопротивления деформации при решении задач обработки давлением // Современные методы конструирования и технологии металлургического машиностроения / Сб. науч. тр. Под ред. Н.Н. Огаркова. - Магнитогорск: МГТУ, 2004. – С. 125–128.
102. Cockcroft M.G., Latham D.J. A Simple Criterion of Fracture for Ductile Metals // National Eng. Laboratory Report 240, July 1966, See also “Ductility and Workability of Metals”, Journal of the Institute of Metals. - V. 96. - 1968. - P. 33.
103. Власов А.В. О применении критерия Кокрофта-Лэтэма для прогнозирования разрушения при холодной объемной штамповке / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула. 2017. № 11-1. - С. 46-58.
104. К вопросу о моделировании напряженно-деформированного состояния при обработке материалов давлением / Е.Н. Сосенушкин, В.А. Кадмов, Е.А. Яновская и др. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула. 2017. № 11-1. - С. 142-147.
105. Рациональное использование ресурса пластичности при холодной штамповке листовых заготовок на основе критериев Кокрофта и Колмогорова / И.А. Бурлаков, Д.М. Забельян, А.К. Бондаренко и др. // Кузнечно-

штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2016, № 12. С. 6-10.

106. Лисецкий Л., Скубиш П. Оценка риска разрушения при штамповке по данным лабораторных испытаний и моделирования в программе QForm / Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2016. № 12. С. 8–12.

107. Колмогоров В.Л. Напряжение, деформации, разрушение / - М.: Металлургия. 1970. – 229 с.

108. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением / М.: Металлургия. 1984. – 144 с.

109. Скуднов В.А. Предельные пластические деформации металлов / М.: Металлургия. 1989. – 176 с.

110. Ильюшин А.А., Ленский В.С. Сопротивление материалов / -М.: Физматгиз. 1959. – 452 с.

111. Беляев Сопротивление материалов / -М.: Гостехиздат. 1958.- 856 с.

112. Ильюшин А.А. Пластичность / -М.: Гостехиздат. 1948. – 384 с.

113. Смирнов В.С. Теория обработки металлов давлением / - М.: Металлургия. 1973. – 496 с.

114. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением / - М.: Металлургия. 1978. – 360 с.

115. Патент РФ на изобретение № 2635495 МКИ<sup>7</sup> В21К 1/16. Способ изготовления стержневых изделий с шестигранной головкой / Железков О.С., Малаканов С.А., Галиахметов Т. Ш. Оpubл. 13.10.2017. Бюл. № 32.

116. Железков О.С., Галиахметов Т.Ш., Малаканов С.А. Экспериментальные исследования процесса формирования шестигранной головки болта из нержавеющей стали / Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2017, № 11.- С. 12–18.

117. Железков О.С., Галиахметов Т.Ш., Малаканов С.А. Исследование процесса формирования шестигранной головки болта из нержавеющей стали 12X18H10T / Сталь. 2017. - С. 47-49.

118. Железков О.С., Галиахметов Т.Ш., Малаканов С.А. Экспериментальные исследования процесса штамповки болтов с шестигранной головкой / Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: Международ. сб. науч. тр. под ред. О.Н. Тулупова. Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И.Носова, 2017. - С. 86-91.

119. Arnasky I.E., Bush T.E. Halfhot heading of stainless steels// SME Technical Papers. 1983. № 854, p. 9.

120. Железков О.С., Малаканов С.А., Галиахметов Т.Ш. Компьютерное и натурное моделирование процесса растяжения болта с торцевой лункой на головке / Вестник машиностроения. 2018. № 4. - С. 55-57.

121. Железков О.С., Малаканов С.А., Железков С.О. Поиск рационального формоизменения в многопереходных процессах пластической деформации на основе комплексного критериального подхода / Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2015, № 4.- С. 18-22.

122. Критериальный подход при проектировании технологических процессов производства крепежных изделий и пружинных клемм / С.А. Малаканов, О.С. Железков, Т.Ш. Галиахметов и др. // Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г. И. Носова. 2017. - 102 с.

123. Влияние торцевой лунки на прочность соединения головки со стержнем болта / О.С. Железков, О.П. Ширяев, Малаканов С.А. и др. // Качество в обработке материалов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г. И. Носова. 2015, № 2. - С. 48-50.

124. Крагельский И.В. Трение и износ. - М.: Машиностроение. 1968. – 480 с.

125. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безизносность) - М.: «Изд-во МСХА», 2001. – 616 с.

126. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М. Механическое изнашивание сталей и сплавов. – М.: Недра, 1996. – 364 с.

127. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. - М.: Наука, 1970. - 251 с.
128. Железков О.С., Галиахметов Т.Ш., Лизов С.Б. Моделирование процесса формирования шестигранной головки болта из нержавеющей стали обрезкой / Известия Тульского государственного университета. 2017, Вып.12, ч.2. - С. 254-262.
129. Zhelezkov O.S., Galiakhmetov T.Sh., Malakanov S.A. Shaping the Hexa-hedral Head of 12Kh18N10T Stainless Steel Bolt / STEEL IN TRANSLATION. Vol. 47. 2017. No. 12. P. 824-826.
130. Белан А.К., Малышева М.С., Белан О.А. Совершенствование процесса поперечного выдавливания на основе математического моделирования / Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2008, № 8. - С. 19-25.
131. Картунов А.Д., Белан О.А., Белан А.К. Разработка технологии и моделирование процесса холодной объемной штамповки винтов с цилиндрической головкой и шестигранным углублением под ключ / Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2017. № 3. - С. 17-19.
132. Миркин, Б.Г. Проблемы группового выбора. - М.: Наука, 1974. – 256 с.
133. Методика выбора рациональной технологической схемы производства профилей калиброванного металла / Г.С. Гун, Г.Ш. Рубин, И.Н. Киреев и др. // Бюллетень НТИ. Черная металлургия, 1980, вып. 1 /861/. - С. 40-41.
134. Гун, Г.С. Метод комплексной оценки качества металлопродукции // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 1982, № 8. - С. 62-66.
135. Патент РФ на полезную модель № 178623 МКИ<sup>7</sup> В21К 1/50. Инструмент для обрезки шестигранных головок стержневых изделий / Железков О.С., Галиахметов Т. Ш., Лизов С.Б. Опубл. 13.04.2018. Бюл. № 11.

**ПРИЛОЖЕНИЕ**

**РАСЧЕТ**

экономического эффекта  
от освоения производства винтов М6 (ОСТ 1 31501-80)  
из стали марки 12Х18Н10Т

№ п/п	Статья	руб./1000 шт.
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
1	Чистый вес, кг	5,7
2	Норма, кг	6,7
3	<b>Цена металла, руб./тонна</b>	<b>269778,0</b>
4	Стоимость металла	<b>1816,4</b>
5	Возвратные отходы (вычитаются)	<b>9,0</b>
6	<b>Итого основных материалов:</b>	<b>1807,4</b>
7	Зар плата производственных рабочих	<b>26,0</b>
8	Отчисления на соц. нужды	<b>8,1</b>
9	Вспомогательные материалы	<b>16,5</b>
10	ТЗР на вспомогательные материалы	<b>1,1</b>
11	Топливо и энергия на технологию	<b>116,6</b>
12	Расходы на специнструмент	<b>194,0</b>
13	<b>Итого переменные затраты</b>	<b>2169,7</b>
14	Общепроизводственные расходы	<b>517,9</b>
15	Управленческие	45,16
16	<b>Итого цеховая себестоимость</b>	<b>2732,8</b>
17	Операционные расходы	229,56
18	Коммерческие расходы	57,39
19	<b>Полная себестоимость</b>	<b>3 020</b>
20	<b>Цена реализации</b>	<b>4 650</b>
21	<b>Рентабельность, %</b>	<b>54,0</b>

Так как винты М6 (ОСТ 1 31501-80) из стали марки 12Х18Н10Т являются новым для АО «БелЗАН» видом продукции, то удельный экономический эффект определялся как разница между ценой реализации и полной себестоимостью

$$ЭУ = СС - Ц = 4650 - 3020 = 1630 \text{ руб./1000 шт.}$$

Годовой экономический эффект – 6,20 миллиона рублей.

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор  
АО «Белебеевский завод «Автонормаль»

В.И. Долгов

2018 г.

А К Т

Настоящий акт составлен о том, каким образом используются результаты диссертационной работы Т.Ш. Галиахметова в условиях АО «Белебеевский завод «Автонормаль».

Под руководством Галиахметова Т.Ш. и при его непосредственном участии проведены исследования и разработаны технологические процессы изготовления болтов и винтов с шестигранными головками из нержавеющей стали. В работе выполнен поиск эффективных подмазочных покрытий и смазочных материалов для штамповки крепежных изделий из стали марки 12Х18Н10Т. По результатам натурального и компьютерного моделирования установлены рациональные схемы и режимы деформирования при формировании шестигранных головок болтов. Усовершенствована методика поиска рационального формоизменения в многопереходных процессах штамповки изделий сложной формы на основе комплексного критериального подхода применительно к технологии изготовления болтов и винтов из нержавеющей стали. Разработаны новые технические решения в виде патентов на изобретения, применение которых обеспечивает получение качественных изделий и снижение затрат на производство.

Результаты диссертационной работы были использованы при освоении технологии изготовления винтов М6 с длиной стержня 12÷20 мм (ОСТ 1 31501-80) с шестигранной головкой из стали марки 12Х18Н10Т. Экономический эффект от производства составляет 1630 руб./1000 шт. (286 руб./кг.), в годовом выражении – 6,2 млн. руб.

В дальнейшем, по программе импортозамещения предполагается расширение номенклатуры и объемов производства крепежных изделий из коррозионностойких сталей.

Директор по основному производству

В.А. Зернаев

Главный конструктор, к.т.н.

В.В. Фадеев