

На правах рукописи



**Филиппова Марина Владимировна**

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ  
ПОЛУГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ ТОЧНЫХ  
ПО МАССЕ ПОКОВОК ИЗ ШАРОВОЙ ЗАГОТОВКИ**

Специальность 2.6.4 – Обработка металлов давлением

Диссертация на соискание ученой степени

доктора технических наук

Новокузнецк, 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>   | <b>6</b>  |
| <b>1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ<br/>ИССЛЕДОВАНИЯ.....</b>   | <b>19</b> |
| 1.1 Концепция комплексной технологии горячей штамповки.....  | 20        |
| 1.2 Разделительные операции комплексной технологии горячей штамповки .....   | 25        |
| 1.2.1 Разделение металла на заготовки в штампах .....  | 25        |
| 1.2.2 Разделение металла на заготовки в станах поперечно-винтовой прокатки   | 31        |
| 1.3 Нагрев металла в комплексной технологии горячей штамповки .....  | 35        |
| 1.4 Безоблойная штамповка в комплексной технологии горячей штамповки .....   | 49        |
| 1.5 Компьютерное моделирование в комплексной технологии горячей штамповки  | 61        |
| 1.5.1 Основные понятия метода конечных элементов .....   | 61        |
| 1.5.2 Применение метода конечных элементов .....   | 63        |
| Выводы по главе 1 .....  | 66        |
| <b>2 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ КОМПЛЕКСНОЙ<br/>ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ.....</b>                                 | <b>71</b> |
| 2.1 Напряженно-деформированное состояние металла при разделении на шаровые<br>заготовки на станах поперечно-винтовой прокатки..... | 74        |
| 2.2 Температурные режимы нагрева металла под объемную штамповку .....  | 85        |
| 2.2.1 Влияние температуры на свойства сталей и процессы окисления при<br>объемной штамповке .....                                  | 85        |
| 2.2.2 Определение оптимальной температуры нагрева металла перед штамповкой<br>на основе обобщенной функции желательности .....     | 90        |
| 2.3 Напряженно-деформированное состояние металла при полугорячей<br>безоблойной штамповке .....                                    | 93        |

|  |     |
|--|-----|
| 2.3.1 Полугорячая безоблойная штамповка поковок круглых в плане из шаровой заготовки ..... | 95  |
| 2.3.2 Безоблойная штамповка поковок круглых в плане из цилиндрической заготовки .....      | 107 |
| 2.4 Определение предельной пластичности металла при штамповке .....                        | 112 |
| 2.5 Напряженно-деформированное состояния металла при прямом выдавливании .....             | 117 |
| Выводы по главе 2 .....  | 124 |

### **3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУГОРЯЧЕЙ БЕЗОБЛОЙНОЙ ШТАМПОВКИ .....**

|  |     |
|--|-----|
| 3.1 Экспериментальное исследование разделения металла на шаровые заготовки на стане поперечно-винтовой прокатки .....  | 126 |
| 3.1.1 Исходные данные .....  | 129 |
| 3.1.2 Калибровка валков стана поперечно-винтовой прокатки .....  | 129 |
| 3.1.3 Производственные исследования прокатки шаровых заготовок диаметром 90 мм .....   | 137 |
| 3.2 Экспериментальные исследования влияния температуры на сопротивление металла пластической деформации, пластические свойства и окисление при нагреве до температур полугорячей штамповки ..... | 142 |
| 3.2.1 Сопротивление металла деформации .....   | 145 |
| 3.2.2 Пластичность металла .....   | 147 |
| 3.2.3 Окисление стали при нагреве .....  | 153 |
| 3.3 Экспериментальные исследования штамповки поковок круглых в плане .....   | 156 |
| 3.3.1 Методика исследования .....  | 156 |
| 3.3.2 Результаты и проверка адекватности моделирования .....   | 159 |
| 3.4 Экспериментальное исследование прямого выдавливания в закрытом штампе .....  | 164 |

|  |            |
|--|------------|
| Выводы по главе 3.....   | 171        |
| <b>4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ КОМПЛЕКСНОЙ<br/>ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ.....</b>                            | <b>173</b> |
| 4.1 Прокатка шаровых заготовок большого диаметра .....   | 173        |
| 4.1.1 Оборудование и технология прокатки шаров.....  | 173        |
| 4.1.2 Новая калибровка валков для прокатки шаровых заготовок диаметром<br>120 мм.....                                | 176        |
| 4.1.3 Исследования качества прокатанных шаровых заготовок .....  | 179        |
| 4.2 Совершенствование режимов нагрева заготовок для полугорячей штамповки.....                                       | 189        |
| 4.2.1 Определение оптимальных температур нагрева заготовок.....  | 189        |
| 4.3 Оптимальные размеры заготовки для штамповки шара 120 мм .....  | 197        |
| Выводы по главе 4.....   | 202        |
| <b>5 ВНЕДРЕНИЕ ЭНЕРГО- И РЕСУРСΟΣБЕРЕГАЮЩЕЙ КОМПЛЕКСНОЙ<br/>ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУГОРЯЧЕЙ БЕЗОБЛОЙНОЙ ШТАМПОВКИ.....</b>    | <b>203</b> |
| 5.1 Применение комплексной технологии полугорячей безоблойной штамповки<br>для производства шестерни 12.37.118 ..... | 204        |
| 5.2 Применение комплексной технологии полугорячей безоблойной штамповки<br>для производства шайбы упорной.....       | 212        |
| 5.3 Применение комплексной технологии полугорячей безоблойной штамповки<br>для производства фланца.....              | 217        |
| 5.4 Разработка технологического процесса полугорячего выдавливания поковки<br>«корпус распылителя» .....             | 221        |
| Выводы по главе 5.....   | 227        |
| <b>ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ .....</b>  | <b>228</b> |
| <b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>   | <b>233</b> |
| <b>Приложение А .....</b>  | <b>274</b> |

|                           |            |
|---------------------------|------------|
| <b>Приложение Б .....</b> | <b>280</b> |
| <b>Приложение В .....</b> | <b>281</b> |
| <b>Приложение Г .....</b> | <b>287</b> |
| <b>Приложение Д .....</b> | <b>288</b> |
| <b>Приложение Е .....</b> | <b>293</b> |
| <b>Приложение Ж .....</b> | <b>294</b> |
| <b>Приложение З .....</b> | <b>296</b> |
| <b>Приложение И .....</b> | <b>297</b> |

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Машины, механизмы и их детали при эксплуатации испытывают большие статические и динамические нагрузки, поэтому к ним предъявляются высокие требования по прочности и надежности. При современном уровне машиностроительных технологий изготовление таких изделий возможно только ковкой или штамповкой. Штамповка, по сравнению с ковкой, обеспечивает идентичность получаемых поковок, уменьшает их массу и характеризуется более высокой производительностью. Однако анализ различных способов металлообработки показывает, что в современном машиностроении преобладают самые трудоемкие, энергозатратные и материалоемкие способы получения готовых изделий путем облойной штамповки или обработки на металлорежущих станках.

Облойная штамповка производится, как правило, за несколько переходов, и при обрезке облоя (заусенца) теряется до 25 % металла, который идет в отходы. Основной составляющей себестоимости штампованных поковок является стоимость металла, достигающая 65–70 % от общей стоимости поковки. При дальнейшей обработке поковок и отливок на металлорежущих станках и получении готовых изделий потери металла в стружку составляют более 8 млн т в год. Практика обработки изделий на металлорежущих станках показывает, что для снятия одной тонны стружки требуется не менее 100 станко-часов. В связи с этим для сокращения потери металла необходимо совершенствовать существующие, разрабатывать и внедрять новые энерго- и ресурсосберегающие технологии для получения обработкой металлов давлением поковок, форма и размеры которых приближаются к форме и размерам готовой детали, основанные на безоблойной штамповке.

Существующие технологии штамповочного производства позволяют получать точные поковки без облоя с минимальными припусками на дальнейшую механическую обработку. Однако широкое внедрение технологии безоблойной

штамповки сдерживается отсутствием способов получения точной мерной заготовки. Это объясняется наличием больших допусков до 5 % по диаметру горячекатаного металла и техническими сложностями в обеспечении точного дозирования длины и ровности торцов, отрезаемых от прутка на прессе заготовок. Существенную роль в разработке металлосберегающих технологий безоблойной штамповки играют теплотехнологии, обеспечивающие формирование необходимых пластических свойств металла, определяющие энергозатратность процесса деформации и качество поверхности готовых поковок. В настоящее время до 90 % стальных поковок производится посредством горячей объемной штамповки, сопровождающейся высокими потерями металла от угара, снижением качества поверхности вследствие окалинообразования и обезуглероживания стали.

Получение стальных изделий с заданными свойствами с помощью прогрессивных способов полугорячей (750–850 °С) штамповки представляет собой комплекс малоотходных технологий или комплексную технологию и сопряжено с решением ряда научно-технологических задач. Основными операциями этой комплексной технологии являются: разделение металла на заготовки для безоблойной штамповки; нагрев заготовок до рациональной температуры; безоблойная штамповка.

Таким образом, разработка комплексной технологий полугорячей безоблойной штамповки с учетом новейших достижений теории и технологии обработки металлов давлением является актуальной научно-практической задачей.

Диссертация выполнена в рамках:

– Государственной программы «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности», подпрограмма 10 «Металлургия», утвержденная постановлением Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. №328;

– Приоритетных направлений развития науки, технологий и техники Российской Федерации от 2011 г. «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика»;

– гранта ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» («Разработка энергосберегающей технологии производства шаров большого диаметра») от 25.03.2014, № 1Д–14.

**Степень разработанности темы.** Рассматривать технологию получения готовых изделий методом штамповки как комплекс, состоящий из отдельных взаимосвязанных между собой технологических операций, предложил А. М. Мансуров. Однако в настоящее время комплексный подход при разработке новых технологий штамповки отсутствует, и все входящие в него операции рассматриваются отдельно.

Вопросами разделения металла на мерные заготовки методом резки металла в штампах или с применением пресс-ножниц занимались российские ученые В. Т. Мещерин, С. С. Соловцев, В. Т. Синицин, П. Е. Кислый и др. К недостаткам резки металла ножницами можно отнести погрешности размеров и массы полученных заготовок от номинала, которые составляют 7–12 %, а также значительные отклонения от исходной цилиндрической формы.

Значительно более эффективно можно получать мерные по объему заготовки при использовании станов поперечно-винтовой прокатки. Прокатанная шаровая заготовка имеет высокую точность по массе, хорошее качество поверхности и высокие механические свойства. Наибольший вклад в развитие технологии прокатки в винтовых калибрах внесли работы А. И. Целикова, Е. С. Рокотяна, С. П. Грановского, Э. Р. Шора, В. И. Котенка и др. Имеются одиночные примеры использования шаровой заготовки в штамповочном производстве, однако способы получения точных шаровых заготовок в настоящее время отсутствуют.

Перспективным направлением является снижение температуры нагрева заготовки, что позволяет значительно сократить потери металла от угара, расход топлива и электроэнергии при нагреве ТВЧ, исключить обезуглероживание и повысить качество поковки. Вопросы полугорячей штамповки посвящены труды Е. Н. Ланского, Л. Г. Овчинникова, В. А. Головина, О. Г. Прудко и др. Однако в настоящее время научно обоснованная методика выбора рациональной температуры нагрева металла для полугорячей штамповки отсутствует.

Исследованию процессов безоблойной штамповки были посвящены работы авторов О. А. Ганаго и И. Я. Тарновского, С. А. Араповича, А. З. Журавлева, М. З. Альтмана, И. А. Норицина, И. Л. Акаро, В. Т. Мещерина, М. С. Эдуардова и др.

Штамповкой в закрытых штампах получают менее 10 % поковок. Это связано со сложностью получения точных по массе исходных заготовок. Использование точной шаровой заготовки позволит снизить силу штамповки, уменьшить количество штамповых переходов и получить готовую поковку с минимальными припусками на механическую обработку.

Таким образом, анализ работ в области технологий горячей штамповки показывает, что наибольший положительный эффект энерго- и ресурсосбережения может быть получен только в том случае, если учитываются все операции комплексной технологии и их взаимосвязь. Такие разработки в настоящее время отсутствуют.

**Цель работы.** Повышение эффективности производства поковок точных по массе, разработка процессов полугорячей безоблойной штамповки и создание комплексной ресурсосберегающей технологии производства стальных изделий ответственного назначения.

#### **Задачи работы.**

1. Повысить эффективность процессов получения точных по массе и размерам заготовок для безоблойной штамповки посредством разделения прутков на станах поперечно-винтовой прокатки и снижения температур нагрева металла:

– разработать новую методику расчета калибровки валков стана поперечно-винтовой прокатки с целью получения шаровых заготовок для полугорячей безоблойной штамповки стальных поковок;

– разработать новую калибровку валков шаропрокатного стана для производства шаровых заготовок повышенной точности по массе;

– с использованием детерминированных математических моделей исследовать напряженно-деформированное состояние металла в процессах

прокатки шаровых заготовок на станах поперечно-винтовой прокатки, полугорячей штамповки и штамповки выдавливанием в закрытых штампах.

2. Исследовать пластичность, сопротивление деформации, угар сталей ст3сп, 20, 20ХН, 40, 40Х, 40ХН, 65Г, 35ХГСА, 18ХГТ, 18Х2Н4МА и научно обосновать рациональный интервал температур полугорячей штамповки.

3. Установить и научно обосновать зависимости и закономерности влияния формы, температуры нагрева заготовок, пластических и прочностных свойств металла на энергосиловые параметры процессов деформации, напряженно-деформированное состояние металла и вероятность дефектообразования.

4. Освоить в условиях стана поперечно-винтовой прокатки 40-80 новую калибровку и производство высокоточных шаровых заготовок диаметром до 120 мм с повышенным качеством поверхности и однородностью макроструктуры.

5. Разработать и внедрить в производство энерго- и ресурсосберегающую комплексную технологию полугорячей штамповки в закрытых штампах из шаровой заготовки круглых в плане поковок точных по массе симметричных и несимметричных (относительно горизонтальной оси), типа «шестерни» и поковок, изготавливаемых прямым выдавливанием из цилиндрической заготовки, типа «корпуса форсунки».

### **Научная новизна.**

1. Разработана комплексная ресурсосберегающая технология полугорячей безоблойной штамповки круглых в плане стальных поковок из шаровых заготовок, которая включает в себя:

– процесс получения заготовок под безоблойную штамповку посредством разделения металла на станах поперечно-винтовой прокатки с применением нового метода расчета калибровки валков, позволяющего обеспечить получение точных по массе шаровых заготовок, в осевой зоне которых отсутствует разрыхление;

– нагрев шаровой заготовки до рациональных температурных интервалов полугорячей штамповки, полученных на основе применения обобщенной функции желательности для исследуемых марок стали по параметрам: сопротивление

металла деформации, пластические свойства металла и величина поверхностного угара;

– процесс штамповки осесимметричных поковок из шаровой исходной заготовки, в условиях снижения температуры нагрева и применения закрытых штампов, обеспечивающих снижение количества переходов штамповки, уменьшение неравномерности напряженно-деформированного состояния металла с учетом ресурса пластичности и силы штамповки;

– процесс прямого выдавливания в закрытом штампе, обеспечивающий получение требуемой геометрии детали на основе результатов исследования влияния размера заготовки, угла наклона матрицы и коэффициента трения на удельную силу выдавливания с учетом заполнения различных по форме торцевых частей штамповки.

2. Экспериментально доказано, что применение шаровых заготовок для штамповки круглых изделий, в отличие от традиционных цилиндрических заготовок, полученных из прутков, позволяет значительно повысить точность исходных заготовок для штамповки, что в свою очередь позволяет перейти от облойной к более эффективной безоблойной штамповке. Разработанный подход имеет преимущества, которые заключаются в том, что исходная заготовка, имеющая отклонение по массе до 8 %, получаемая на станах поперечно-винтовой прокатки, применяется для штамповки круглых в плане изделий, позволяет перейти с облойной штамповки к безоблойной, что уменьшает потери металла в облой на 20–22 % и минимизирует последующую механическую обработку изделия.

3. Показано, что точность шаровых заготовок по массе и объему, получаемых поперечно-винтовой прокаткой, определяется исключением переполнения калибра и отрыва шара от штанг, что было достигнуто за счет применения разработанного условия равенства элементов калибровки валков – ширины реборды и длины перемычки. Выявленное условие позволило усовершенствовать калибровку винтовой прокатки шаровых заготовок и

обеспечить точность по массе исходной шаровой заготовки до 8 % отклонения от заданной массы.

4. Изучено течение металла при поперечно-винтовой прокатке шаровых заготовок повышенной точности по массе. Установлено влияние разработанной калибровки на распределение напряжений, деформаций, среднего нормального напряжения по объему шаровых заготовок и в перемычках. Показано, что применение нового типа калибровки поперечно-винтовой прокатки шаровых заготовок позволяет на 2-х валковой шаропркатном стане обеспечить схему всестороннего сжатия на всем этапе пластической деформации и исключить риск разрыхления внутри шаровой заготовки.

5. Изучено течение металла при безоблойной штамповке осесимметричных типовых изделий из шаровой заготовки. Показано, что применение предложенной шаровой формы исходной заготовки, по сравнению с цилиндрической, обеспечило уменьшение неравномерности напряженно-деформированного состояния металла на 15–29 % (изменение средней величины интенсивности напряжений и интенсивности деформаций), уменьшение силы штамповки на 20–30 %, при этом использование ресурса пластичности металла составило менее 25 % и в целом позволило уменьшить энергоемкость штамповки на 10–30 %.

6. Для многокритериальной оптимизации температурных режимов полугорячей штамповки адаптирована и применена обобщенная функция желательности. На основе ее использования установлены рациональные температурные интервалы нагрева исследуемых марок сталей, обеспечивающие получение поковок с заданными характеристиками качества. Исследованы сопротивление металла деформации, пластические свойства и величина поверхностного угара стали марок: ст3сп, 20, 20ХН, 40, 40Х, 40ХН, 65Г, 35ХГСА, 18ХГТ, 18Х2Н4МА в интервале температур полугорячей штамповки. Получены уравнения регрессии сопротивления металла деформации, пластических свойств металла и поверхностного угара при нагреве. Показано, что при нагреве металла от 600 °С до 1000 °С, в зависимости от марки стали, сопротивление деформации снижается от 2 до 3,5 раза, пластичность увеличивается от 2,4 до 8 раза, величина

поверхностного угар возрастает в 7–15 раз. По полученным данным установлены рациональные температурные интервалы нагрева для полугорячей штамповки, которые, в зависимости от марки стали, находятся в интервале 750–870 °С.

7. Получена и исследована зависимость относительной удельной силы выдавливания от коэффициента вытяжки, угла наклона матрицы, коэффициента трения при полугорячей штамповке прецизионной поковки детали «корпус распылителя» прямым выдавливанием в закрытом штампе. Установлено, что с увеличением коэффициента вытяжки от 2 до 4 относительная удельная сила увеличивается в 1,8–1,9 раза, при изменении угла наклона матрицы от 60° до 90° относительная удельная сила возрастает на 4–6 %, а при увеличении коэффициента трения от 0,1 до 0,3 возрастает величина относительной удельной силы в 1,33 раза. Полученные результаты исследования позволили получить рациональную форму торцевой части поковки, при этом сила выдавливания уменьшилась в 3 раза, а коэффициент формы торцевой части поковки снизился с 3,14 (цилиндрическая форма торцевой части) до 2,8 (специальная форма торцевой части поковки).

**Теоретическая и практическая значимость работы.** На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований получены следующие значимые результаты работы:

1. Разработана виртуальная модель шаропрокатного стана и проведено компьютерное моделирование, по результатам которого получены новые данные по заполнению калибров металлом; динамики изменения напряженно-деформированного состояния и силовым условиям при прокатке шаровых заготовок большого диаметра.

2. Разработаны фундаментальные основы ресурсосберегающей технологии нагрева металла под обработку давлением и расчет рациональной температуры нагрева заготовок.

3. Разработана виртуальная модель и проведено компьютерное моделирование полугорячей штамповки в закрытых штампах из шаровой заготовки круглых в плане поковок точных по массе, исследована динамика изменения напряженно-деформированного состояния металла и силовые условия штамповки.

4. Получены новые результаты исследования динамики заполнения металлом полости штампов; компьютерное моделирование технологического процесса полугорячего выдавливания поковок типа «корпус форсунки» из точной цилиндрической заготовки; исследование изменения напряженно-деформированного состояния металла при выдавливании корпуса форсунки из точной цилиндрической заготовки.

5. Разработана новая методика расчета калибровки валков стана поперечно-винтовой прокатки для производства геометрически точных шаровых заготовок с отклонением по массе не более 8 %.

6. Разработана новая калибровка валков стана поперечно-винтовой прокатки, изготовлены калиброванные валки для прокатки шаровых заготовок диаметром 60; 80; 90; 120 мм, технология внедрена в производство. Получены результаты исследования качества прокатанных шаров.

7. Разработана и внедрена в производство технология разделения металла на точные шаровые заготовки большого диаметра 90–120 мм на станах поперечно-винтовой прокатки 40–80. Результаты исследования полученных заготовок показали отсутствие пористости в центральных слоях шара.

8. Разработаны и рекомендованы к внедрению новые данные температурных интервалов для полугорячей штамповки сталей ст3сп, 20, 20ХН, 40, 40Х, 40ХН, 65Г, 35ХГСА, 18ХГТ, 18Х2Н4МА.

9. Разработаны ресурсосберегающие режимы нагрева шаровых заготовок для полугорячей штамповки, обеспечивающие заданное качество металлопродукции.

10. Установлено, что предложенная комплексная технология полугорячей безоблойной штамповки, состоящая из разделения заготовок на станах поперечно-винтовой прокатки, нагрева до температуры полугорячей штамповки и полугорячей штамповки из шаровой заготовки в закрытых штампах, позволяет получать поковки высокого качества с заданными размерами.

11. Разработана и внедрена технология прецизионной полугорячей штамповки поковок круглых в плане из шаровой заготовки с исследованием

динамики заполнения металлом полости штампа. Получены новые результаты исследования изменения силовых параметров и напряженно-деформированного состояния металла при штамповке из шаровой заготовки.

12. Разработан и внедрен технологический процесс полугорячего выдавливания поковок типа «корпус форсунки» для дизельных двигателей из точной цилиндрической заготовки.

**Методология и методы исследований.** Для решения поставленных задач использовали: моделирование процессов прокатки и штамповки с применением МКЭ в программах DEFORM-3D и QForm, при этом построение виртуальных объектов моделирования производилось в САД системах КОМПАС-3D и AutoCAD.

Методы физического моделирования: метод определения деформированного состояния в пластической области измерением твердости, метод координатных сеток, тензометрирования, методика постадийного деформирования металла, метод оценки твердости. Методы математической теории планирования эксперимента и математической статистики.

Пластичность и сопротивление металла деформации исследовали методом испытания на высокотемпературное кручение. Угар стали исследовали гравиметрическим методом по потере полезной массы образцов.

Результаты исследований обрабатывали с применением пакетов программ PTC Mathcad, MS Excel.

### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Научные основы разработки комплексной технологии полугорячей безоблойной штамповки: разделение металла на заготовки; нагрев металла под штамповку; способы штамповки круглых в плане поковок точных по массе.

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований получения шаровой заготовки на стане поперечно-винтовой прокатки: калибровка прокатных валков, математические модели напряженно-деформированного состояния металла при прокатке, качество шаровой заготовки.

3. Методики расчета рациональной температуры нагрева до температур полугорячей штамповки.

4. Разработанные виртуальные объекты для компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния металла при полугорячей штамповке в закрытых штампах, неравномерности деформации при штамповке, силовых условий штамповки из цилиндрической и шаровой заготовок.

5. Результаты экспериментальных исследований шаропрокатного стана и качества шаровой заготовки; комплексных исследований сопротивления деформации, пластичности и угара некоторых марок стали в интервале температур полугорячей штамповки; штамповки поковок из шаровой заготовки с целью определения энергоэффективных режимов деформирования; проверка адекватности компьютерного моделирования при штамповке поковок из шаровой заготовки.

6. Новые технические и технологические решения, расширяющие возможности использования комплексной технологии полугорячей безоблойной штамповки, повышающие конкурентоспособность изучаемых процессов.

#### **Степень достоверности полученных результатов.**

Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций подтверждается использованием в работе известных положений классических и прикладных наук, таких как физика, математика, теория пластичности, теория обработки металлов давлением. Применением численного метода конечных элементов, реализованного в виде пакетов прикладных программ DEFORM-3D и QForm; большим объемом экспериментального материала, полученного в лабораторных и промышленных условиях с применением современных методик; применением современных методов статистической обработки результатов; сопоставлением полученных результатов с данными других исследователей; эффективностью предложенных технических и технологических решений, подтвержденных результатами промышленных испытаний и внедрением в производство.

**Апробация результатов.** Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: Всероссийской научно-практической конференции «Металлургия: технологии, управление инновации, качество» (г. Новокузнецк, 2006, 2007, 2008, 2010, 2013); Всероссийской научно-практической конференции «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве» (г. Новокузнецк, 2007); Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения» (г. Новокузнецк, 2007, 2008, 2009, 2010, 2014, 2016); Международной конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (г. Санкт-Петербург, 2009); Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (г. Москва, 2009); Инновационном конвенте «Кузбасс: образование, наука, инновации» (г. Кемерово, 2014, 2016, 2018, 2019); Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штамповочного производств» (г. Барнаул, 2015); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах» (Новокузнецк, 2016).

**Личный вклад автора** состоит в постановке задач исследования, выборе методов исследований, в проведении моделирования методом конечных элементов, в организации, руководстве и непосредственном участии в натурных исследованиях с последующей обработкой полученных результатов, проведении анализа и определении математических зависимостей с научным обоснованием найденных закономерностей, а также разработке новых методов, способов, математических моделей, новых положений, изложенных в диссертации. В разработке новой комплексной технологии полугорячей штамповки в закрытых штампах, а также внедрении результатов диссертационного исследования в производственный процесс.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Диссертация по своей тематике, целям, задачам, научной новизне, теоретической и практической значимости, методологии и методам исследования, положениям, выносимым на защиту, соответствует паспорту специальности 2.6.4 – Обработка металлов давлением по следующим пунктам:

п. 1. «Исследование и расчет деформационных, скоростных, силовых, температурных и других параметров разнообразных процессов обработки давлением металлов, сплавов и композитов»;

п. 2. «Исследование способов, процессов и технологий обработки давлением металлов, сплавов и композитов с помощью методов физического и математического моделирования»;

п. 4. «Оптимизация способов, процессов и технологий обработки металлов давлением для производства металлопродукции с целью повышения характеристик качества продукции»;

п. 6. «Разработка способов, процессов и технологий обработки металлов давлением, обеспечивающих экологическую безопасность, экономию материальных и энергетических ресурсов, повышающих качество и расширяющих сортамент изделий».

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 60 печатных работ, в том числе 2 монографии, 58 статей в журналах и сборниках статей, 19 из которых опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК для опубликования результатов докторских диссертаций, 5 – в иностранных журналах, индексируемых в базе данных Scopus и Web of Science.

**Структура и объем работы.**

Диссертация изложена на 298 страницах машинописного текста, состоит из введения, пяти глав, выводов, приложений, содержит 27 таблиц, 104 рисунка и список литературы из 350 наименований.

# 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Современная технологияковки и штамповки непрерывно совершенствуется и развивается. При этом существенную роль играют новые методики, которые появились в 70-х – 80-х годах прошлого века и активно использовались в 90-е. Самая распространенная методика разработки технологического процессаковки и штамповки заключается в математическом моделировании технологического процесса с применением ЭВМ, которая позволяет радикально расширить возможности математического моделирования. Широкое распространение персональных компьютеров явилось мощным толчком для развития теории обработки металлов давлением и разработки специализированных математических моделей для решения конкретных технологических задач [1; 2].

В настоящее время в условиях подъема производства, повышения требований к качеству, себестоимости и конкурентоспособности поковок перед учеными и технологами возникает целый ряд новых задач по разработке научно обоснованных энерго- и ресурсосберегающих технологий обработки металлов давлением. Это направление активно пропагандируется в работах научных школ и головными проектными организациями. Появление таких публикаций не случайно. Если в период 60-х – 80-х гг. прошлого столетия при разработке технологийковки и штамповки основным вопросом являлась производительность, то в настоящее время на производстве преобладает фактор экономичности, затратности передела. Изменившиеся экономические условия заставляют взглянуть на технологический процесс пластической деформации металла с учетом комплексного подхода, включая достижения в области металловедения, нагрева металла и напряженно-деформированного состояния поковки. В современных экономических условиях рационализация и оптимизация

технологических процессовковки и штамповки является весьма существенным фактором в осуществлении энерго- и ресурсосбережения.

### **1.1 Концепция комплексной технологии горячей штамповки**

Понятие технология горячей штамповки получила распространение в 40-е – 60-е гг. прошлого века благодаря работам российских ученых [3–12] и др. Слово технология произошло от греческого слова *techne* – искусство, мастерство, умение и *logos* – слово, учение. Таким образом, технология горячей штамповки означает искусство получения готового изделия хорошего качества путем нагрева металла и его обработки давлением.

Существенный прогресс в области теории обработки металлов давлением, развитии вычислительной техники и математического моделирования привели к тому, что исследования тепловых и технологических процессов при производстве проката и поковок стали рассматривать в комплексе. Такой комплексный подход находит применение в работах Г. Г. Немзера, В. Г. Лисиенко, Ю. А. Самойловича, В. И. Тимошпольского [13–19], которые широко оперируют такими понятиями, как теплотехнология.

А. М. Мансуров отмечает, что современная технология горячей штамповки представляет собой сложный комплекс различных по своему характеру операций [20].

Основными операциями современной комплексной технологии горячей штамповки являются:

– разделение металла на заготовки (резка металла в штампах, резка пилами, точная резка в специальных штампах, разделение прутка на станах поперечно-винтовой прокатки, газовая резка, резка абразивными кругами и др.);

- нагрев металла под штамповку (скорость нагрева, температура нагрева, перепад температуры по сечению заготовки, угар металла при нагреве, обезуглероживание поверхности заготовки и др.);

- способы штамповки (штамповка на молотах, прессах, горизонтально-ковочных машинах, штамповка в открытых или закрытых штампах, штамповка выдавливанием и др.).

Анализ работ в области технологии горячей штамповки [1; 21; 22] и др. показывает, что наибольший положительный эффект энерго- и ресурсосбережения может быть получен только в том случае, если учитываются все операции комплексной технологий горячей штамповки (КТГШ). Основная цель при разработке комплексной технологий штамповки – максимальный учет физических, теплофизических, механических и термомеханических свойств конкретной марки стали, изменение ее свойств при разделительных операциях, нагреве и непосредственно штамповке, что позволяет обеспечить высокое качество металлопродукции. Комплексная технология горячей штамповки представляет синтез знаний в области обработки металлов давлением, теплообмена, термообработки, физики металлов, компьютерных технологий. Компьютерные технологии позволяют создавать виртуальные модели прокатных станов и кузнечных прессов, что позволяет проводить исследование различных способов получения готовой детали, энергосиловых параметров, напряженно-деформированного состояния металла с целью получения готового изделия высокого качества.

Первой операцией комплексной технологии штамповки является разделение прокатанного прутка на мерные заготовки. Наиболее распространенным способом является резка металла в штампах или применение пресс-ножниц. Достоинство этого способа разделения заключается в быстрой перестройке штампа на разные длины резки, низкой себестоимости резки, простой конструкции режущего инструмента.

К недостаткам резки металла ножницами можно отнести погрешности в форме, размерах и массе заготовки. Основные отклонения формы заготовки заключаются в утяжинах, вмятинах, скосах торца, торцевых заусенцах и др. [23]. Отклонение массы заготовки от номинала при резке металла составляет до 12 %, причем в зависимости от диаметра прутка разница между плюсовым и минусовым допуском на прокат при одной и той же длине заготовки составляет от 4 % до 9 % [24].

Одним из перспективных направлений в этой области является повышение качества заготовки и точности разделения прутка на заготовки при сохранении высокой производительности и низкой себестоимости, что требует внедрения новых нетрадиционных решений.

Высокие механические свойства поковок во многом зависят от температуры нагрева заготовок. По существующим технологиям нагрев заготовки для штамповки проводится до температур 1100–1200 °С. Достоинством нагрева до высоких температур является снижение сопротивления металла деформации и увеличение пластических свойств металла. К недостаткам высокотемпературного нагрева можно отнести образование окалины на поверхности заготовки и обезуглероживание поверхностного слоя металла. Образование окалины на заготовке вызывает значительную потерю металла – угар. Количество угара за один нагрев в печи составляет до 2 % от массы заготовки. Если при температуре 900 °С скорость окисления металла принять за единицу, то при температуре 1000 °С скорость окисления составляет 2, при температуре 1100 °С – 3,5, а при температуре 1300 °С – 7. Глубина обезуглероженного слоя при нагреве средне- и высокоуглеродистых сталей зависит от температуры нагрева и времени выдержки и находится в пределах 0,2–1,5 мм [24].

Перспективным направлением является снижение температуры нагрева заготовки, что позволяет значительно снизить потери металла от угара, снизить расход топлива и электроэнергии при нагреве ТВЧ, исключить обезуглероживание и повысить качество поковки [25–28].

Основной составляющей себестоимости штампованных поковок является стоимость металла, которая составляет до 70 % от общей стоимости поковки [24]. Наиболее эффективным направлением снижения себестоимости поковок является выбор оптимальных технологий штамповки, при которых отход металла был бы минимален.

Горячая штамповка подразделяется на штамповку в открытых штампах (штамповка с образованием облоя) и штамповку в закрытых штампах (безоблойная штамповка). При штамповке с облоем масса заготовки должна быть больше массы готовой поковки. Излишек металла заготовки гарантирует получение необходимых размеров поковки, и облой в данном случае является технологической необходимостью и одновременно потерей металла. Наличие облоя повышает силу деформирования и требует дополнительной операции по его обрезке.

Штамповка в закрытых штампах наиболее экономична. Она позволяет получать точную поковку с минимальной последующей обработкой резанием, значительно снизить себестоимость поковки и наиболее полно отвечает современным требованиям машиностроительного производства. При безоблойной штамповке окончательный штамповочный ручей представляет замкнутую полость, поэтому объем исходной заготовки должен отличаться от объема готовой поковки лишь на величину угара [24].

По существующим технологиям штамповка поковок круглых в плане производится на молотах или кривошипных горячештамповочных прессах, чаще всего в открытых штампах, что приводит к потерям металла до 25 % при обрезке облоя.

Предварительный анализ показал, что наиболее распространенная технология горячей штамповки поковок круглых в плане не является оптимальной.

В таблице 1.1 приведены достоинства и недостатки существующей комплексной технологии горячей штамповки.

Таблица 1.1 – Операции комплексной технологии горячей штамповки

| Операция                                   | Технологические особенности  | Достоинства  | Недостатки  |
|--|--|--|---|
| Разделение прокатанной штанги на заготовки | <p>Подогрев металла до 400–600 °С.</p> <p>Разделение металла сдвигом в штампах или ножницах на цилиндрические заготовки</p> <p>Получение цилиндрических заготовок.</p> | <p>Безотходная технология.</p> <p>Легко регулировать длину и объем заготовки. Простота обслуживания.</p> | <p>Низкое качество отрезанной заготовки.</p> <p>Непараллельность торцов заготовки.</p> <p>Низкая точность заготовки по массе.</p> <p>Разброс по массе составляет 7–12 %.</p>  |
| Нагрев заготовки перед штамповкой          | <p>Нагрев цилиндрических заготовок до 1150–1200 °С.</p> <p>Удаление окалины.</p>   | <p>Снижение сопротивление металла деформации.</p> <p>Повышение пластических свойств металла.</p>         | <p>Наличие окалины, которая ухудшает качество поверхности поковки.</p> <p>Угар металла до 3 %.</p> <p>Обезуглероживание поверхностного слоя заготовки.</p>  |
| Штамповка                                  | <p>Штамповка в открытых штампах с облоем.</p> <p>Обрезка облоя.</p>  | <p>Простота технологического процесса.</p> <p>Простота обслуживания штампов и оборудования.</p>          | <p>Дополнительная операция по предварительной осадке заготовки.</p> <p>Плохое центрирование заготовки.</p> <p>Высокая сила штамповки.</p> <p>Дополнительная операция по обрезке облоя, где потери металла составляют до 25 %.</p> <p>Дополнительная операция по удалению окалины с поверхности поковки.</p> |

## **1.2 Разделительные операции комплексной технологии горячей штамповки**

Металлургические заводы производят сортовой прокат в виде штанг длиной до 10 м, из которых ежегодно изготавливают несколько миллиардов мерных заготовок [23].

Большинство отрезанных заготовок подвергают последующей обработке давлением или резанием. Дальнейшее получение готового изделия не может быть эффективным, если разделение проката на заготовки неэкономично, сопровождается потерей металла в отход, большими затратами труда и энергии. Важными требованиями, предъявляемыми к заготовке, является высокая точность объема и массы, хорошее качество торца реза, перпендикулярность торца заготовки образующей цилиндра, отсутствие внутренних и внешних дефектов. Для разделения сортового проката на заготовки в современных заготовительных производствах используют более десяти различных способов, неравноценных по своим технико-экономическим показателям.

Выявлены и разрабатываются основные пути совершенствования процесса разделения металла на заготовки, создание благоприятного напряженного состояния металла в зоне реза, использование повышенных и высоких скоростей резания, расширение температурного интервала резки, использования для разделения заготовок прокатных станков поперечно-винтовой прокатки. При этом главное внимание уделяется повышению точности объема заготовки, повышению качества и высокой производительности процесса [23].

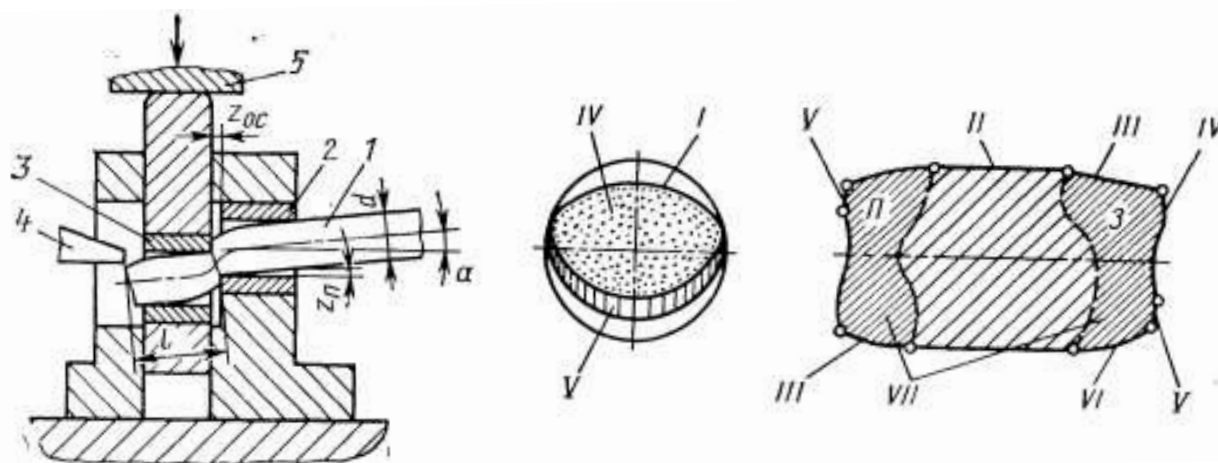
### **1.2.1 Разделение металла на заготовки в штампах**

В условиях массового и крупносерийного производства поковок основным способом разделения проката на мерные заготовки является резка металла на

ножницах и на прессах в штампах. Это наиболее производительный, дешевый и ресурсосберегающий способ изготовления заготовок из сортового проката.

Под резкой в штампе понимают безотходное разделение проката на заготовки путем смещения отрезаемой части по поверхности раздела под действием сближающихся ножей. В штампах разрезают стальные прутки диаметром до 70 мм без предварительного нагрева. Прутки большего диаметра режут на сортовых ножницах [23].

Простейшая принципиальная схема резки в штампе приведена на рисунке 1.1. Для резки прутки 1 вводят в отверстие неподвижного ножа 2 и подвижного ножа 3 до упора 4. Под воздействием перемещающегося вниз ползуна прессы 5 подвижной нож смещается относительно неподвижного, отрезая заготовку. Основные геометрические параметры заготовки – диаметр сечения  $d$  и длина  $l$  [23].



П – передний конец заготовки, З – задний конец заготовки

Рисунок 1.1 – Схема резки прутка в штампе и характерные участки поверхности реза и зоны пластической деформации

Геометрическая точность отрезанной заготовки зависит от степени развития пластической деформации и характера разрушения при резке. В общем случае искажение формы поверхности заготовки состоит из неоднородных по своей

природе участков (рисунок 1.1): недеформированного участка – II; участка вмятин, образованных контактной пластической деформацией – III; утяжки, возникающей в результате внеконтактной пластической деформации – VI; гладких плоских («блестящих») поясков на торцах, образованных пластическим внедрением ножей – V и шероховатых волнообразных участков на торцах, вызванных разрушением – IV. Овальная форма торца – I возникает из-за поперечной местной вмятины III у конца заготовки и утяжины VI [23].

В работе [23] приведены данные, что объем работы 7–8 пил по резке прутка можно выполнить в одном разрезном штампе. Замена резки прутков на металлорежущих станках резкой в штампах обеспечивает экономию до 40 % металла в зависимости от длины заготовки.

Резка металла в штампе представляет собой совокупность пластической деформации металла и разрушения за счет распространения трещины. При перемещении подвижного ножа вниз и соприкосновении с разрезаемым металлом в зоне реза возникают упругие деформации. В дальнейшем начинается пластическая деформация, которая включает в себя поперечное сжатие и изгиб металла заготовки. Затем начинается пластическое внедрение ножей, при этом деформация сосредотачивается у кромок ножей и не проникает на всю глубину разрезаемого металла. По мере внедрения ножей пластическая деформация охватывает всю толщину разрезаемого прутка. С развитием пластической деформации у кромок ножей возникают трещины, которые распространяются навстречу друг другу. В результате соединения трещин образуется поверхность раздела, и отрезаемая заготовка отделяется от прутка. За счет пластического изгиба заготовки при резке добиться стабильной перпендикулярности реза на сортовых ножницах обычной конструкции практически невозможно [23]. Кроме того, при обычной резке металла на сортовых ножницах наблюдаются утяжины, вмятины, заусенцы и др. При некачественной резке возможны поперечные трещины, вырывы металла, ступенчатый порез и др.

У заготовки следует различать передний и задний концы, которые обычно не тождественны по степени точности. Большие отклонения наблюдаются у

заднего конца, поэтому оценку геометрической точности заготовки проводят по результатам его измерений. Размеры, по которым оценивают геометрическую точность заготовки, приведены в таблице 1.2 [23].

Таблица 1.2 – Геометрическая точность заготовки

| Размеры, характеризующие точность, мм | Обозначение | Размеры, характеризующие точность, мм | Обозначение |
|---------------------------------------|-------------|---------------------------------------|-------------|
| Утяжина продольная                    | $b$         | Глубина волны на торце                | $d$         |
| Утяжина поперечная                    | $f$         | Ширина пластического пояса            | $c$         |
| Вмятина продольная                    | $n$         | Угол скоса торца                      | $\varphi$   |
| Вмятина поперечная                    | $k$         | Глубина вмятины                       | -           |

Геометрическая точность заготовок предопределяет возможность их использования при штамповке в открытых или закрытых штампах. Так, неровности торцов и их непараллельность затрудняют центрирование заготовок в штамповом ручье и часто вызывают одностороннее течение металла, что приводит к браку штампованной поковки, заклиниванию прессы и быстрому износу штампов.

Важным компонентом качества заготовки является состояние поверхности среза и состояние металла в приторцевых зонах.

Для повышения точности массы и качества поверхности отрезаемых заготовок совершенствуются традиционные способы разделения заготовок в штампах. Разрабатываются методики повышения точности при определении размеров заготовок [29–35], рассматривается зависимость качества отделяемой заготовки от факторов, влияющих на точность резки [36–39]. Исследуются различные схемы резки для создания новых штампов [36; 40–43], такие штампы имеют более сложную конструкцию и меньшую производительность. Для увеличения производительности применяют многоопорной резку [44], но

повышения качества заготовок при этом не достигается. Влияние скорости резания на качество отрезаемых заготовок исследовано в работах В. Т. Синицина, В. Т. Мещерина, С. С. Соловьева [45–48]. Внедрению высокоскоростной резки препятствует отсутствие соответствующего оборудования.

Проведено исследование влияние температуры разрезаемого металла на качество резки [49]. В работе выявлены две температурные зоны, в которых значительно улучшается качество поверхности среза. Для проката из малоуглеродистой стали рекомендован нагрев до температуры 300 °С, когда за счет повышения хрупкости стали уменьшается искажение формы заготовки, и до 500–700 °С, когда за счет увеличения пластических свойств металла вся поверхность разделения металла образуется пластическим сдвигом. Улучшает качество поверхности реза и разделение металла при низких температурах [50].

Большой вклад в развитие теории и технологии резки сдвигом внесли иностранные ученые. Так, теоретическим вопросам резки сдвигом посвящены работы [51; 52], резке при высоких скоростях деформации работы [53; 54], резке с осевым нагружением заготовки работы [55; 56]. Металлургические факторы, влияющие на качество резки сдвигом, представлены в работе [57].

В работах, приведенных выше, предложены способы получения высококачественного торца заготовки, но не выполняются требования высокой точности массы заготовки ввиду наличия допусков на диаметр горячекатаного металла и затруднений в обеспечения точной длины заготовки, отрезаемой от прутка.

В зависимости от диаметра прутка поле допусков на прокат при одной и той же длине заготовки достигает 9 % – таблица 1.3 [23].

Если определение размеров заготовки не представляет особых затруднений, то получить мерную заготовку, равную по объему поковке, практически затруднительно. Этому препятствуют существующие на прокат допуски и неточность режущих средств.

Таблица 1.3 – Отклонение массы заготовки

| Диаметр заготовки, мм | Отклонение по диаметру, мм |     | Масса заготовки (г) длиной 100 мм при диаметре |       |       | Отклонение массы от номинального, % |      |
|-----------------------|----------------------------|-----|--|-------|-------|-------------------------------------|------|
|                       | +                          | –   | ном.   | max   | min   | +                                   | –    |
| 20                    | 0,4                        | 0,5 | 247  | 257   | 234   | 4,04                                | 4,94 |
| 40                    | 0,4                        | 0,7 | 986  | 1006  | 952   | 2,01                                | 3,47 |
| 60                    | 0,5                        | 1,1 | 2219   | 2257  | 2139  | 1,67                                | 3,64 |
| 80                    | 0,5                        | 1,3 | 3946   | 3995  | 3817  | 1,25                                | 3,20 |
| 100                   | 0,6                        | 1,7 | 6165   | 6240  | 5958  | 1,20                                | 3,37 |
| 120                   | 0,8                        | 2,0 | 8875   | 8997  | 8585  | 1,34                                | 3,31 |
| 140                   | 0,8                        | 2,0 | 12084  | 12223 | 10740 | 1,15                                | 2,84 |
| 160                   | 0,9                        | 2,5 | 15783  | 15961 | 15294 | 1,12                                | 3,10 |

Отклонение отрезаемой длины зависит от способа резки и при резке на пресс-ножницах составляет 3–5 мм [23].

При штамповке в открытых штампах избыток металла, образовавшийся при резке заготовок, идет в облой, поэтому точность массы заготовки не имеет большого значения. При безоблойной штамповке объем заготовки должен равняться объему поковки. Для небольшого количества избыточного металла предусматриваются компенсаторы (магазины). Расчет необходимой массы заготовки в этом случае вызывает определенные трудности.

Для получения точной массы заготовки ее длина должна изменяться в зависимости от диаметра поступающего прутка [34, 58]. Созданные устройства довольно сложны, что затрудняет их широкое внедрение в промышленность. Отсутствие простого и удобного способа получения точных по объему заготовок сдерживает внедрение в производство прогрессивной технологии безоблойной штамповки.

Таким образом, разделение сортового металла в штампах является производительным, дешевым и ресурсосберегающим способом изготовления заготовок из сортового проката. Однако в связи с большими допусками по диаметру горячекатаного металла, неточности резки по длине раската полученные заготовки имеют значительные допуски по массе, которые достигают 12 % от

массы заготовки. Кроме того, при резке прутка в штампе торцы заготовки получаются неровными. Поэтому заготовку, полученную резкой в штампе, применяют в основном для штамповки в открытых штампах.

### 1.2.2 Разделение металла на заготовки в станах поперечно-винтовой прокатки

Значительно более эффективно можно получать мерные по объему заготовки при использовании станов поперечно-винтовой прокатки. Схема процесса прокатки представлена на рисунке 1.2 [59].

Исходной заготовкой для прокатки шаровой заготовки служат горячекатаные прутки стандартных размеров, имеющие допуски по диаметру. Перед прокаткой прутки равномерно нагревают до температуры 800–1100 °С. Температура нагрева зависит от диаметра покатываемого шара [59].

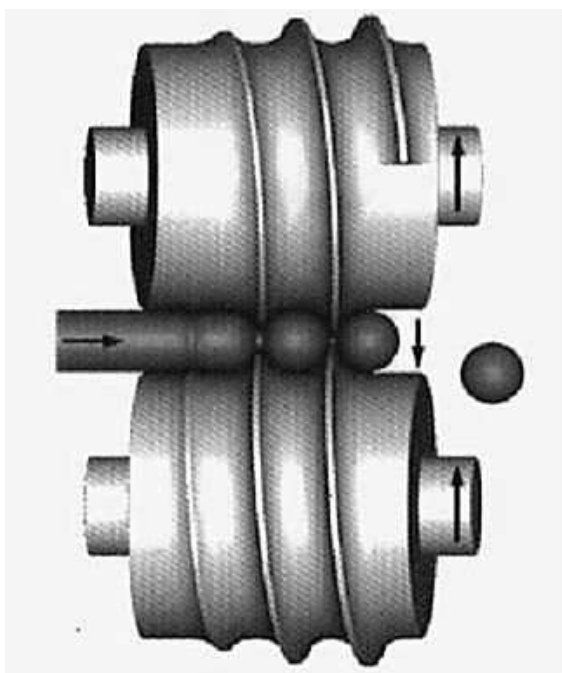


Рисунок 1.2 – Схема процесса прокатки шаров

Круглый пруток задается в непрерывно вращающиеся валки, на боковой поверхности которых нарезаны винтовые калибры. За счет сил трения заготовка захватывается валками, начинает вращаться и продвигается вдоль оси прокатки. В процессе прокатки реборды валков обжимают металл и формируют шаровую заготовку. В конце калибра происходит подрезка перемычки, и шар выбрасывается из валков. При этом реборда валков захватывает новую порцию металла, и процесс прокатки осуществляется непрерывно, пока не прокатается весь пруток. Обжимаясь валками заготовка удерживается на оси прокатки стана с помощью специальных направляющих линеек. Калибровку валков выполняют таким образом, чтобы обеспечивалось постепенное внедрение реборд валков в обжимаемую заготовку [59].

Наибольший вклад в развитие технологии прокатки в винтовых калибрах внесли работы А. И. Целикова [59–61], В. С. Смирнова [62], Е. С. Рокотяна [63], С. П. Грановского [64], Э. Р. Шора [65], В. И. Котенка [66–68], А. Ф. Балина [69] и др. Авторы в своих трудах рассматривали вопросы формоизменения металла в калибре, влияние скоростных и температурных параметров на течение металла, причины образования дефектов сплошности изделий – центральной полости и рыхлости, определения энергосиловых параметров прокатки – давления на валки, крутящих моментов, потребной мощности привода.

В результате решения ряда научных проблем были созданы и внедрены в промышленность станы и технологические процессы прокатки цилиндрических деталей, мелющих шаров и шариков для подшипников.

Получение заготовок поперечно-винтовой прокаткой позволяет исключить из технологии процесса объемной штамповки операцию резки заготовки, причем производительность прокатного стана в 5–7 раз выше производительности пресс-ножниц [70; 71]. Кроме того, прокатанная заготовка имеет высокое качество поверхности и механические свойства. При строгом соблюдении режимов прокатки, температуры нагрева и оптимальной калибровки прокатных валков гарантируется отсутствие дефектов в виде рыхлостей и пустот внутри шаровой заготовки [59].

Конкретный пример применения шаровой заготовки приведен в работе [59]. Прокатка шаров диаметром 81 мм и безоблойная штамповка поковок шестерни из этих шаров показали, что при значительных допусках на горячекатаный прутки диаметром  $80_{-1,3}^{+0,5}$  мм погрешность массы прокатанных шаров находится в пределах 5 %. В работе [72] приведен интервал колебания массы шаровой заготовки, не превышающий 3 %.

В работе [70] описана технология применения заготовки, полученной поперечно-винтовой прокаткой, для штамповки шестерни. Замена операций рубки и предварительной осадки на одну операцию прокатки заготовки на стане поперечно-винтовой прокатки позволила увеличить производительность процесса получения поковки в 1,4 раза.

Исследование возможности замены цилиндрических заготовок на шаровые заготовки при горячей объемной штамповке осесимметричных деталей в закрытых штампах приведено в работах [73–77]. Установлено, что шаровая заготовка позволяет получить точные высококачественные поковки.

Применение станов поперечно-винтовой прокатки для производства заготовок под штамповку позволяет увеличить коэффициент использования металла на 20–25 % и снизить трудоемкость изготовления поковок в 1,8–1,9 раз [78; 79].

Согласно данным [80], применение 1 миллиона точных заготовок при штамповке в открытых штампах будет способствовать экономии около 50 тысяч тонн металла и высвобождению до 5000 металлорежущих станков.

В работах [81–83] проведены исследования процесса штамповки поковок круглых в плане с отрезками из шаровой заготовки. Установлено, что шаровая заготовка может быть использована для штамповки поковок типа «крестовина».

Основы калибровки валков шаропркатных станов детально изложены в работе [59]. Согласно этой методике, для обеспечения нормального процесса прокатки профиля размеры формующего участка калибра рассчитываются таким

образом, чтобы в процессе обжатия заготовки соблюдались следующие три основных условия:

1) объем металла, обжимаемый в калибре, должен оставаться постоянным в течение всего процесса формовки шара;

2) изменение профиля и размеров реборды калибра должно соответствовать вытяжке обжимаемой заготовки;

3) обжатие должно осуществляться относительно узкими участками, чтобы предотвратить разрушение металла в осевой зоне заготовки.

Далее отмечается, что для выполнения как первого, так и второго условия образования формы шара реборда на различных участках калибра должна иметь строго определенную ширину. В связи с этим формирующий участок калибра должен иметь переменный шаг нарезки.

Переменный шаг нарезки калибра можно осуществить только на металлорежущих станках с числовым программным управлением (ЧПУ). На металлургических и машиностроительных заводах Российской Федерации применяют в основном дискретную калибровку валков.

Согласно методике расчета калибровки по В. С. Смирнову, расчет калибровки валков шаропрокатного стана проводится из условия постоянства объема металла в калибре.

В методике расчета калибровки валков, разработанной С. П. Грановским, для полного заполнения профиля шара необходимо, чтобы в процессе формовки металл заготовки непрерывно прилегал к реборде калибра [64]. Тогда ширину реборды рассчитывают исходя из постоянства объема металла, обжимаемого ребордой.

Расчеты калибровок проводятся по упрощенным зависимостям с ориентацией на уже хорошо работающие калибровки других шаропрокатных станов.

### 1.3 Нагрев металла в комплексной технологии горячей штамповки

По температурным режимам технологические операции объемной штамповки можно разделить на холодную, горячую, и полугорячую или теплую штамповку.

Холодной объемной штамповкой (температура штамповки ниже  $0,2T_{пл}$ ) получают поковки с высоким качеством поверхности, однако деформация в таком температурном интервале требует значительных удельных сил, при которых возможна поломка инструмента.

Холодным выдавливанием рекомендуется изготавливать детали из стали, содержащей не более 0,35 % C; 1,5 % Mn; 1,5 % Cr; 0,75 % Ni; 0,5 % Mo; 0,3 % Si [78]. Причем рекомендуемая твердость стали для холодной штамповки не должна превышать 260НВ [84].

К недостаткам холодной объемной штамповки следует отнести:

- ограничение по твердости штампуемой стали;
- высокое сопротивление металла деформации;
- повышенный износ штампов;
- ограничение по массе поковок.

Горячую штамповку проводят при температурах  $(0,7-0,8)T_{пл}$  [85]. Повышение температуры штамповки снижает сопротивление металла деформации и повышает пластические свойства металла. За счет нагрева металла при горячей деформации происходит снижение необходимых сил штамповки.

Однако нагрев в атмосфере воздуха или продуктов горения топлива до температуры горячей штамповки сопровождается окислением металла и формированием на его поверхности окалина [86].

Прогрессивным является применение полугорячей штамповки при нагреве металла до температуры  $(0,4-0,6)T_{пл}$ . В этом случае решают компромиссную

задачу нагрева заготовки с минимальным количеством окалины и приемлемым сопротивлением металла деформации при достаточной пластичности металла.

Для выбора рационального технологического процесса и оптимального интервала температур обработки металлов давлением необходимо иметь данные о сопротивлении металла пластическим деформациям и его пластических свойствах. Часто считают, что между сопротивлением деформации и пластичностью имеется однозначная связь, так как с увеличением температуры сопротивление металла деформации уменьшается, а пластические свойства, как правило, возрастают. Однако в действительности эта связь значительно сложнее, и имеется большое количество факторов, которые ее нарушают. Сопротивление деформации является более стабильной величиной и в пределах данной марки стали изменяется незначительно. Пластичность – более чувствительная характеристика, которая сильно зависит от способа выплавки стали, условий разлива и т. д., и ее значения могут существенно изменяться даже для одной марки стали [87].

Температура является наиболее сильным фактором, определяющим сопротивление металла пластическому деформированию. С повышением температуры сопротивление деформации металлов и сплавов, как правило, снижается. Это положение можно объяснить тем, что с повышением температуры ослабевают материальные связи частиц, что облегчает их взаимное смещение.

Экспоненциальная зависимость сопротивления деформации от температуры впервые предложена Н. С. Курнаковым [88] и экспериментально подтверждена С. И. Губкиным [89–91]. На основе принципов термодинамики необратимых процессов М. А. Зайков [92] предложил теоретический вывод экспоненциальной зависимости сопротивления деформации от температуры:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(-b \cdot T), \quad \sigma = \sigma_{пл} \cdot \exp(b \cdot T \cdot (1 - \Gamma)), \quad (1.1)$$

где  $\sigma_0$  и  $\sigma_{пл}$  – сопротивление деформации, экстраполированное до нуля по шкале

Кельвина и при температуре плавления  $T_{пл}$  соответственно;

$b$  – температурный коэффициент;

Г – гомологическая температура.

Процесс горячей деформации металлов можно описать, используя кривые течения в координатах  $\sigma$ - $\varepsilon$ , где  $\sigma$  – напряжение,  $\varepsilon$  – деформация. На рисунке 1.3 показаны наиболее характерные кривые течения при горячей деформации металлов и сплавов в широком диапазоне температур [93].

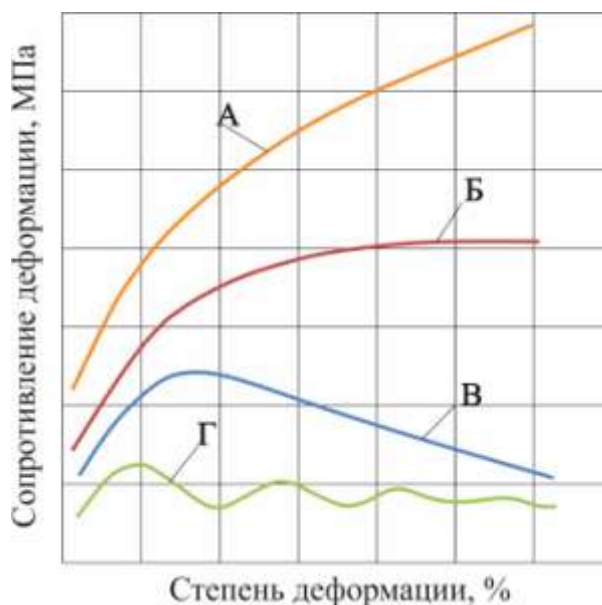
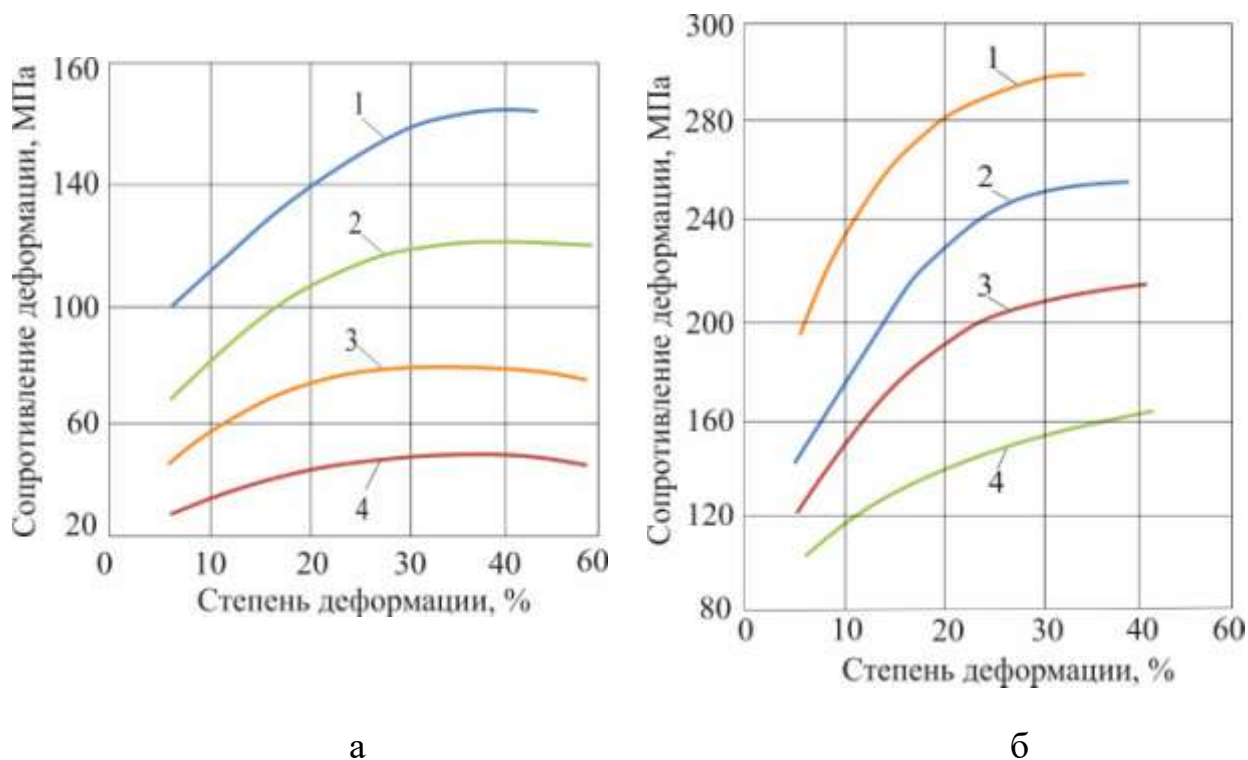


Рисунок 1.3 – Кривые течения металлов при различных температурно-скоростных условиях деформации

Кривые течения типа А характерны для большинства металлов при высокоскоростном нагружении. Кривые течения типа Б характерны для металлов, где деформационное упрочнение невелико. У кривых типа В в условиях горячей деформации наблюдается ярко выраженный максимум. У кривых типа Г за счет динамической рекристаллизации наблюдается осцилляция сопротивления деформации на установившейся стадии течения.

На рисунке 1.4 приведены графики температурной зависимости сопротивления деформации углеродистой стали 45 [91].

Можно отметить, что с повышением температуры деформации сопротивление металла деформации уменьшается, как при скорости деформации  $7,5 \text{ с}^{-1}$ , так и при скорости деформации  $150 \text{ с}^{-1}$ .



а – скорость деформации  $7,5 \text{ с}^{-1}$ ; б – скорость деформации  $150 \text{ с}^{-1}$

Температура,  $^{\circ}\text{C}$ : 1 – 900; 2 – 1000; 3 – 1100; 4 – 1200

Рисунок 1.4 – Кривые деформационного упрочнения образцов из стали 45

Пластичность является одним из основных факторов, определяющих качество деформированного металла. В физическом смысле пластичность – это свойство металла, позволяющее осуществлять значительные остаточные перемещения элементов кристаллической структуры без ее разрушения. Пластические свойства металла оцениваются величиной предельной степени деформации, накопленной до разрушения [94]:

$$A_p = \sqrt{3} \cdot \varepsilon_i, \quad (1.2)$$

где  $A_p$  – предельная степень деформации сдвига;

$\varepsilon_i$  – интенсивность деформаций.

Пластичность металла зависит от марки и состояния стали, напряженного состояния, траектории нагружения, температуры и скорости нагружения деформации.

Влияние среднего нормального напряжения или показателя напряженного состояния (ПНС в виде  $\sigma/\sigma_i$ ) на пластичность наблюдали П. Брджмен, Т. Карман, Г. А. Смирнов-Аляев и др. С уменьшением ПНС (напряжение сжатия со знаком минус) пластичность увеличивается. Это свидетельствует о том, что при деформации наряду с процессом возникновения дефектов происходит и залечивание повреждений, которые протекают тем интенсивнее, чем больше гидростатическое давление. Зависимость пластичности от ПНС называется диаграммой пластичности [94].

Теоретические и экспериментальные исследования пластических свойств металла при различных температурах является отдельным направлением теории обработки металлов давлением и более подробно изложено в работах С. И. Губкина, В. Л. Колмогорова, А. А. Богатова, Б. А. Мигачева, В. А. Паршина, В. А. Огородникова, В. Н. Перетяцько, М. А. Зайкова, Ж. П. Пуарье, Р. Хоникомба и др. [89–134].

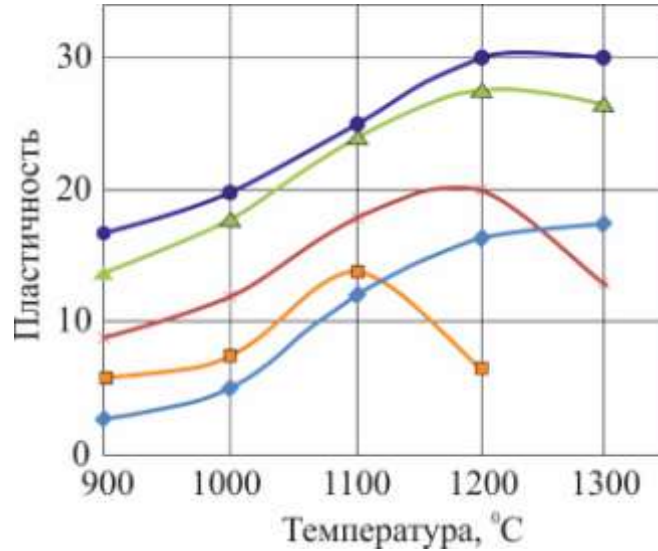
Для построения диаграммы пластичности можно использовать следующие методики: кручение сплошных или трубчатых образцов, испытание образцов на растяжение, испытание образцов на одноосное сжатие, прокатка клиновидных образцов и др. [94; 114–116].

На рисунке 1.5 приведен график температурной зависимости пластичности углеродистых марок стали [85].

Ю. Г. Калпиным [117] предложена следующая классификация критериев разрушения:

- деформационные критерии разрушения (В. Л. Колмогоров, А. А. Богатов, В. А. Огородников и др.);
- комбинированные критерии разрушения (Ю. Г. Калпин и др.);

– энергетические критерии разрушения (М. G. Cockroft, D. J. Latham [135], Р. Brozzo [136], Д. Г. Степанский [137] и др.).



◇ сталь 10; □ сталь 15; △ сталь 40; × сталь У10; ◇ сталь У12

Рисунок 1.5 – Пластичность углеродистых марок стали

Сущность деформационных критериев заключается в том, что вводится понятия накопление повреждаемости и ее залечивание в процессе деформации и зависящие от показателя напряженного состояния.

Согласно В. Л. Колмогорову, предельная деформация до разрушения  $A_p$  зависит от показателя напряженного состояния. Показатель напряженного состояния, по В. Л. Колмогорову:

$$K = \frac{\sigma_{\text{ср}}}{T}, \quad (1.3)$$

где  $\sigma$  – среднее нормальное напряжение, Па,  $\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ ;

$T$  – интенсивность касательных напряжений

$$T = \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}}, \text{ или } T = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad (1.4)$$

где  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений.

Условие деформации без разрушения можно записать в виде [120]:

$$\psi = \frac{A}{A_p} < 1, \quad (1.5)$$

где  $\psi$  – степень использования запаса пластичности;

$A$  – накопленная частицей степень деформации сдвига;

$A_p$  – степень деформации сдвига в момент разрушения (определяется экспериментально).

Т.е. накопленная деформация должна быть меньше предельной степени деформации.

Комбинированный критерий основан на установлении связи между степенью использования запаса пластичности, с одной стороны, и накопленной деформации и напряжением текучести – с другой стороны.

Энергетические критерии пластичности основаны на вычислении удельной работы деформации. Расчет энергетического критерия пластичности включен в программные комплексы QForm, Deform и др. Критерий разрушения (пластичности) Кокрофта основан на предположении, что накопление повреждений происходит только тогда, когда хотя бы из одно главных напряжений является растягивающим, а критерием разрушения является предельная работа, совершаемая этим напряжением на накопленных деформациях.

Поврежденность металла (использование ресурса пластичности) при одном этапе нагружения в этом случае рассчитывается по зависимости:

$$\Psi = \int_{\varepsilon_{i2}}^{\varepsilon_{i1}} \frac{\sigma_1}{\sigma_i} d\varepsilon_i, \quad (1.6)$$

где  $\sigma_1$  – главное нормальное положительное напряжение;

$\sigma_i$  – интенсивность напряжений;

$\varepsilon_i$  – интенсивность деформаций;

$\varepsilon_{i1}$  и  $\varepsilon_{i2}$  – интенсивность деформации соответственно к началу и окончанию этапа.

В работе [138] приведены данные по использованию критерия разрушения Кокрофта при холодной деформации сплава ХН50ВМТЮБ-ВИ. Моделирование

испытания образцов на растяжение позволяет определить критическое значение разрушения для критерия разрушения Кокрофта. Для сплава ХН50ВМТЮБ-ВИ при деформации его в холодном состоянии величина критерия разрушения Кокрофта составляет 0,355. Вторым критерием для оценки поврежденности в зоне сжатия на внутреннем радиусе гибки был использован критерий разрушения Колмогорова в виде:

$$\Pi = \int_{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{\varepsilon_{\text{пр}}(\eta)}, \quad (1.7)$$

где  $\varepsilon$  – степень деформации;

$\varepsilon_{\text{пр}}(\eta)$  – функция пластичности материала, являющаяся функцией показателя напряженного состояния (коэффициента жесткости напряженного состояния).

Следует отметить, что авторы не приводят диаграммы пластичности сплава ХН50ВМТЮБ-ВИ (необходимо для точного определения критерия Колмогорова), а применяли данные для стали 20. Поэтому результаты расчета критерия Колмогорова дают только качественную оценку вероятности разрушения. Для сплава ХН50ВМТЮБ-ВИ при деформации его в холодном состоянии величина критерия разрушения Колмогорова составляет 0,3.

Компьютерное моделирование в программном комплексе QForm с использованием подпрограмм на основе критерия разрушения Кокрофта и Колмогорова дают возможность прогнозирования разрушения заготовки, осуществлять правильный выбор геометрических параметров заготовки и инструмента на основе результатов испытания образцов конкретного листового металла на растяжение. Полученные в результате моделирования данные позволяют сократить время и расходы на штамповую оснастку при освоении новых изделий.

В статье [139] представлены результаты оценки риска разрушения для двух различных процессов теплой штамповки нержавеющей стали и магниевого сплава. Отмечается, что процесс теплой штамповки объединяет преимущество

операций горячей штамповки (уменьшение силы деформирования) и холодной (отсутствии окалина) обработки металлов давлением. Исследование вероятности разрушения проведено с использованием двух критериев разрушения – Кокрофта-Латэма и Райса-Трейси:

$$\int_0^{\varepsilon_i} \exp\left(\frac{3\sigma_{cp}}{2\sigma_i}\right) d\varepsilon = Const, \quad (1.8)$$

где  $\sigma_{cp}$  – среднее напряжение;

$\sigma_i$  – интенсивность напряжений;

$\varepsilon_i$  – накопленная деформация к моменту разрушения.

При полугорячей штамповке хирургического инструмента из нержавеющей стали величина критериев разрушения составляла: критерия разрушения Кокрофта-Латэма – 950, критерия разрушения Райса-Трейси – 75. При полугорячей штамповке детали мотоцикла из магниевого сплава величина критериев разрушения составляла: критерия разрушения Кокрофта-Латэма – 65, критерия разрушения Райса-Трейси – 0,15. Анализ распределения значений критериев разрушения, построенных на основе моделирования, показал, что применение разработанной модели позволяет выполнять точное прогнозирование местоположение трещин.

Таким образом, в теории обработки металлов давлением имеется несколько критериев разрушения. В данной работе использованы деформационный и энергетический критерий разрушения.

При нагреве металла до температуры горячей штамповки на поверхности нагретой заготовки образуется окалина. Окалина плохо очищается с поверхности нагретой заготовки и при деформации вдавливается в тело поковки, что ухудшает качество ее поверхности. Кроме того, окалина, обладая большей твердостью, ускоряет износ штампов. В металлургической теплотехнике сформировалось целое направление – малоокислительный и безокислительный нагрев стали.

Вопросами окисления и обезуглероживания при нагреве металла были посвящены труды В. Ф. Копытова, А. А. Скворцова, И. Н. Францевича, Р. Ф.

Войтовича, Н. Ю. Тайца, Л. А. Шварцмана, А. И. Ващенко, А. Г. Зеньковского, А. Е. Лифшица, М. Н. Леонидова, В. П. Северденко, Л. А. Шульца, А. А. Шмыкова, Е. М. Макушка, А. Н. Равина, Б. М. Эстрина, Е. И. Казанцева, В. И. Губинского, Е. А. Гюлиханданова и др. [86; 140–157].

При расчетах высокотемпературного окисления стали при нагреве в печах широко используют зависимости:

$$\frac{dY}{d\tau} = \frac{\chi}{Y T(\tau)} \exp\left(-\frac{B}{T(\tau)}\right), \quad (1.9)$$

или

$$\frac{dY}{d\tau} = \frac{k_0}{2Y} \exp\left(-\frac{B}{T(\tau)}\right), \quad (1.10)$$

где  $Y$  – угар, г/см<sup>2</sup>;

$\tau$  – время, мин;

$T$  – температура, К;

$k_0$ ,  $\chi$ ,  $B$  – эмпирические константы.

При постоянной температуре нагрева эти уравнения могут быть приведены к виду [143; 144]

$$Y_r = k\sqrt{\tau}, \quad (1.11)$$

где  $k$  – константа скорости окисления;

$\tau$  – время, мин.

Принимаем, что константа скорости окисления подчиняется уравнению Аррениуса [158], тогда:

$$k = A \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad (1.12)$$

где  $A$  – коэффициент;

$Q$  – энергия активации;

$R = 8,3143$  – универсальная газовая постоянная;

$T$  – температура.

Принимая  $B = Q/R$ , окончательно получим:

$$k = A \cdot \exp\left(-\frac{B}{T}\right) = Y_r. \quad (1.13)$$

В случае изменения температуры при нагреве металла имеем:

$$Y_r = A_1 \sqrt{\tau} \exp\left(-\frac{B}{T}\right) \quad (1.14)$$

где  $A_1$  и  $B$  – эмпирические константы;

$\tau$  – время нагрева, мин.;

$T$  – температура нагрева, К.

В литературе отсутствуют научно обоснованные зависимости по расчету оптимальной температуры нагрева стали для ее обработки давлением. Для углеродистых сталей температурный интервал штамповки связывают с диаграммой состояния железо-углерод.

На рисунке 1.6 приведена диаграмма состояния сплавов железо-углерод и температурный интервал штамповки углеродистых сталей [24].

Рекомендуемые температуры нагрева и конца деформации для различных марок стали приведены в таблице 1.4 [24].

Из анализа таблицы 1.4 видно, что рекомендуемая температура конца деформирования составляет для разных марок стали 800–900 °С.

Температура нагрева металла зависит от продолжительности процесса деформирования металла. При штамповке за один переход процесс деформирования протекает быстро, и поэтому первоначальная температура нагрева заготовки должна лишь незначительно превышать температуру конца штамповки. Излишне высокая первоначальная температура нагрева заготовки увеличивает продолжительность и стоимость нагрева, а также может не обеспечить необходимую температуру в конце деформации [24].

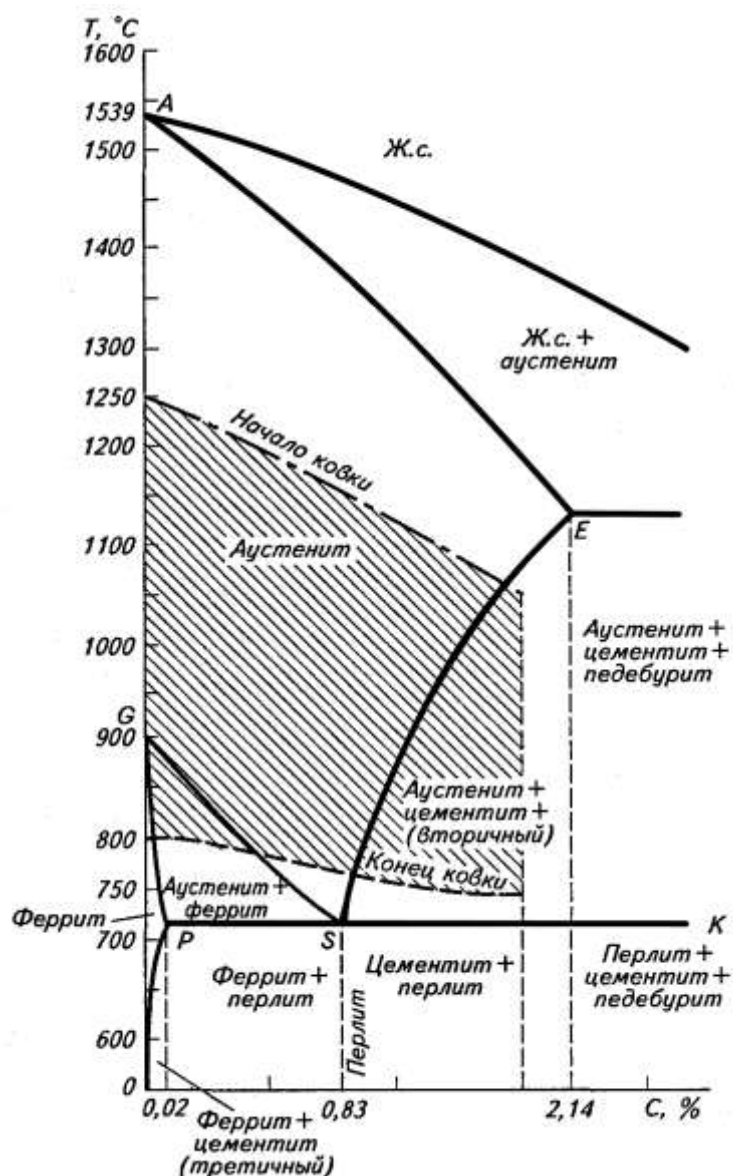


Рисунок 1.6 – Диаграмма состояния сплавов железо-углерод и температурного интервала ковки

Перспективным направлением является снижение конечной температуры нагрева стали на 100–200 °С, что позволяет значительно снизить потери на угар металла, расход топлива, вредные выбросы оксидов азота и повысить производительность нагревательного устройства. Такие эксперименты проводились на различных предприятиях и дали положительные результаты [25; 156].

Данные по выбору температуры нагрева для высокоскоростного деформирования стали 18Х2Н4МА приведены в работе [27].

Таблица 1.4 – Температурные интервалы деформирования различных марок стали

| Марка стали   | t макс.,<br>°С | Температура конца деформирования, °С |         | Рекомендуемый интервал температур, °С |
|---|----------------|--------------------------------------|---------|---------------------------------------|
|   |                | не выше                              | не ниже |                                       |
| Ст.0 – Ст.3, 10, 15                                 | 1300           | 800                                  | 700     | 1280–750                              |
| Ст.4 – Ст.6, 15Г, 20Г, 25Г, 30Г                     | 1250           | 850                                  | 750     | 1200–800                              |
| 20 – 35   | 1280           | 830                                  | 720     | 1250–800                              |
| 40, 45, 50, 25ГС, 35ГС                              | 1260           | 850                                  | 760     | 1200–800                              |
| 55, 60, 35ХС, 20ХФ, 40ХФА                           | 1240           | 850                                  | 760     | 1190–800                              |
| 65, 70, 40Г, 45Г, 50Г                               | 1220           | 850                                  | 770     | 1180–800                              |
| 10Г2, 35Г2  | 1220           | 870                                  | 750     | 1200–800                              |
| 60Г, 65Г, 12ХН2, 29ХН3А, 38ХГН                      | 1200           | 850                                  | 760     | 1180–800                              |
| 15Х, 20Х  | 1250           | 870                                  | 760     | 1200–800                              |
| 40Х, 45Х, 50Х, 40Г2, 50Г2, 18ХГТ, 40ХН, 50ХН, 25ХГС | 1200           | 870                                  | 800     | 1180–830                              |
| 12ХН3, 20ХН3А                                       | 1200           | 870                                  | 760     | 1180–800                              |
| 40ХНМА, 30Х2Н3А                                     | 1280           | 900                                  | 800     | 1160–850                              |
| 20Х2Н4МА  | 1180           | 800                                  | 750     | 1150–780                              |
| 30ХГСА, 35ХГСА                                      | 1180           | 870                                  | 800     | 1140–830                              |

С целью управления технологическими параметрами полугорячей штамповки для получения требуемых механических свойств в работе [159] рекомендуется разделить процесс на три стадии и отслеживать на каждой стадии температурное поле заготовки. Эти мероприятия позволяют получать штамповку с требуемыми геометрическими размерами и необходимыми механическими свойствами.

Большой объем работ по совершенствованию технологии горячей и полугорячей штамповки выполнил Научно-исследовательский институт машиностроения (НИИМаш) [160–162]. Но в этих работах методика выбора оптимальной температуры нагрева заготовки для полугорячей штамповки не приводится. Недостаточно справочных данных по сопротивлению металла

деформации, пластическим свойствам и угару, особенно в области температур полугорячей штамповки.

В работах [163; 164] приводятся данные по многофакторным сравнительным исследованиям теплофизических особенностей нагрева шаровой заготовки диаметром 60 мм и цилиндрической заготовки диаметром 49 мм и высотой 60 мм одинаковой массы. Расчет реализовали с применением численно-аналитического метода [165] в среде Microsoft Excel. Характерные точки, в которых рассчитывали температуру, представлены на рисунке 1.7.

Авторами установлено, что нагрев цилиндрической заготовки сопровождается большими по сравнению с шаром перепадами температур по сечению, связанными с известным эффектом перегрева углов, граней и ребер заготовок. Перепад температур по поверхности шара отсутствует, в то время как перепад температур по поверхности цилиндра достигает 10–15 °С. Перепад температуры по сечению шара в конце нагрева составляет 13 °С, в то время как при нагреве цилиндрической заготовки перепад температуры по сечению составляет 21 °С [163].

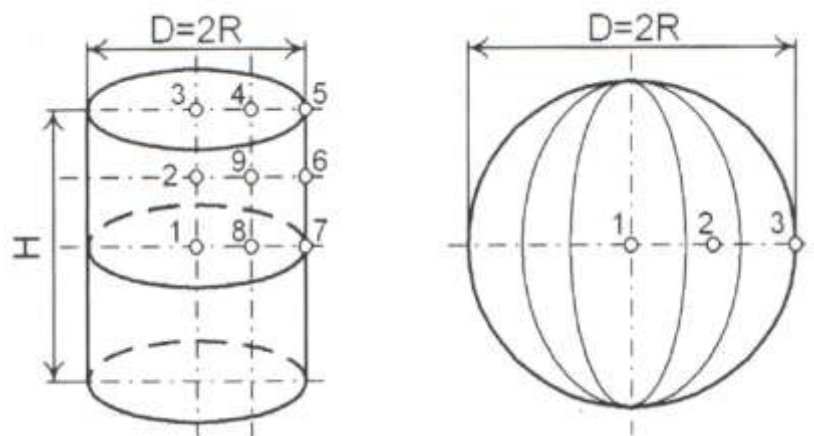


Рисунок 1.7 – Характерные точки при нагреве цилиндрической и шаровой заготовки

Таким образом, использование шаровой заготовки вместо цилиндрической позволяет повысить качество нагрева за счет повышения равномерности температуры по сечению и поверхности заготовки [163].

Актуальной задачей при проведении исследований является сокращение количества опытов без потерь в точности измерений. Для ее решения широко применяются методы планирования эксперимента и обработки его результатов, такие как: ортогональные планы второго порядка, метод крутого восхождения, симплексный метод и т. д. [166].

Для решения задач сравнения, поиска максимальной эффективности при производстве изделия с несколькими независимыми переменными применима обобщенная функция желательности Харрингтона [166].

Вопросу влияния методов вторичного рафинирования и чистоты шихты на качество сталей 30–35ХГСА посвящена работа [167]. При помощи обобщенных функций желательности оценивали качество стали и экономические показатели передела.

Применение обобщенной функции желательности для разработки высокопрочных электродов приведено в работе [168]. Исследовалось влияние шести различных параметров оптимизации на комплексный показатель качества шва (обобщенную функцию желательности).

Планирование промышленных экспериментов и применение обобщенной функции желательности в литейном производстве описано в работе Ф. С. Новика [169].

#### **1.4 Безоблойная штамповка в комплексной технологии горячей штамповки**

Основным критерием эффективности технологии обработки металлов давлением является энерго- и ресурсосбережение. Технический уровень и

эффективность штамповочного производства оцениваются коэффициентом использования металла (КИМ) [24].

Наименьшее значение КИМ при штамповке на молотах: до 60 % массы заготовки идет в отход. При производстве штампованных деталей коэффициент использования металла изменяется от 28 % для деталей сложной формы до 75 % для деталей более простой конфигурации [170–173]. При облойной штамповке на прессах отходы металла могут достигать 50 %, причем большая часть металла уходит в стружку при обработке готовых поковок в механических цехах [171]. Около 75 % отходов металла при механической обработке готовых поковок составляют припуски и облой [174].

Одним из способов повышения коэффициента использования металла в кузнечно-штамповочном производстве является применение точной штамповки в закрытых штампах.

Первые рекомендации по технологии безоблойной штамповки начали появляться в конце 50-х годов прошлого столетия [170;174]. Исследованию процессов безоблойной штамповки занимались А. М. Ангервакс, О. А. Ганаго [12], А. З. Журавлева [173; 175;176], М. С. Эдуардов и др. [24; 170–184].

Способ безоблойной штамповки (штамповка в закрытых штампах) наиболее прогрессивен и экономичен. Он позволяет получать точную штампованную поковку с минимальной последующей обработкой резанием, значительно снизить себестоимость поковки и наиболее полно отвечает современным требованиям машиностроительного производства. При безоблойной штамповке окончательный штамповочный ручей представляет замкнутую полость, и поэтому объем исходной заготовки должен отличаться от объема готовой поковки лишь на величину угара [24].

К преимуществам безоблойной штамповки относятся [24]:

– снижение расхода металла на 20–25 % за счет отсутствия облоя и клещевины, уменьшения штамповочных уклонов и припусков, более точных размеров получаемой поковки;

- уменьшение силы деформирования за счет отсутствия облоя;
- наличие наиболее благоприятной для деформирования металла схемы напряженного состояния в виде неравномерного всестороннего сжатия;
- повышение механических свойств штампованной поковки, происходящее благодаря отсутствию перерезанных волокон металла и лучшему расположению волокон относительно возникающих при работе детали усилий;
- повышение производительности труда на 50–60 % в связи с уменьшением числа применяемых ручьев;
- облегчение механизации и автоматизации процессов штамповки в связи с уменьшением числа операций и отсутствием кантовки заготовок;
- значительное снижение себестоимости готовой поковки и трудоемкости последующей обработки резанием.

В работах [73; 185; 186] рассмотрено применение закрытых штампов для горячей объемной штамповки осесимметричных поковок. Установлено, что внедрение безоблойной штамповки позволяет получить экономию металла за счет отсутствия облоя, при этом качество поковок выше, чем при штамповке в открытых штампах.

Недостатком штамповки в закрытых штампах является повышенный износ штампов, возникающий при использовании заготовок, значительно превышающих объем готовой поковки. Для получения поковки высокого качества безоблойной штамповкой необходимо, чтобы объем заготовки был равен объему поковки, с учетом потерь на угар при нагреве. Допускается незначительный избыток металла заготовки (не более 1 %), который при штамповке вытесняется в компенсатор.

Так же для нормального процесса штамповки необходимо центрирование заготовки в штампе. Это позволит предотвратить одностороннее течение металла и повышенный износ штампа. Смещение заготовки приводит к возникновению брака и увеличению работы деформирования [180; 183].

Силовые условия штамповки в закрытых штампах приведены в работах А. З. Журавлева [173; 175; 176], рисунок 1.8.

Силовые условия штамповки осаживанием в закрытых осесимметричных штампах оптимальны, если после оформления закругления в углу наиболее труднодоступного участка действие внешних сил прекращается.

Для этого случая величина удельной силы следующая [173]:

$$p = \psi \cdot \sigma_T \left( 1 - \frac{2r_1}{d} \right)^2 + \sigma_T \left( 1,5 \ln \frac{1,5H_{II}}{2r_1} + \frac{12r_1}{d} - \frac{12r_1}{d^2} - \frac{4,5H_{II}}{d} + \frac{1,91H_{II}^2}{d^2} + \frac{d}{6H_{II}} - 1,5 \right), \quad (1.15)$$

где  $r_1$  – радиус закругления поковки у пуансона, мм;

$d$  – диаметр поковки, мм;

$H_{II}$  – высота поковки, мм;

$\psi \sigma_T = 2,07 \sigma_T$  – контактное напряжение в точке А при максимальном трении.

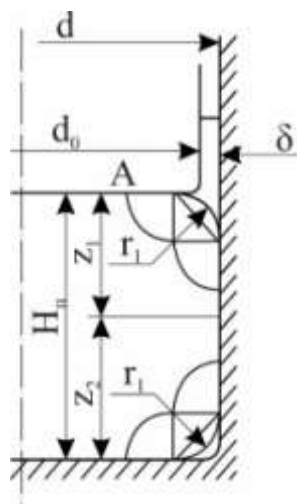


Рисунок 1.8 – Штамповка осаживанием в закрытом штампе

В процессе заполнения угла в зоне пуансона обычно заполняется и угол у дна матрицы. В результате перемещения деформируемого металла относительно стенок матрицы возникает сила трения, и удельная сила на подвижном пуансоне увеличивается:

$$p_{\Pi} = \psi \cdot \sigma_T \left(1 - \frac{2r_2}{d}\right)^2 + \sigma_T \left(1,5 \ln \frac{1,5H_{\Pi}}{2r_2} + \frac{12r_2}{d} - \frac{12r_2}{d^2} - \frac{4,5H_{\Pi}}{d} + \frac{1,91H_{\Pi}^2}{d^2} + \frac{d}{6H_{\Pi}} + \frac{2}{d}(H_{\Pi} - r_1 - r_2) - 1,5\right), \quad (1.16)$$

где  $r_2$  – естественный радиус закругления угла у дна матрицы, мм.

Нормальные напряжения на вертикальные стенки ручья при максимальном трении и заполнении углов можно найти по следующим зависимостям:

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_T} = 1,48 \ln \frac{z_1}{2r_1} + 2,07. \quad (1.17)$$

При построении от угла у дна матрицы:

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_T} = 1,48 \ln \frac{z_2}{2r_2} + 2,07, \quad (1.18)$$

здесь  $z$  – расстояние вдоль стенки матрицы от соответствующего угла до рассматриваемой точки.

При штамповке в закрытых штампах на кривошипных прессах избыток металла заготовки может привести к поломке деталей пресса. Для безопасной работы кривошипного пресса в штампе предусматривают магазин (компенсатор), который заполняется излишками металла заготовки [24; 187–189].

В этом случае, согласно работе [175], можно считать, что трение при затекании металла в зазор между пуансоном и матрицей (компенсатор) близко к нулю. Тогда предельная сила штамповки высоких поковок  $H_{II}/d > 0,2$  равно [176]:

$$p_{\Pi} = \psi \sigma_T + \sigma_T \eta^2 \left(1,48 \ln \frac{\eta}{1,71(\eta-1)} + 5,06 \frac{\eta-1}{\eta} - 2,16 \frac{(\eta-1)^2}{\eta^2} - 2,22\right), \quad (1.19)$$

где  $d$  – диаметр полости ручья, мм;

$d_g$  – диаметр пуансона, мм;

$\psi = 2,85$ ;

$\eta = d/d_g$ .

Если область пластической деформации распространяется на всю высоту поковки ( $H_{II}/d < 0,2$ ), то удельная сила:

$$p_{\Pi} = \psi \sigma_T + \sigma_T \eta^2 \left( 1,51 \ln \frac{1,5H_{\Pi}}{1,71(\eta-1)} + 5,06 \frac{\eta-1}{\eta} - 2,16 \frac{(\eta-1)^2}{\eta^2} - 4,4 \frac{H_{\Pi}}{d_B} + 1,91 \frac{H_{\Pi}^2}{d_B^2} + d_B H_{\Pi} - 1,5 \right) \quad (1.20)$$

Большое количество исследований по штамповке металла в закрытых штампах (closed die) выполнено за рубежом [190–204].

Так, в работах [190; 191] проведено трехмерное моделирование процесса объемной штамповки в закрытых штампах. На основании исследования авторы установили влияние формы поковки на потребную силу деформирования, эффективные пластические деформации и напряжения.

С применением компьютерного моделирования исследовались процессы объемной штамповки различных видов шестерен в закрытых штампах [192–199].

В работах [200; 201] на основании результатов компьютерного моделирования выявляли влияние размеров заготовки и конфигурации предварительного ручья штампа на силу штамповки в закрытом штампе.

М. W. Schleider [202] исследовал заполнение металлом полости штампа в процессе безоблойной штамповки, а также влияние различных значений коэффициентов трения на деформированное состояние поковки.

Одним из перспективных направлений развития кузнечно-штамповочного производства является полугорячая точная штамповка выдавливанием. Точная штамповка выдавливанием позволяет получать поковки, которые по форме и размерам приближаются к готовым деталям, что позволяет свести к минимуму последующую обработку резанием. Коэффициент использования металла может быть доведен до 98 % [205].

Согласно А. Г. Овчинникову [205] процесс выдавливания (рисунок 1.9) обычно разбивают на три стадии: осадка заготовки (распрессовка), свободное выдавливание и выдавливание с заполнением гравюры торца поковки. Первые две стадии характерны и для процесса прямого прессования.

Основными параметрами, которые определяют технологические режимы прямого выдавливания (прессования), являются: форма и размеры готовой

поковки, форма и размеры исходной заготовки, прессуемый металл, температура нагрева заготовки и прессования, скорость деформации, применяемая смазка, сила прессования и др.

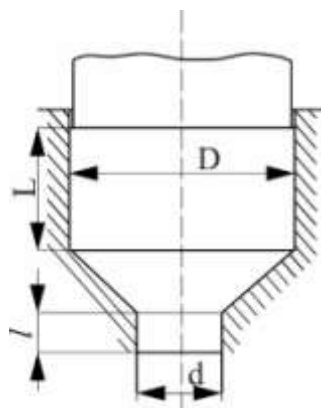


Рисунок 1.9 – Схема штамповки выдавливанием

Наиболее широко представлена литература по технологии холодной объемной штамповки прямым выдавливанием, где приводятся данные по классификации деталей по технологичности, проектировании технологических процессов и расчете переходов, проектирование и расчет инструмента [84; 206–210].

При штамповке выдавливанием происходит истечение металла, заключенного в замкнутую плоскость, через отверстия в ней, форма которого определяет поперечное сечение выдавливаемого участка деформированной заготовки. Прессование уже давно широко распространено для производства прутков, профилей и труб из различных металлов. С. Е. Pearson [211] приводит данные о том, что уже в XVII веке этот процесс применяли для производства свинцовых труб из расплавленного металла.

Родоначальником научного изучения процессов прессования был Н. Tresca [212], опубликовавший в 1864 г. предварительные итоги экспериментов по штамповке и выдавливанию. Основоположниками работ в области физики процессов прессования являются российские ученые С. Н. Курнаков и

С. Ф. Жемчужный [88]. Экспериментальные и теоретические исследования проводил С. Н. Губкин [89–91].

Большие обобщающие работы по технологии прессования принадлежат П. С. Истомину [213]. Фундаментальный труд по теории штамповки и прессования создал А. А. Шофман [214]. Большую работу по теории прессования проделал Н. Л. Перлин [215].

Детали и изделия, полученные методом пластического деформирования, называют точными или прецизионными, если их важные функциональные элементы и поверхности готовы к сборке или имеют припуск под финишную обработку, например под шлифование.

Штамповка выдавливанием, не отличаясь принципиально от процесса прессования прутков, профилей и труб, тем не менее, имеет свои характерные особенности [216]. При штамповке выдавливанием:

- расстояние от торца пуансона до дна матрицы в конце рабочего хода обусловлено заданным размером утолщенного элемента поковки, а не толщиной минимального допустимого пресс-остатка;
- длина стержневой части поковки определяется ее конструкцией, но в то же время возможность выполнения стержневой части ограничена параметрами прессы;
- поковка извлекается из штампа при обратном ходе прессы при помощи выталкивателя, а не отделяется от пресс-остатка, как пруток при прессовании.

Впоследствии к изучению процессов прессования был применен метод линий скольжения [217; 218].

Большой вклад в решении задач прессования внесли российские ученые В. В. Соколовский [219], Л. А. Шофман [220], А. Д. Томленов [221] и др.

В работе [222] (рисунок 1.10) показаны поля линий скольжения при прессовании прямым методом идеального жесткопластического тела в условиях деформации для  $\tau_k = 0,5\sigma_T$  и для  $\tau_k = 0$ . Такие поля линий скольжения для прессования предложил Р. Хилл [217].



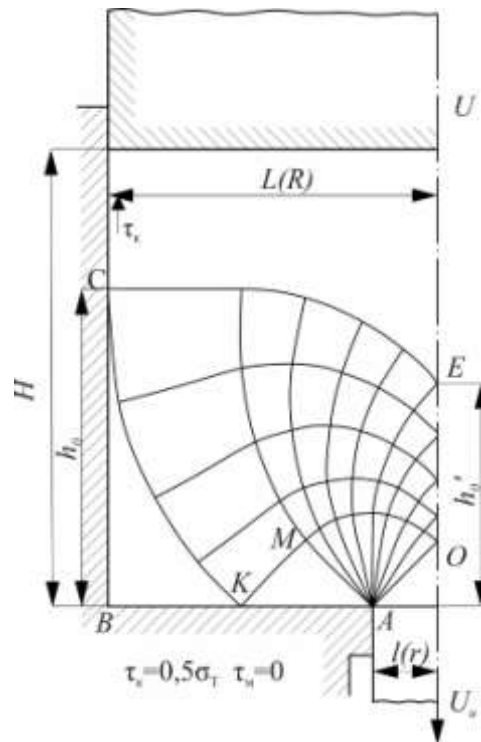


Рисунок 1.11 – Поле линий скольжения для прямого прессования при смешанных граничных условиях

Поля линий скольжения для прессования через конические матрицы показаны на рисунке 1.12.

В работе [221] наряду с полями линий скольжения для различных случаев прессования приведены годографы скоростей и расчетные формулы для удельной силы прессования.

Так, при прессовании через гладкий контейнер (рисунок 1.13) с обжатием  $\varepsilon = 0,5$  удельные силы прессования можно определить по зависимости:

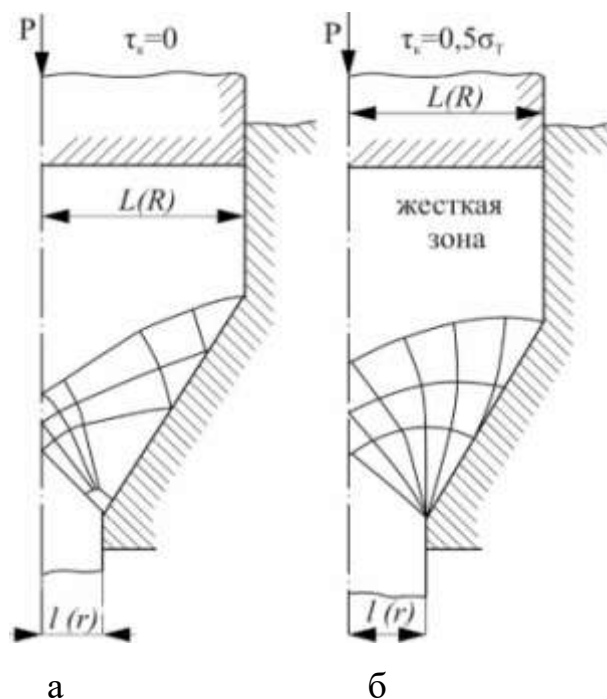
$$q = 2k \left( 0,5 + \frac{\pi}{4} \right). \quad (1.21)$$

где  $q$  – средняя удельная сила;

$k$  – пластическая постоянная.

При прессовании через гладкий контейнер с обжатием  $\varepsilon = 0,67$  (рисунок 1.13) удельная сила прессования составляет:

$$q = \frac{4k}{3} \left( 0,5 + \frac{\pi}{2} \right). \quad (1.22)$$



а –  $\tau_k = 0$ ; б –  $\tau_k = 0,5\sigma_T$

Рисунок 1.12 – Поле линий скольжения через коническую матрицу при граничных условиях  $\tau_k = 0$  и  $\tau_k = 0,5\sigma_T$

Позже В. Джонсон и Х. Кудо [222] разработали метод верхних оценок. Сущность его заключается в том, что объем очага деформации представляется в виде жестких (недеформируемых) блоков, скользящих один относительно другого и по граням с жесткой зоной. Вдоль границ блоков компоненты скоростей перемещений претерпевают разрывы. Внутри каждого блока поле скоростей однородно. Число и размеры блоков первоначально выбирают произвольно.

Верхнеграничную нагрузку можно вычислить по зависимости:

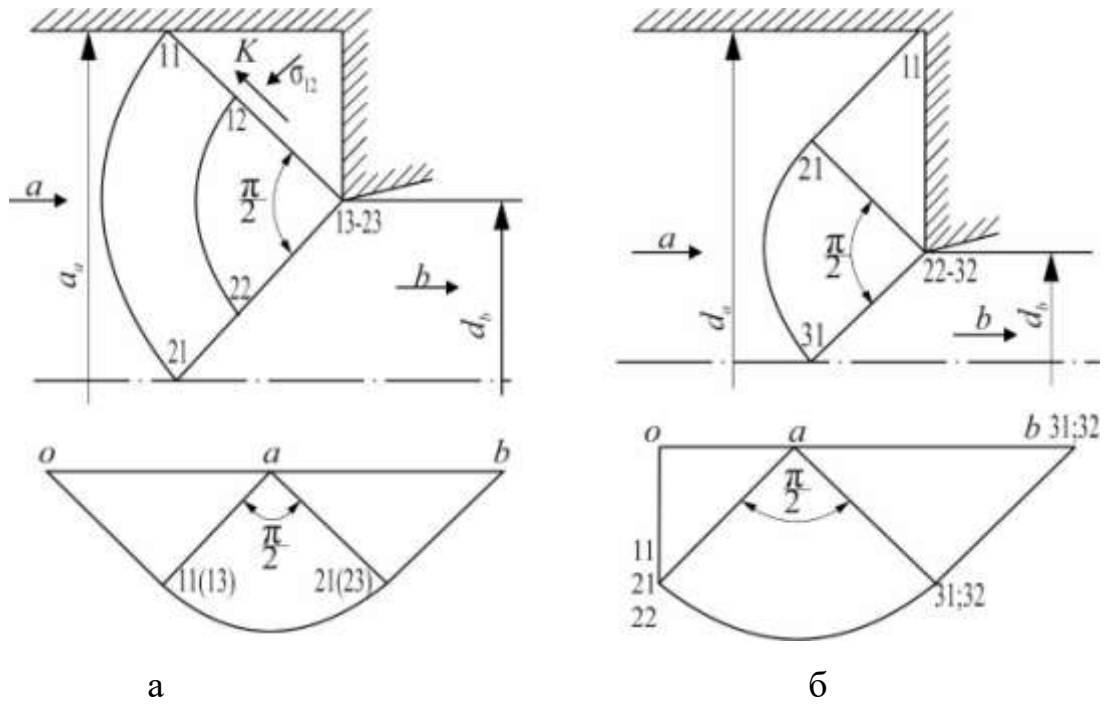
$$p_{\text{ср}} \cdot 2H = \frac{2\sigma_T}{\sqrt{3}} \left( BC \frac{PQ}{U} + CA \frac{QR}{U} \right), \quad (1.23)$$

где  $BC$  и  $CA$  – длины линий скольжения;

$PQ$  и  $QR$  – скорости разрыва из годографа.

Для решения задач прессования в дальнейшем использовали методы визиопластичности [223; 225; 226] и линий тока [204; 227; 228]. В последнее время для анализа напряженного и деформированного состояния металла при

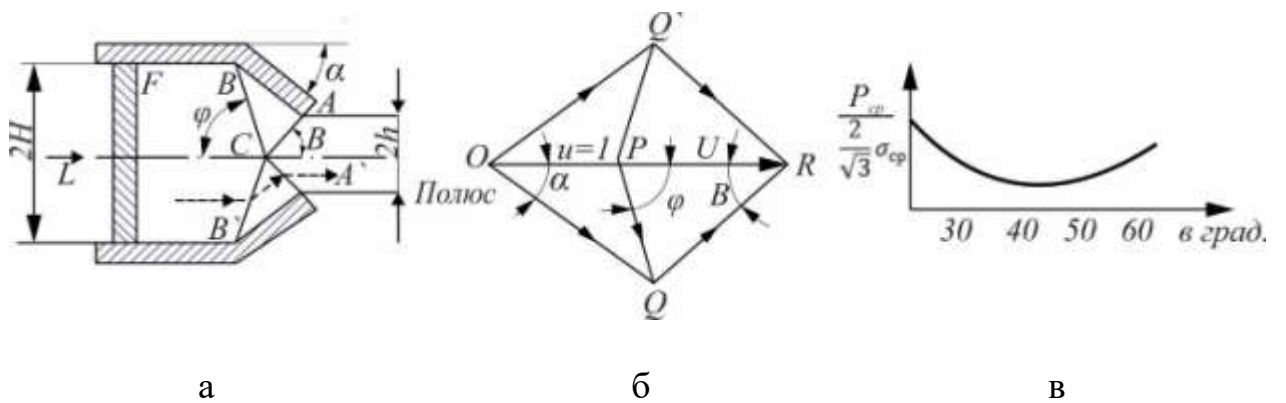
процессах прессования и выдавливания широко используется метод конечных элементов. [1; 229; 230].



$a - \epsilon = 0,5; \text{ б} - \epsilon = 0,67$

Рисунок 1.13 – Поле линий скольжения и скоростей для прессования обжатием

На рисунке 1.14 приведен пример решения задачи прессования [223].



а – физическая картина блоков; б – голограф скоростей;

в – нахождение минимальной силы прессования

Рисунок 1.14 – Метод верхней оценки

Прогрессивность закрытой малоотходной и безотходной объемной штамповки по сравнению с открытой объемной штамповкой достаточно полно обоснована в работах [231–233].

## **1.5 Компьютерное моделирование в комплексной технологии горячей штамповки**

Решение теоретических задач обработки металлов давлением можно проводить, используя аналитические зависимости или используя численные методы. К численным методам относятся метод конечных разностей (МКР), метод конечных элементов (МКЭ) и метод граничных элементов (МГЭ). В настоящее время наиболее эффективным численным методом решения задач обработки металлов давлением является метод конечных элементов.

### **1.5.1 Основные понятия метода конечных элементов**

Метод конечных элементов (МКЭ) является общим численным методом для решения задач обработки металлов давлением. Он основан на замене исследуемого объекта на конечное число треугольных или четырехугольных элементов [234]. При этом элементы соединены только в узловых точках (узлах), и силы не могут передаваться через боковую поверхность элементов. Элементы и узлы пронумерованы так, что соседние элементы или узлы имеют близкие номера, рисунок 1.15 [235].

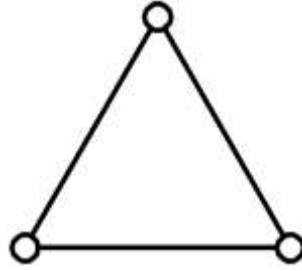


Рисунок 1.15 – Тип конечного элемента, используемый при решении задач деформации несжимаемых сред

При небольшом перемещении инструмента узлы перемещаются в новое положение. Перемещения узлов считаются неизвестными параметрами, которые позднее предстоит определить при заданных граничных условиях. В двумерной модели неизвестных параметров вдвое больше, чем узлов, поскольку каждому узлу соответствует две компоненты перемещения  $w_x$  и  $w_y$  в направлениях  $x$  и  $y$ . Приращения напряжений и деформаций могут быть определены в результате вычисления перемещения узлов. Нелинейность, связанная с геометрическими изменениями, а также со свойствами материала при пластической деформации, для проведения вычислений требует разбить весь процесс деформирования на ряд этапов. Для получения соответствующих значений координат, деформаций и напряжений вычисленные приращения следует прибавлять к значениям, полученным на предыдущих этапах [235].

Развитию вариационных методов решения задач теории обработки металлов давлением и применению МКЭ способствовали работы И. Я. Тарновского, А. А. Илюшина, В. И. Кузьменко, Дж. Оден и др. [236–244]

Результаты моделирования процессов обработки металлов давлением с применением метода конечных элементов впервые отражены в работах С. Н. Lee, [245], G. C. Cornfield, [246], O. C. Zienkiewicz [247]. М. А. Sebastian представил результаты исследования трехмерного моделирования процесса прессования [248].

В настоящее время получение надежных трехмерных решений является основным направлением развития методов компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением [249].

### **1.5.2 Применение метода конечных элементов**

Моделирование процессов обработки металлов давлением начало активно развиваться с появлением специализированных компьютерных программ конечно-элементного анализа.

Применение компьютерного моделирования на стадии разработки технологических процессов обработки металлов давлением позволяет выявить недостатки принятой технологии, что приводит к устранению причин возникновения возможного брака [250–252].

Новые компьютерные технологии и эффективность применения компьютерного моделирования изложены в работах [251–262].

X. Ren [259] использовал Deform 3D для определения влияния основных параметров (угол подачи, скорость вращения валков) на процесс поперечно-винтовой прокатки и точность изготовления шаров.

В статье [260] представлена математическая модель поперечно-винтовой прокатки шаров, спроектированная на основе метода конечных элементов в программе Forge NxT v.1.1. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показало высокое совпадение, как в качественном, так и в количественном отношении. Разработанная модель была использована для исследования влияния формы реборды на процесс поперечно-винтовой прокатки шаров диаметром 125 мм.

Результаты моделирования процесса поперечно-винтовой прокатки представлены в работах Z. Pater, Q. Cao, X. Ren и др. [259–265]. Программа

DEFORM-3D использовалась для моделирования процесса поперечно-винтовой прокатки помольных шаров в работах [266–269].

Современные программы компьютерного моделирования оказывают высокую сходимость расчетных и практических данных [270; 271].

Конкретные примеры применения метода конечных элементов для моделирования штамповки в закрытых штампах с последующей проверкой адекватности полученных результатов приведены в работах [272–285].

В работе [77] проведено исследование деформированного состояния металла при горячей безоблойной штамповке. Исследована штамповка осесимметричных поковок из цилиндрической и шаровой заготовок. Отмечено снижение силы и неравномерности деформации при штамповке поковок круглых в плане из шаровой заготовки. Разработан технологический процесс штамповки шестерни, в котором сокращено количество переходов штамповки и уменьшен расход металла ввиду отсутствия облоя.

Системы автоматизированного моделирования процессов обработки металлов давлением QForm3D, MSC.SuperForge, DEFORM и др. получили широкое применение для решения технологических задач процессовковки, штамповки, прокатки и др. Эти программы позволяют моделировать не только формоизменение металла в штампе и напряженно-деформированное состояние металла, но и прогнозировать образование дефектов типа «зажим» и «трещина» [253].

Кроме специализированных программ, используются другие программные продукты – программы Forge, Finel, PressForm, Splen-S(Press), FutoForge, VeraCad и др., которые охватывают более узкие проблемы моделирования процессов ОМД.

Также следует отметить применение среды ANSYS, которая широко применяется для моделирования различных процессов штамповки, прокатки и др. Широко известен модуль LS-Dyna, предназначенный для решения высоконелинейных задач обработки давлением с упрочнением материала.

Учитывая достигнутый уровень развития моделирования технологических процессов, стало возможным ввести термин «виртуальное производство» [253].

Этот процесс объединяет в себе имитационное компьютерное моделирование изделий и процесс их изготовления. В основе процесса моделирования лежат методы конечно-элементного анализа, которые позволяют получать детальную информацию о производимом продукте и осуществлять оптимизацию по ключевым факторам, влияющих на стоимость изготовления изделий. Основными факторами являются технологичность, конечная форма, уровень остаточных напряжений и срок службы изделия.

С помощью МКЭ возможно моделировать в виртуальной среде испытания по совершенствованию конструкции штампового инструмента. Виртуальное проектирование дешевле, чем создание физических моделей и оптимизации методом проб и ошибок, так как ошибки тоже виртуальные [286].

Тем не менее, компьютерное моделирование не может полностью заменить физическое моделирование, так как компьютерное математическое моделирование пока не столь совершенно.

Однако на современном этапе компьютерного моделирования можно сократить число физических испытаний, а значит, и количество необходимых образцов, и также оснастки для проведения физического моделирования. Это приводит к уменьшению расходов материала на образцы и оснастку, что, в конечном счете, снижает затраты.

## Выводы по главе 1

По итогам проведенного обзора литературы, современного состояния теории и практики производства поковок круглых в плане методом горячей штамповки и деталей, получаемых штамповкой выдавливанием установлено:

1. Существующая комплексная технология горячей штамповки (КТГШ) для серийного и массового производства поковок круглых в плане (штампующихся в торец) не является оптимальной.

2. Разделение прутка на заготовки в штампах или ножницах сопровождается рядом дефектов, среди которых: скол, непараллельность торцов заготовки, вмятины, утяжины и др. При этом отклонение массы заготовки от номинала достигает 7–12 %. Известный метод разделения прутка на станах поперечно-винтовой прокатки редко применяется на практике в связи с тем, что вопросы калибровки прокатных валков и напряженно-деформированное состояние металла при прокатке на шаропркатных станах изучены недостаточно.

3. Влияние температуры на сопротивление металла деформации, его пластические свойства и величину угара при нагреве изучены достаточно подробно, однако при температурах полугорючей штамповки 600–900 °С таких исследований мало. Отсутствуют комплексные исследования сопротивления металла деформации, его пластических свойств и величины угара при нагреве на одной марке стали. Отсутствуют и аналитические уравнения для расчета рациональной температуры нагрева в зависимости от сопротивления металла деформации, его пластических свойств и величины угара.

4. При анализе результатов исследований российских и иностранных литературных источников в области безоблойной штамповки установлено, что большинство работ имеют прикладной характер. Мало научных работ, посвященных вопросам исследования полугорючей штамповки. Всего несколько

работ посвящено разработке технологии штамповки поковок с использованием шаровой заготовки. Отсутствуют исследования напряженно-деформированного состояния металла и методики расчета силовых параметров для процесса полугорячей штамповки. При прямом выдавливании отсутствуют исследования напряженно-деформированного состояния металла в закрытых штампах.

5. Проанализированные работы по компьютерному моделированию в основном имеют прикладной характер. Чаще всего моделируют штамповку зубчатой шестерни, поршня, штамповку трудно деформируемых сплавов. Много работ посвящено оптимизации конструкции штампов для закрытой штамповки. Работы по исследованию напряженно-деформированного состояния металла при штамповке в закрытых штампах отсутствуют.

## Научные проблемы, цель и задачи исследования

Одним из перспективных направлений развития теории, разработки новых и совершенствования действующих технологий обработки металлов давлением является разделение прутка на заготовки, точные по массе, энергосберегающий нагрев до температур полугорячей штамповки и ресурсосберегающая деформация заготовки в закрытых штампах (безоблойная штамповка), что в совокупности составляет комплексную технологию полугорячей штамповки (КТПШ). Реализация этого направления исследований требует глубокой теоретической и практической проработки, накопления экспериментальных данных по малоизученным явлениям и процессам, которые протекают при пластической деформации металла. В связи с этим была поставлена цель диссертации: повышение эффективности производства поковок точных по массе, разработка процессов полугорячей безоблойной штамповки и создание комплексной ресурсосберегающих технологии производства стальных изделий ответственного назначения.

Исходя из цели работы, определены научные проблемы, требующие решения:

– отсутствует технология производства точных по массе шаровых заготовок для штамповки в закрытом штампе. Отсутствует, калибровка валков стана поперечно-винтовой прокатки для разделения металла на точные по массе шаровые заготовки; отсутствует методика расчета калибровки валков стана поперечно-винтовой прокатки для производства точных по массе шаровых заготовок;

– отсутствуют методики моделирования методом конечных элементов процесса разделения металла на точные по массе шаровые заготовки методом поперечно-винтовой прокатки. Отсутствуют данные по распределению значений интенсивности деформаций и интенсивности напряжений, среднего нормального

напряжения по объему металла в процессе разделения металла на шаровые заготовки.

– отсутствуют данные по пластичности, сопротивлению металла пластической деформации и величине поверхностного угара стали в интервале температур полугорячей штамповки. Отсутствуют данные по рациональным температурным интервалам нагрева различных марок стали для полугорячей штамповки.

– отсутствуют данные по распределению значений интенсивности деформаций и интенсивности напряжений, среднего нормального напряжения по объему металла, использования ресурса пластичности в процессе полугорячей штамповки осесимметричных поковок из точной шаровой заготовки в закрытых штампах;

– отсутствует технология производства высокоточных шаровых заготовок диаметром до 120 мм с повышенным качеством поверхности и однородностью макроструктуры на станах поперечно-винтовой прокатки 40-80.

Для решения научных проблем определены следующие задачи диссертации:

1. Повысить эффективность процессов получения точных по массе и размерам заготовок для безоблойной штамповки посредством разделения прутков на станах поперечно-винтовой прокатки и снижения температур нагрева металла:

– разработать новую методику расчета калибровки валков стана поперечно-винтовой прокатки с целью получения шаровых заготовок для полугорячей безоблойной штамповки стальных поковок;

– разработать новую калибровку валков шаропрокатного стана для производства шаровых заготовок повышенной точности по массе;

– с использованием детерминированных математических моделей исследовать напряженно-деформированное состояние металла в процессах прокатки шаровых заготовок на станах поперечно-винтовой прокатки, полугорячей штамповки и штамповки выдавливанием в закрытых штампах.

2. Исследовать пластичность, сопротивление деформации, угар сталей ст3сп, 20, 20ХН, 40, 40Х, 40ХН, 65Г, 35ХГСА, 18ХГТ, 18Х2Н4МА и научно обосновать рациональный интервал температур полугорячей штамповки.

3. Установить и научно обосновать зависимости и закономерности влияния формы, температуры нагрева заготовок, пластических и прочностных свойств металла на энергосиловые параметры процессов деформации, напряженно-деформированное состояние металла и вероятность дефектообразования.

4. Освоить в условиях стана поперечно-винтовой прокатки 40-80 новую калибровку и производство высокоточных шаровых заготовок диаметром до 120 мм с повышенными качеством поверхности и однородностью макроструктуры.

5. Разработать и внедрить в производство энерго- и ресурсосберегающую комплексную технологию полугорячей штамповки в закрытых штампах из шаровой заготовки круглых в плане поковок точных по массе симметричных и несимметричных (относительно горизонтальной оси), типа «шестерни» и поковок, изготавливаемых прямым выдавливанием из цилиндрической заготовки, типа «корпуса форсунки».

## **2 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ**

Как было отмечено ранее, современная технология горячей штамповки представляет собой сложный комплекс различных по своему характеру операций: разделение металла на заготовки; нагрев металла под штамповку; штамповка. При разработке технологии штамповки помимо основных операций необходимо учитывать и их взаимосвязь [20].

В данной работе разделение металла на заготовки предлагается проводить на стане поперечно-винтовой прокатки. В качестве исходной заготовки для штамповки принимаем шаровую заготовку [73; 287–293]. Нагрев металла перед штамповкой производится в индукционном нагревателе до температур ниже 900 °С (полугорячая штамповка), далее заготовка штампуется в закрытых штампах (безоблойная штамповка) [24].

В таблице 2.1 приведены достоинства и недостатки операций комплексной технологии полугорячей штамповки [292].

При решении задачи проектирования комплексной технологии полугорячей штамповки был использован метод численного математического моделирования – метод конечных элементов.

Порядок создания математической модели и получения результатов моделирования заключается в следующем:

На первом этапе описываются исходные данные природы:

- готовое изделие: геометрические размеры, масса, марка стали, чистота поверхности, припуски и допуски;
- заготовка: конфигурация, геометрические размеры, масса, отклонения по массе, качество поверхности и отсутствие внутренних дефектов, марка стали,

теплотехнические характеристики стали, сопротивление деформации, пластические свойства и угар металла при температурах обработки давлением.

– оборудование и рабочий инструмент (пресс, прокатный стан, прокатные валки, штампы): конфигурация калибра, гравюры штампа, геометрические размеры, марка стали, теплофизические характеристики стали, чистота поверхности рабочего инструмента, скорость деформации, технология процесса.

Таблица 2.1 – Операции комплекса технологий полугорячей штамповки

| Операция                                   | Технологические особенности  | Достоинства   | Недостатки   |
|--|--|---|--|
| Разделение прокатанной штанги на заготовки | Нагрев металла до 700–1100 °С.<br>Разделение штанги на шаровые заготовки на прокатном стане поперечно-винтовой прокатки.<br>Получение шаровой заготовки. | Безотходная технология.<br>Высокое качество поверхности шаровой заготовки.<br>Точность заготовок по массе.<br>Разброс по массе составляет до 1–8 %<br>Высокая производительность.<br>Один прокатный стан заменяет 7–8 механических прессов для разделения штанги на заготовки.<br>Высокая степень механизации и автоматизации прокатного стана. | Трудности перестройки стана на другой профиль.<br>Можно использовать при серийном и массовом производстве поковок.<br>Требуется дополнительное оборудование.<br>Повышение себестоимости шаровой заготовки на 10 %. |
| Нагрев заготовки перед штамповкой          | Нагрев шаровых заготовок до 800–900 °С.  | Отсутствие окалины и обезуглероживания металла.<br>Равномерный нагрев заготовки.<br>Удовлетворительные пластические свойства металла и сопротивления металла деформации.  | Необходимость контроля температуры нагрева.  |
| Штамповка                                  | Штамповка в закрытых штампах без облоя.  | Хорошее центрирование шаровой заготовки.<br>Отсутствие предварительных операций осадки заготовки и обрезки облоя.<br>Получение поковок точных размеров и хорошего качества.<br>Снижение силы штамповки на 25–30 %.<br>Повышение производительности труда на 50–60 %.  | Более сложная конструкция штампов.   |

На втором этапе для изучения формоизменения металла при его обработке давлением по исходным данным создаются виртуальные объекты компьютерного моделирования: оборудование, рабочий инструмент, заготовка. Задаются параметры технологического процесса.

Виртуальные объекты компьютерного моделирования, такие как размеры, конфигурация, марка стали и заготовки, равны размерам натуре, технологический процесс в виртуальном объекте соответствует натуральному (изучаемому) технологическому процессу. Готовое виртуальное изделие имеет форму и размеры натуральной готовой продукции.

С помощью спроектированных виртуальных объектов было проведено компьютерное моделирование технологических процессов: разделение металла на шаровые заготовки на стане поперечно-винтовой прокатки, штамповка поковок круглых в плане, а также штамповка выдавливанием.

Моделирование выполняли с использованием программных продуктов QForm-3D (лицензия № R0-U1791-091214Y100) и Deform 3D (лицензионный договор № TES-06/2016-AS от 23.03.2016 г.). Данные программные продукты позволяют моделировать заполнение штампа металлом, образование и развитие дефектов, изменение по времени и по объему компонентов тензора напряжений и деформаций, инвариантные характеристики напряжения и деформации, изменение по времени деформирующей силы, температурные условия деформации металла, износ штампа и другие величины при формоизменении металла.

Напряженно-деформированное состояние металла определяли, используя основные инвариантные характеристики:

интенсивность деформаций:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}, \quad (2.1)$$

интенсивность напряжений:

$$\sigma_i = ((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)^{0,5}, \quad (2.2)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – линейные деформации по осям 1–3;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные нормальные напряжения по осям 1–3.

среднее нормальное напряжение:

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}. \quad (2.3)$$

Или гидростатическое давление  $\sigma_0$ , причем  $\sigma_0 = -\sigma_{\text{ср}}$  [120].

Кроме того, в отдельных областях деформируемого изделия, где имеются растягивающие напряжения, проверяли условия деформации металла без разрушения.

Ключевым вопросом при разработке технологического процесса обработки металлов давлением является решение задачи по определению величины предельного формоизменения металла в штампе. Задачи анализа предельного формоизменения металла относятся к числу самых сложных, поэтому в общем виде они пока не решены [124]. В отечественной науке наибольшее распространение оценки пластичности и прогнозирования разрушения металла получили методики, связанные с оценкой повреждаемости металла – В. Л. Колмогорова, А. А. Богатова [94; 106; 120; 121; 123; 124].

В зарубежных исследованиях чаще используют энергетическую модель Кокрофта-Латэма, на которой основан программный комплекс Deform 3D. Согласно этой модели, разрушение металла происходит, если работа деформации достигает критического значения – показателя Кокрофта-Латэма.

## **2.1 Напряженно-деформированное состояние металла при разделении на шаровые заготовки на станах поперечно-винтовой прокатки**

Одним из основных факторов процесса прокатки шаров в винтовых калибрах является определение режимов деформации, при которых отсутствует разрыхление металла и вскрытие полости в осевой зоне изделия [293].

Исследование напряженно-деформированного состояния металла при его обработке давлением с точки зрения математического моделирования является сложным процессом из-за большого числа определяющих параметров и неоднозначным характером их влияния. Корректная постановка задачи даже для простых случаев обработки металлов давлением приводит к системе интегрально-дифференциальных уравнений, решить которую аналитически не представляется возможным. Однако в настоящее время для решения подобных задач широко применяется метод конечных элементов, реализованный в программных продуктах конечно-элементного анализа. Исследования напряженно-деформированного состояния металла позволяют оценить проработку структуры металла, неравномерности деформации по объему детали, измельчения и распределения по объему неметаллических включений, а также анизотропию свойств металла. При моделировании инструменты принимаются абсолютно жесткими и обеспечивают только теплопроводность и теплопередачу. Материал инструмента принимается в каждом отдельном случае моделирования. Взаимодействие между жестким инструментом и материалом заготовки моделируется с помощью контактных поверхностей. В процессе деформации контактные условия постоянно обновляются. Величина коэффициента трения принимается отдельно для каждого технологического процесса.

В процессе деформации металла происходит теплообмен между металлом, инструментом и окружающей средой. Учитывается также наличие теплового эффекта за счет деформации металла. Начальная температура деформации рассчитывается из условий конкретного технологического процесса.

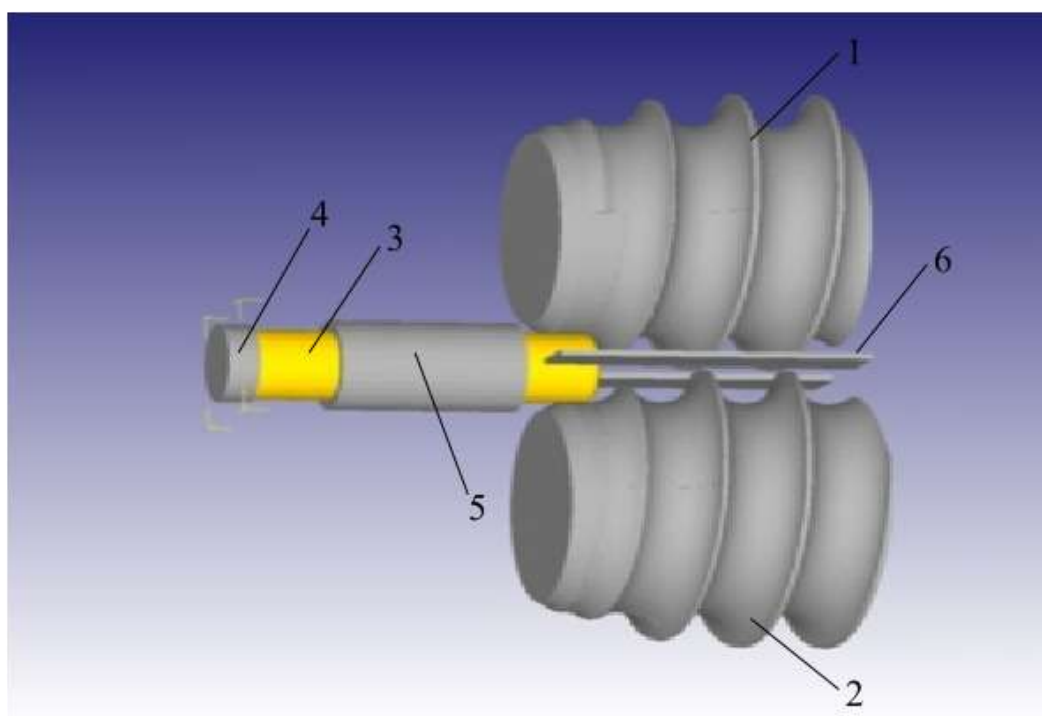
Для моделирования разделения металла на шаровые заготовки была разработана виртуальная модель стана поперечно-винтовой прокатки, рабочие валки которого имеют профиль в соответствии с разработанной калибровкой шаровой заготовки номинальным диаметром 120 мм [293].

На рисунке 2.1 представлена виртуальная схема расположения прокатных валков и стального прутка в начальном положении перед разделением металла на

шаровые заготовки. В соответствии с реальным технологическим процессом для моделирования были выбраны:

- материал прокатных валков – сталь 35ХГСА;
- температура валков 200 °С;
- заготовка сталь марки 40;
- температура нагрева заготовки 1100 °С;
- коэффициент трения равен 0,4;
- скорость вращения валков 60 об/мин.

При исследовании напряженно-деформированного состояния при прокатке шара пренебрегали инерционными силами, деформируемый металл заготовки принимаем несжимаемым. В уравнениях состояния использовали случай простого нагружения. Для материала проката принята упругопластическая модель.



1 и 2 – прокатные валки, 3 – нагретая заготовки, 4 – толкатель, 5 – проводка,  
6 – линейки

Рисунок 2.1 – Начальное положение прутка при разделении металла на шаровые заготовки

В работах [293–297] приведены результаты компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния металла при прокатке шаровых заготовок.

Исследование формоизменения металла при разделении на шаровые заготовки показало, что нагретая заготовка в виде прутка горячекатаной стали хорошо захватывается валками, процесс прокатки происходит стабильно без пробуксовок. Металл заготовки полностью заполняет калибры. Зазора между металлом и стенками калибра не наблюдалось. Перемычки, соединяющие отформованные шары, полностью отделяются непосредственно в валках стана. При этом перемычка срезается ребордой валков и вдавливается в тело шара. Отделенный шар продолжает обкатываться на отделочном участке калибра, остатки перемычки заглаживаются, и из валков выходит полностью оформленная шаровая заготовка шар, имеющая гладкую поверхность [297].

Полный процесс прокатки с момента захвата металла валками до получения готовой шаровой заготовки происходит за 3,5 полных оборота валков.

Исследование напряженно-деформированного состояния металла проводили в 5 характерных точках вдоль оси прокатки при повороте валков последовательно на  $90^0$ : 1 – передний торец валков; 2 – внедрение первой реборды; 3 – центр первого шара; 4 – внедрение второй реборды; 5 – центр второго шара [293; 294].

На рисунке 2.2 приведена мозаика распределения интенсивности деформаций при разделении металла на шаровые заготовки и график изменения интенсивности деформаций по оси прокатки.

Как видно из рисунка 2.2, интенсивность деформаций по объему металла распределена неравномерно. Анализ данных показал, что интенсивность деформаций по оси прокатываемой заготовки имеет небольшие значения. Выделяется более высокая интенсивность деформаций под второй ребордой (точка 4), радиус перемычки в которой составляет 18 мм.

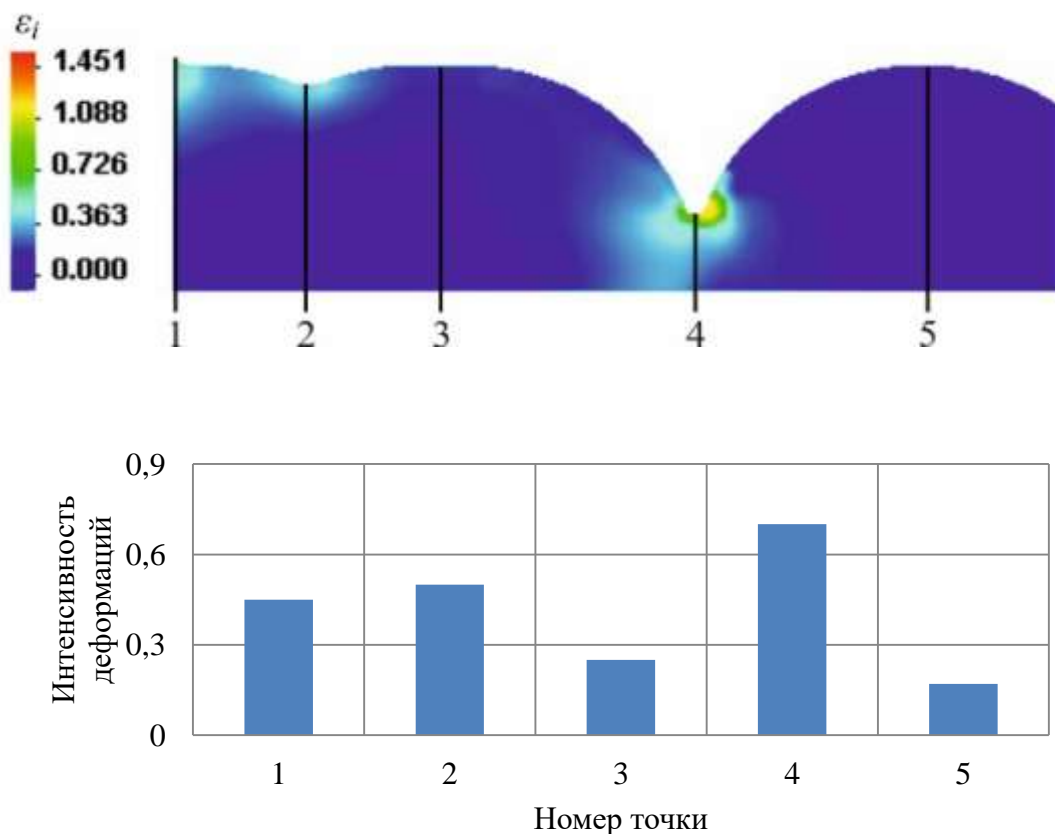
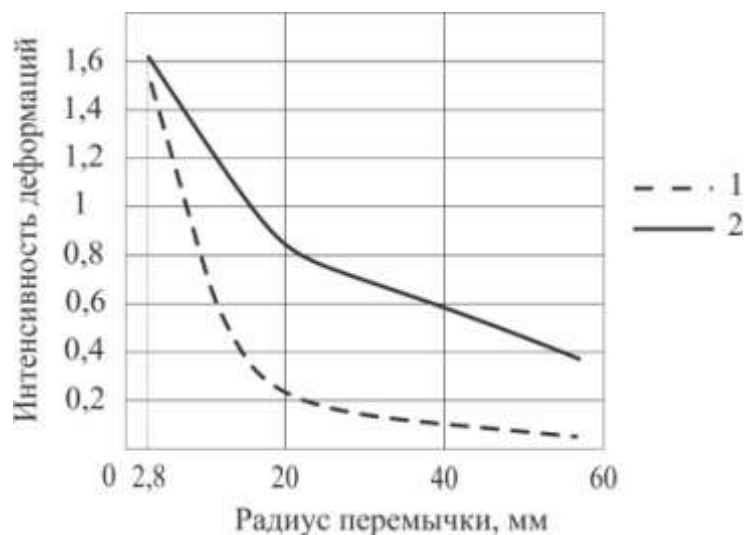


Рисунок 2.2 – Распределение интенсивности деформаций при разделении металла на шаровые заготовки

Результаты обработки данных компьютерного моделирования приведены на рисунке 2.3 в виде графика зависимости интенсивности деформаций от радиуса перемычки при прокатке шара:

- по оси симметрии заготовки (1);
- в месте касания валков с ребордой (2).

Из рисунка 2.3 видно, что максимальное значение интенсивности деформаций наблюдается непосредственно под ребордой прокатных валков и при радиусе перемычки 2,8 мм достигает 1,62. С увеличением радиуса перемычки величина интенсивности деформаций уменьшается. Интенсивность деформаций также уменьшается от поверхности реборды валка к осевой линии заготовки [293].



1 – по оси симметрии заготовки; 2 – в месте касания валков с ребордой

Рисунок 2.3 – Зависимость интенсивности деформаций от радиуса перемычки

На рисунке 2.4 приведена объемная модель распределения интенсивности напряжений при прокатке шаровой заготовки. Слева приведена масштабная шкала для определения величины интенсивности напряжений. Можно отметить, что процесс прокатки симметричен относительно горизонтальной плоскости.

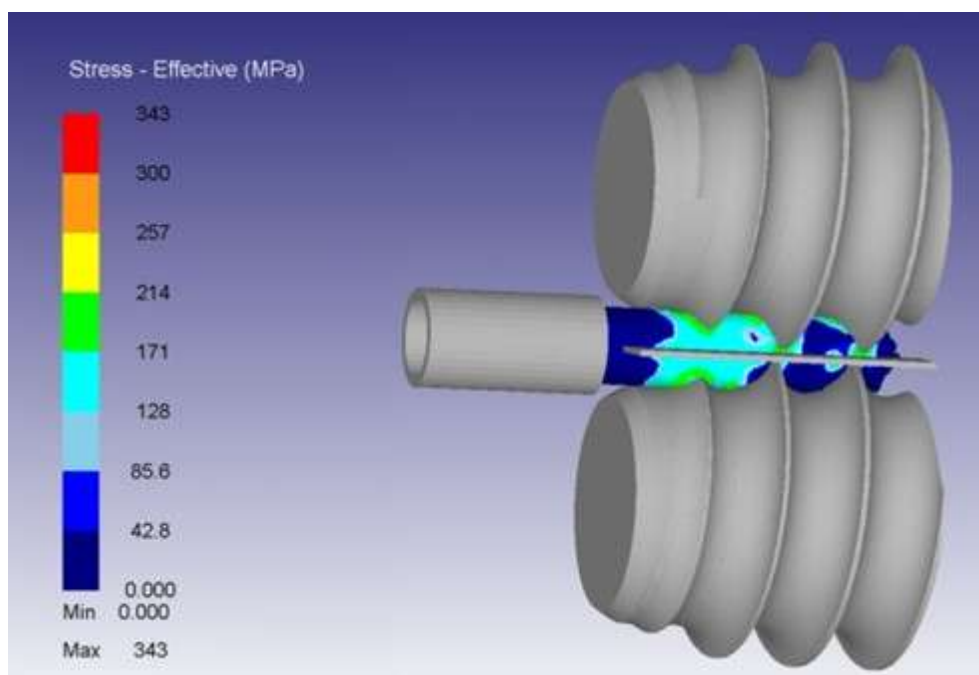


Рисунок 2.4 – Распределение интенсивности напряжений в заготовке

Наибольшие значения интенсивности напряжений наблюдается при деформации металла под второй ребордой [294].

В связи с тем, что в объемном рисунке анализ напряжений затруднен, такой анализ проводили в плоскости, проходящей через ось заготовки. Ввиду горизонтальной симметрии анализировали половину прокатанной заготовки.

На рисунке 2.5 представлено распределение интенсивности напряжений при прокатке шаровой заготовки. Как видно, интенсивность напряжений распределена по сечению шаровой заготовки неравномерно. Основная деформация металла приходится на формующий участок, поэтому наибольшая величина интенсивности напряжений наблюдается под ребордой при ее внедрении в металл заготовки. На отделочном участке, где происходит обкатка шаров, интенсивность напряжений значительно меньше [294].

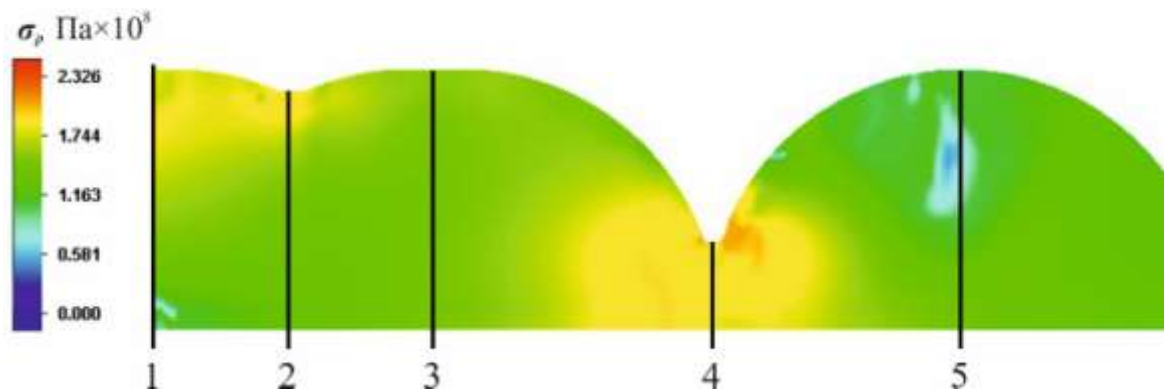


Рисунок 2.5 – Распределение интенсивности напряжений при разделении металла на шаровые заготовки

Результаты определения компонентов тензора напряжений приведены в таблице 2.2 [294; 297].

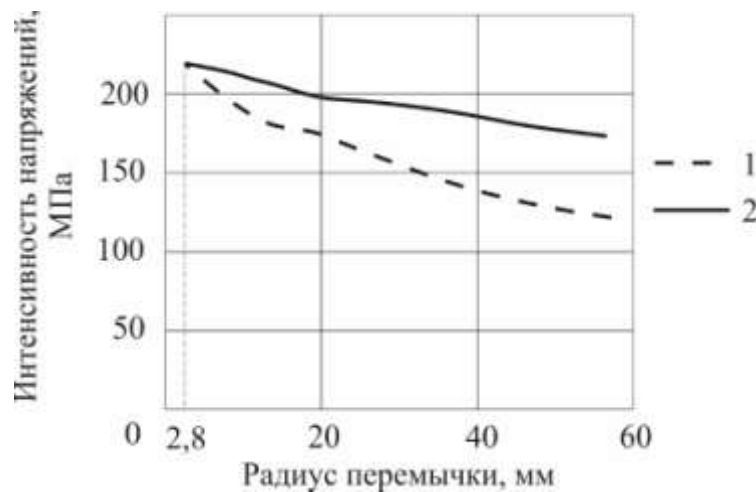
Можно отметить, что все компоненты тензора напряжений имеют отрицательное значение, это говорит о том, что все компоненты тензора напряжений сжимающие.

Таблица 2.2 – Компоненты тензора напряжений и интенсивность напряжений

| Напряжение | Величина напряжений в характерных точках, МПа |       |      |      |      |
|------------|---|-------|------|------|------|
|            | 1   | 2     | 3    | 4    | 5    |
| $\sigma_x$ | -806  | -948  | -701 | -878 | -799 |
| $\sigma_y$ | -807  | -996  | -688 | -543 | -710 |
| $\sigma_z$ | -722  | -1004 | -830 | -726 | -877 |
| $\sigma_i$ | 123   | 147   | 127  | 181  | 135  |

В таблице  $\sigma_x$  – напряжение вдоль оси прокатки,  $\sigma_y$  – напряжение вдоль направления уширения,  $\sigma_z$  – напряжение вдоль направления обжатия,  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений.

Результаты обработки данных компьютерного моделирования приведены на рисунке 2.6 в виде графика зависимости интенсивности напряжений от радиуса перемычки.



1 – по оси симметрии заготовки; 2 – в месте касания валков с ребордой

Рисунок 2.6 – Зависимость интенсивности напряжений от радиуса перемычки

Из рисунка видно, что максимальное значение интенсивности напряжений наблюдается непосредственно под ребордой прокатных валков и при радиусе перемычки 2,8 мм достигает 220 МПа. С увеличением радиуса перемычки величина интенсивности напряжений уменьшатся.

На рисунке 2.7 приведена мозаика распределения гидростатического давления (среднего нормального напряжения со знаком минус) при первом положении валков.

Как видно из рисунка, величина гидростатического давления во всех точках деформированного металла положительна. Это означает, что напряженное состояние металла – объемное сжатие, что способствует пластической деформации металла без разрушения.

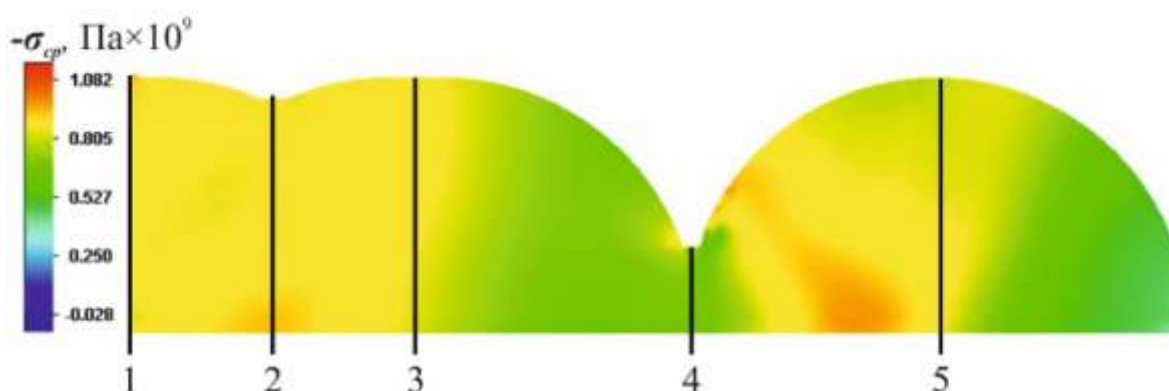


Рисунок 2.7 – Распределение гидростатического давления при разделении металла на шаровые заготовки

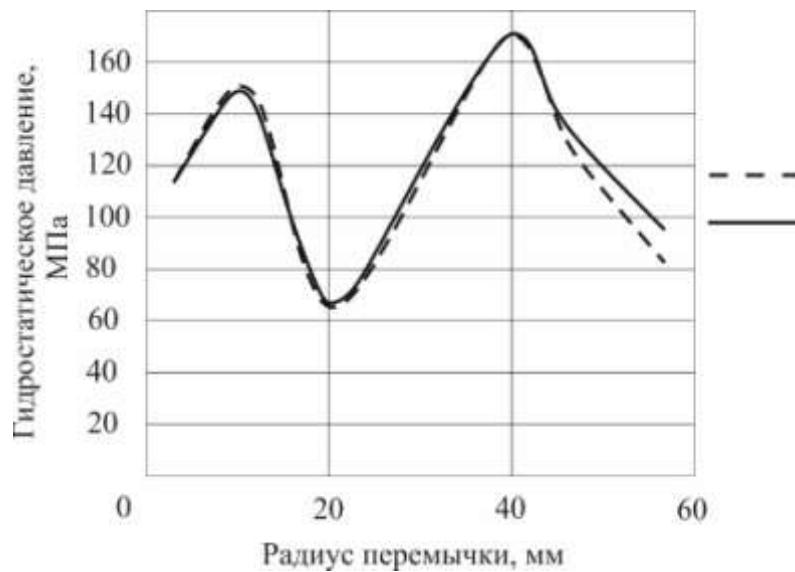
Результаты исследования среднего нормального напряжения в характерных точках при втором положении валков (угол поворота  $90^0$ ), МПа:

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 1 – передний торец валков    | -710  |
| 2 – внедрение первой реборды | -879  |
| 3 – центр первого шара       | -725  |
| 4 – внедрение второй реборды | -1030 |
| 5 – центр второго шара       | -752  |

Как видно из данных моделирования, среднее нормальное напряжение распределяется по длине прокатываемого металла неравномерно и остается сжимающим во всем исследованном диапазоне. Наибольшие значения среднего нормального напряжения наблюдаются под ребордой прокатного валка.

Результаты обработки данных компьютерного моделирования проведены на рисунке 2.8 в виде графика зависимости величины гидростатического давления от радиуса перемычки.

Величина гидростатического давления сильно зависит от положения прокатываемого металла в валках и связана с разрушением перемычки и удалением готового шара из валков.



1 – по оси симметрии заготовки; 2 – в месте касания валков с ребордой

Рисунок 2.8 – Зависимость гидростатического давления от радиуса перемычки

Изменение напряженно-деформированного состояния металла при разделении горячекатаного прутка на шаровые заготовки при последовательном повороте валков на  $90^{\circ}$  приведено в приложении А.

На рисунке 2.9 приведена типовая мозаика распределения использования ресурса пластичности металла.

Результаты исследования использования ресурса пластичности металла шаровой заготовки в характерных точках,  $\Lambda_p$ :

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 1 – передний торец валков    | 0,01  |
| 2 – внедрение первой реборды | 0,015 |
| 3 – центр первого шара       | 0,01  |

4 – внедрение второй реборды 0,022

5 – центр второго шара 0,016

Как видно из рисунка 2.9, использование пластичности металла распределяется по длине прокатываемого металла неравномерно. Малую величину использования пластичности можно объяснить малой величиной деформации металла при повороте валков на  $90^{\circ}$ . Абсолютное обжатие при повороте валков на  $90^{\circ}$  составляет 5–7 мм.

В дальнейшем под ребордой происходит разделение металла на шаровые заготовки, и коэффициент использования пластичности плавно повышается от 0,716 до 1,0. При исчерпывании ресурса пластичности происходит разрушение металла.

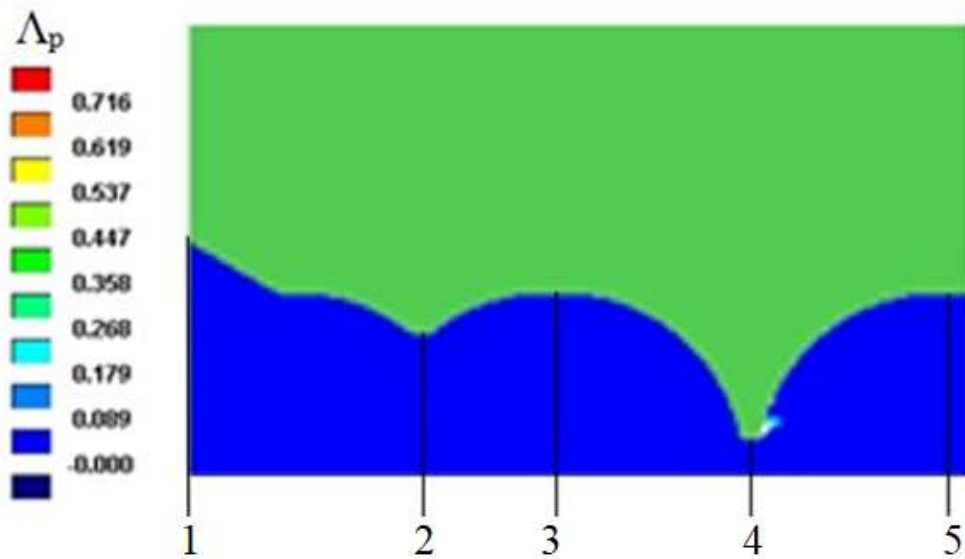


Рисунок 2.9 – Использование ресурса пластичности металла при разделении на шаровые заготовки

Таким образом, теоретические исследования показали, что при прокатке на шаропрокатном стане прокатываемый металл испытывает объемные напряжения сжатия, внутренние дефекты отсутствуют, и разрушение под ребордой происходит после исчерпания ресурса пластичности.

## **2.2 Температурные режимы нагрева металла под объемную штамповку**

Для выбора оптимальной температуры нагрева под штамповку необходимо учитывать такие факторы, как: марка стали, пластические свойства металла, его сопротивление деформации, силы штамповки, окалинообразование, количество переходов штамповки и т. д. [298].

В процессе нагрева металла сопротивление деформации понижается, пластичность увеличивается, величина силы штамповки уменьшается. Так, при нагреве стали 20Х от температуры 600 °С до температуры 1100 °С ее сопротивление деформации уменьшается в 4 раза, а пластические свойства возрастают более чем в 3,5 раза [299]. Так же на поверхности заготовок в процессе нагрева в атмосфере воздуха или продуктов сгорания топлива образуется окалина. Наибольшее влияние на процесс окалинообразования оказывает температура нагрева. При нагреве до 600–700 °С окисление происходит медленно и практического значения не имеет. Начиная с 850–900 °С, оно происходит более интенсивно [141; 300]. Если количество окалины при 900°С принять за единицу, то при 1000 °С оно увеличивается в 2 раза, при 1100 °С – в 3,5 раза, и при 1300 °С – в 7 раз [24]. Окалина оказывает отрицательное влияние на стойкость штампов. В некоторых случаях необходимо проведение дополнительных операций для удаления окалины, например осадки, что ведет к увеличению количества переходов при штамповке.

### **2.2.1 Влияние температуры на свойства сталей и процессы окисления при объемной штамповке**

В научной и справочной литературе имеются данные по механическим и пластическим свойствам металлов при температурах горячей обработки

давлением, однако при температурах полугорячей обработки давлением такие данные отсутствуют. Также отсутствуют комплексные исследования влияния температуры на сопротивление металла деформации, пластические свойства металлов и окисление при нагреве, проведенные на образцах одной марки стали.

Испытания на горячее скручивание являются распространенным методом исследования пластических свойств металла и его сопротивления деформации при высоких температурах. Отмечается, что проведение только одного испытания на горячее скручивание достаточно для определения оптимальной температурной зависимости пластических свойств металла и его сопротивления деформации [106; 114; 122; 131; 301].

Достоинством испытания металла на горячее скручивание является:

- простая конструкция испытательной машины;
- преобладание касательных напряжений, которые ответственны за пластическую деформацию металла и его разрушение при различных видах обработки металлов давлением;
- стабильные результаты при оценке пластичности металла и его сопротивления деформации;
- чувствительность испытания к структуре образца;
- воспроизведение скоростей деформации, соответствующих реальным технологическим процессам обработки металлов давлением.

На рисунке 2.10 приведена типовая диаграмма скручивания образца при температурах полугорячей штамповки, построенная в координатах крутящий момент ( $M_{кр}$ ) – степень деформации сдвига ( $A$ ).

Наличие максимума на кривой крутящего момента можно объяснить следующим образом. Первый этап кручения образца характеризуется относительно быстрым нарастанием крутящего момента, что соответствует фазе упрочнения металла, когда плотность дислокаций растет. Разрушение практически отсутствует.

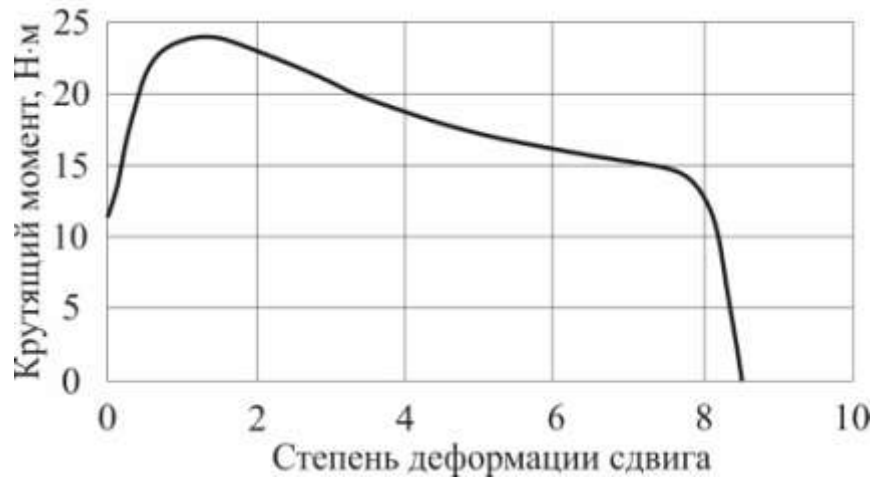


Рисунок 2.10– Диаграмма кручения,  $M_{кр}-\Lambda$

При достижении максимального значения момента ( $M_{max}$ ) эффекты обоих конкурирующих процессов выравниваются [99; 301, 302]. Далее разупрочнение начинает преобладать над упрочнением, плотность дислокаций снижается, и уменьшается величина крутящего момента [93; 95].

В области больших деформаций при испытании металла на горячее скручивание его размеры практически остаются постоянными [92]. Рассмотрим некоторый участок образца, выделенный двумя поперечными сечениями, расположенными на расстоянии  $l$  друг от друга. Пусть величина  $l$  настолько мала, что деформированное состояние в пределах этого участка можно считать независимым от продольной координаты  $z$ . Интенсивность скоростей деформации сдвига на поверхности образца в этом случае равна [120]:

$$H = \omega \cdot \frac{R}{l}, \quad (2.4)$$

где  $\omega$  – угловая скорость относительного поворота торцевых сечений образца на расстоянии  $l$  друг от друга,  $c^{-1}$ ;

$l$  – длина рабочего участка образца, мм;

$R$  – радиус рабочей части образца, мм.

Степень деформации сдвига при кручении будет равна:

$$\Lambda = \left(\frac{R}{l}\right) \int_0^R \omega d\tau,, \quad (2.5)$$

здесь интеграл – это угол поворота одного торцевого сечения относительно другого;

$\tau$  – касательное напряжение, Па.

Степень деформации сдвига пропорциональна расстоянию от оси образца. Максимальное значение она имеет на поверхности образца, и ее можно записать как:

$$\Lambda = \operatorname{tg} \gamma, \quad (2.6)$$

где  $\gamma$  – угол поворота риски на поверхности образца вдоль образующей к первоначальному положению.

В свою очередь:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{(\pi \cdot d_0 \cdot n_z)}{l_0} = \Lambda \quad (2.7)$$

где  $d_0, l_0$  – размеры рабочей части образца, мм;

$n_z$  – количество оборотов до разрушения образца [120].

Для определения сопротивления металла деформации по опытным данным на горячее кручение воспользуемся зависимостью [93]. Максимальное касательное напряжение на поверхности образца:

$$\tau_{\max} = 4 \frac{\left( 3M + \theta \cdot \frac{\partial M}{\partial \theta} \right)}{\pi \cdot d_0^3} \quad (2.8)$$

где  $M$  – величина крутящего момента, Н·м;

$\theta$  – относительный угол закручивания, град.

При горячем скручивании металла наибольшее значение имеет максимальная величина  $\tau_{\max}$  при максимальном значении крутящего момента  $M_{\max}$ . В этом случае второе слагаемое в скобках будет равно нулю, и:

$$\tau_{\max} = 12 \frac{M_{\max}}{\pi d_0^3}. \quad (2.9)$$

Сопротивление металла деформации:

$$\sigma = \sqrt{3} \cdot \tau_{\max}, \quad (2.10)$$

подставляя значение  $\tau_{\max}$  из формулы (2.9), получим:

$$\sigma = 12\sqrt{3} \frac{M_{\max}}{\pi d_0^3}, \quad (2.11)$$

Зависимость величины поверхностного угара от температуры и времени нагрева описывается уравнением (1.14). Однако в реальных условиях нагрева температура поверхности металла непрерывно изменяется. В связи с этим непрерывная траектория изменения температуры поверхности  $t = (\tau)$  может быть аппроксимирована соотношением [303].

$$t = t_0 + A_1(1 - \exp(-B_1 \frac{\tau_i}{\tau})), \quad (2.12)$$

где  $t_0$  – начальная температура металла,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$A_1, B_1$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от режима нагрева;

$\tau_i$  – текущий ( $i$ -ый) момент времени от начала нагрева, мин;

$\tau$  – суммарное время нагрева, мин; заменяют отрезками продолжительностью  $\Delta\tau$  (рисунок 2.11).

В расчетах принимаем, что на участке  $\Delta\tau$  температура поверхности металла  $t$  постоянна и равна средней температуре  $t_i^{\text{cp}}$  поверхности в  $i$ -том временном интервале.

Указанную среднюю температуру используют для определения угара в уравнении (2.13). Таким образом, на каждом  $i$ -том временном интервале рассчитывали прирост угара стали  $\Delta Y_i$ . Суммируя прирост угара на каждом временном интервале по зависимости:

$$Y = \sum_{i=1}^n \Delta Y \quad (2.13)$$

определяем общий угар  $Y$  стали за весь период нагрева. При задании шага по времени на уровне 1–5 с. используемая методика обеспечивает достаточно высокую точность расчета. Расчет заканчивают при достижении заданного времени нагрева  $\tau$  или заданной конечной температуры  $t_{\text{кон}}$ .

## 2.2.2 Определение оптимальной температуры нагрева металла перед штамповкой на основе обобщенной функции желательности

Задачу оптимизации процессов, характеризующихся несколькими откликами, обычно сводят к задаче оптимизации по одному критерию с ограничениями в виде равенств или неравенств. В зависимости от вида поверхности отклика можно использовать линейное или нелинейное программирование и другие методы [166; 304].

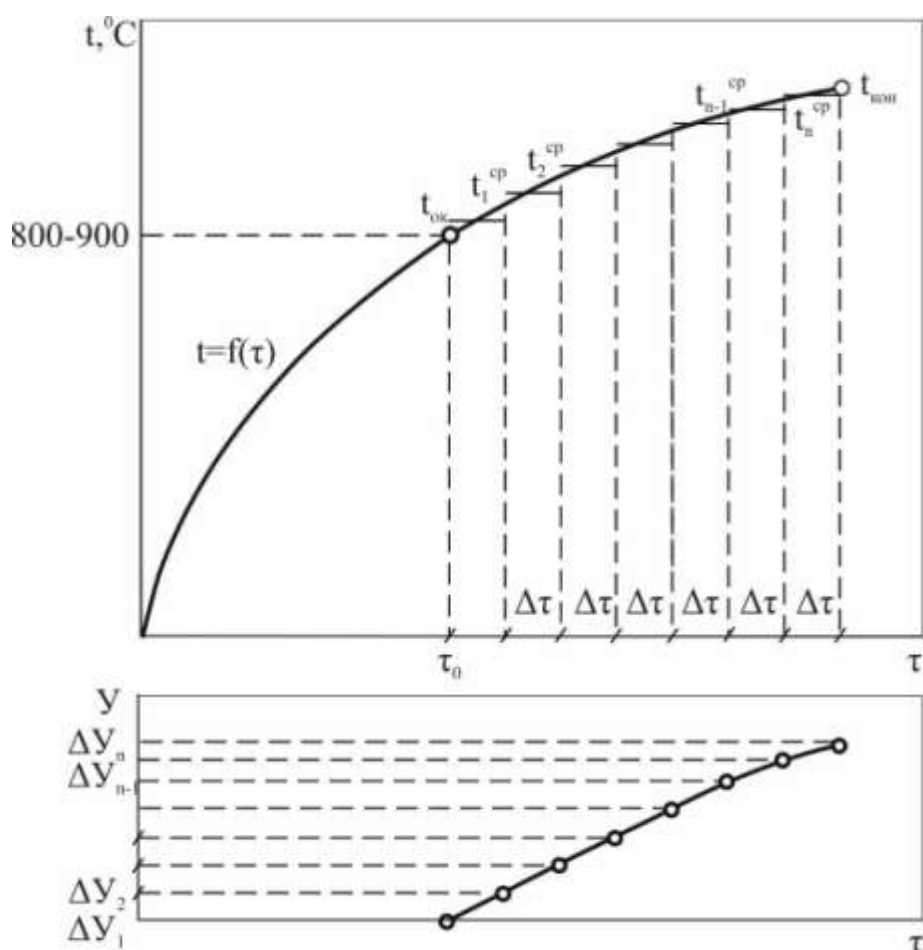


Рисунок 2.11 – Схема расчета угара стали

К недостаткам этих способов решения задачи оптимизации следует отнести трудности математического описания процесса и корректного решения задачи. Поэтому одним из наиболее удачных способов решения задачи оптимизации

процессов с большим количеством откликов является использование предложенной Харрингтоном [304] в качестве критерия оптимизации обобщенной функции желательности.

Под желательностью  $d$  понимают тот или иной желательный уровень параметра оптимизации. Для этого предлагается преобразовать измеренные значения свойств (откликов) в безразмерную шкалу желательности. Построение шкалы желательности, которая устанавливает соотношение между значениями свойств (отклика)  $y$  соответствующим ему значением  $d$  является в своей основе субъективным, отражающим отношение исследователя к отдельным свойствам.

Для построения шкалы желательности удобно использовать метод количественных оценок с интервалом значений желательности от нуля до единицы. Разработана специальная шкала желательности [166], представленная в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Шкала частной функции желательности

| Количественная величина желательности | Желательные значения свойств (отклика)  |
|---------------------------------------|---|
| 1,00 – 0,80                           | Допустимый и превосходный уровень качества. Очень высокий уровень качества, которого также не всегда следует добиваться |
| 0,80 – 0,63                           | Допустимый и хороший уровень качества, но все же выше того, которого реально добиваются                                 |
| 0,63 – 0,37                           | Допустимый и достаточный уровень качества   |
| 0,37 – 0,20                           | Недопустимый уровень качества   |
| 0,20 – 0                              | Максимально нежелательный уровень качества  |

Такой выбор числовых отметок шкалы желательности объясняется удобством вычислений, поскольку:

$$d = 0,63 \approx 1 - 1/e, \text{ а } d = 0,37 \approx 1/e. \quad (2.14)$$

Построенная в соответствии с таблицей 2.3 шкала желательности представляет собой безразмерную шкалу, при помощи которой любое значение свойств (отклик) может быть преобразован так, чтобы его значения можно было интерпретировать в терминах полезности или желательности для любого процесса.

Удобной формой преобразования свойства  $y$  в частную функцию желательности  $d$  служит экспоненциальная зависимость [298; 303]:

$$d_i = \exp(-\exp(-z_i)), \quad (2.15)$$

где  $z_i$  – некоторая безразмерная величина, линейно связанная с изучаемыми свойствами  $y_i$  и измеряемая от +4 до –3.

Графически функция (2.15) показана на рисунке 2.12 [166].

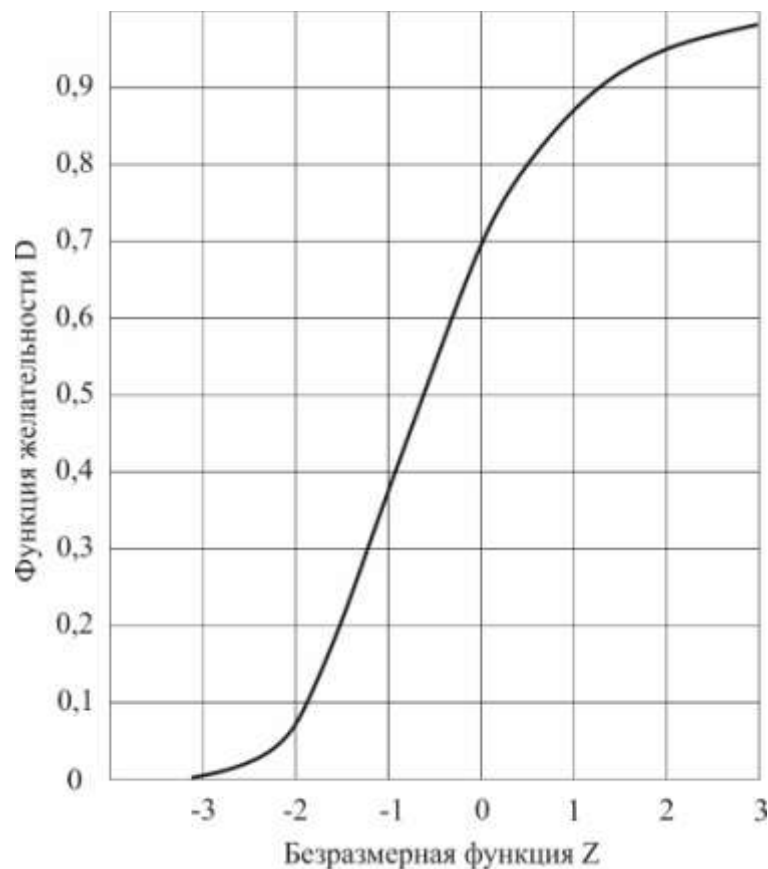


Рисунок 2.12 – Функция желательности

Имея несколько значений свойств (откликов)  $y_i$ , преобразованных с помощью графика в частные функции желательности  $d_i$ , можно определить обобщенную функцию желательности:

$$D = \sqrt[i]{d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_i}. \quad (2.16)$$

где  $d_i$  – частная функция желательности.

Можно отметить, что если какая-то одна единичная функция желательности  $d$  равна нулю, то соответствующая ей обобщенная функция желательности  $D$  будет равна нулю. На обобщенную функцию желательности  $D$  сильнее всего влияет наименьшее значение частной функции желательности. С обобщенной функцией желательности  $D$  можно выполнять все математические операции, как с любым откликом системы. Обобщенную функцию желательности можно использовать в роли критерия оптимизации при исследовании и оптимизации процессов обработки металлов давлением.

### **2.3 Напряженно-деформированное состояние металла при полугорячей безоблойной штамповке**

Для исследования напряженно-деформированного состояния металла спроектирован виртуальный технологический процесс штамповки на кривошипном горячештамповочном прессе АККБ 8544. Моделирование проводили для поковок типа «фланец» и «шестерня» в программном комплексе QForm 3D.

На рисунках 2.13, 2.14 приведены чертежи поковок «фланец» (2.13) и «шестерня» (2.14).

Поковка «фланец» представляет собой поковку сложной формы, состоящую из центральной части с наметкой под прошивку, верхнего и нижнего выступов, и

торцевой дисковой части. Поковка «фланец» круглая в плане, симметрична по вертикальной оси.

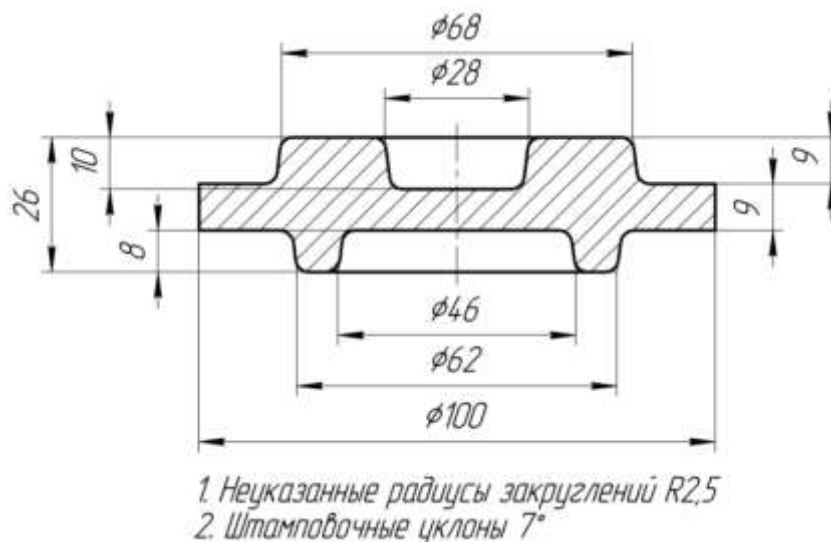


Рисунок 2.13 – Чертеж поковки «фланец»

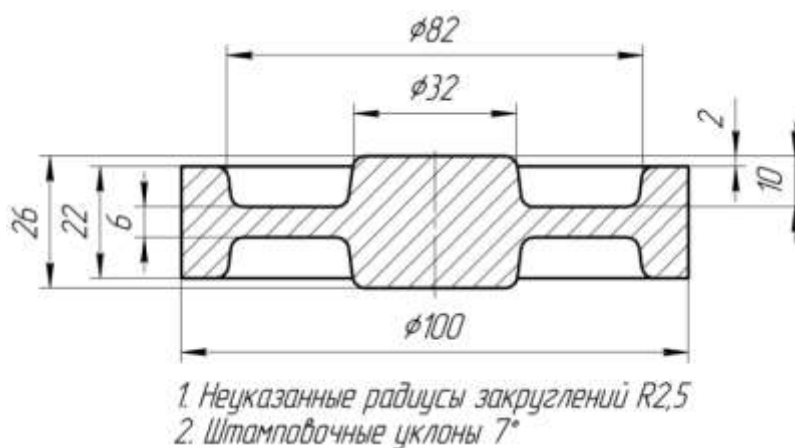


Рисунок 2.14 – Чертеж поковки «шестерня»

В поковке «шестерня» различают центральную часть – ступицу и периферийную часть – венец. Ступицу с венцом соединяет тонкостенный диск. Данная поковка является осесимметричной, круглой в плане с вертикальной и горизонтальной осями симметрии.

Для определения наиболее оптимальной формы исходной заготовки штамповку осуществляли из шаровой и цилиндрической заготовок, равных по объему. При этом объем заготовки равен объему поковки и составляет 113097 мм<sup>3</sup>.

В качестве исходных данных для моделирования приняли:

Материал поковок: фланец – сталь марки 40, шестерня – сталь марки 20Х.

Температура заготовки 840 °С.

Механические свойства стали с учетом температуры, скорости деформации и степени деформации выбирали из базы данных.

Штамп изготовлен из штамповой стали 5ХНМ.

Температура штампа 200 °С.

Величину коэффициента трения между заготовкой и инструментом выбирали из базы данных. Для графитовой смазки на водной основе коэффициент трения составляет 0,4.

Оборудование, используемое при моделировании, описывается техническими характеристиками кривошипного горячештамповочного прессы АККБ 8544 усилием 25 МН.

### **2.3.1 Полугорячая безоблойная штамповка поковок круглых в плане из шаровой заготовки**

В качестве исходной заготовки использовали шаровую заготовку диаметром 60 мм. Поскольку поковки симметричны относительно вертикальной оси, результаты моделирования приведены только для половины поковки [74–76; 305–310].

Радиус поковки в горизонтальном сечении принят за единицу, что позволяет сравнивать напряженно-деформированное состояние поковок при различных степенях деформации.

Исследование напряженно-деформированного состояния вертикального осевого сечения фланца не проводили в связи с тем, что дисковая часть готовой поковки после штамповки вырубается.

На рисунке 2.15 представлен процесс штамповки фланца из шаровой заготовки при величине хода пуансона,  $\Delta h$ :

- а)  $\Delta h = 0$  мм. Исходное положение заготовки и инструмента;
- б)  $\Delta h = 26,3$  мм. Стадия начала заполнения верхнего выступа фланца;
- в)  $\Delta h = 49$  мм. Стадия установившегося течения металла, заполнение торцевой части поковки;
- г)  $\Delta h = 52$  мм. Полное заполнение гравюры штампа (готовая поковка).

Результаты моделирования показали, что в процессе штамповки происходит полное заполнение штампов. Вытеснение излишков металла не происходит, зажимы, разрушения и прочие дефекты не образуются.

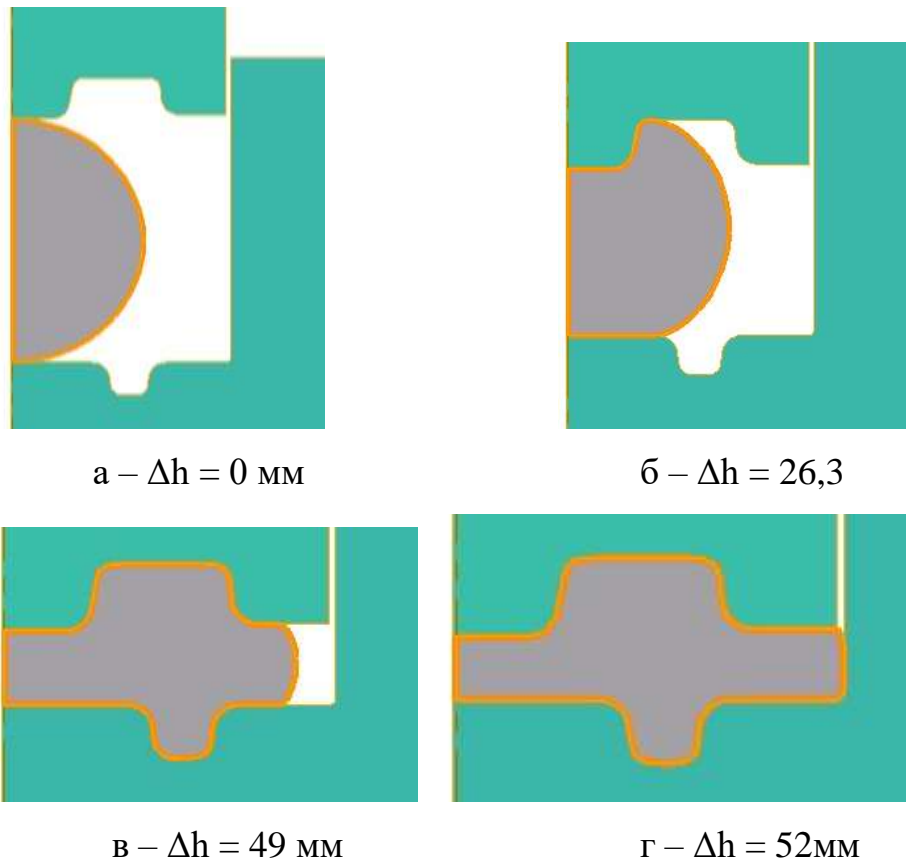
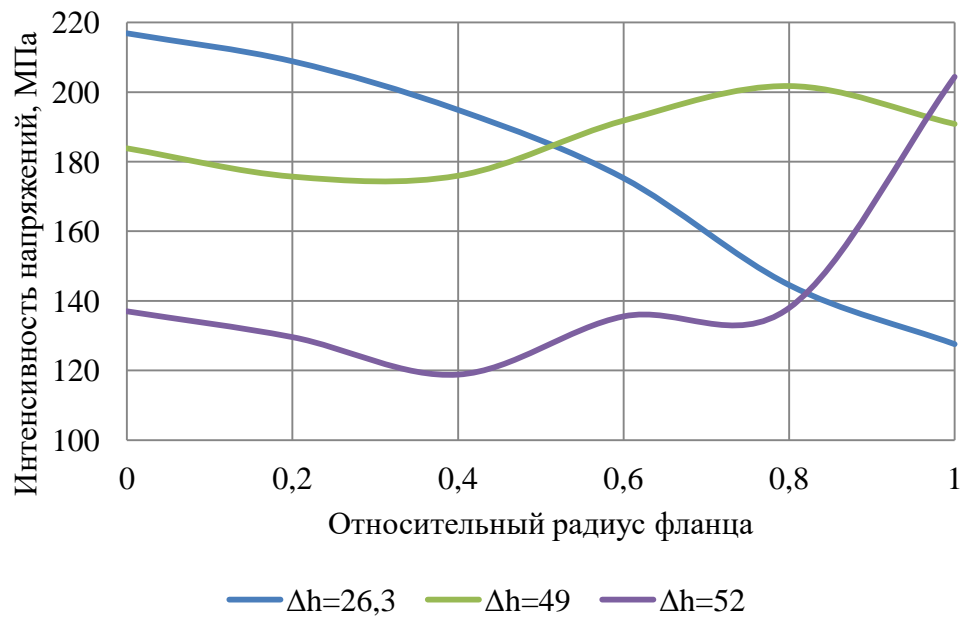
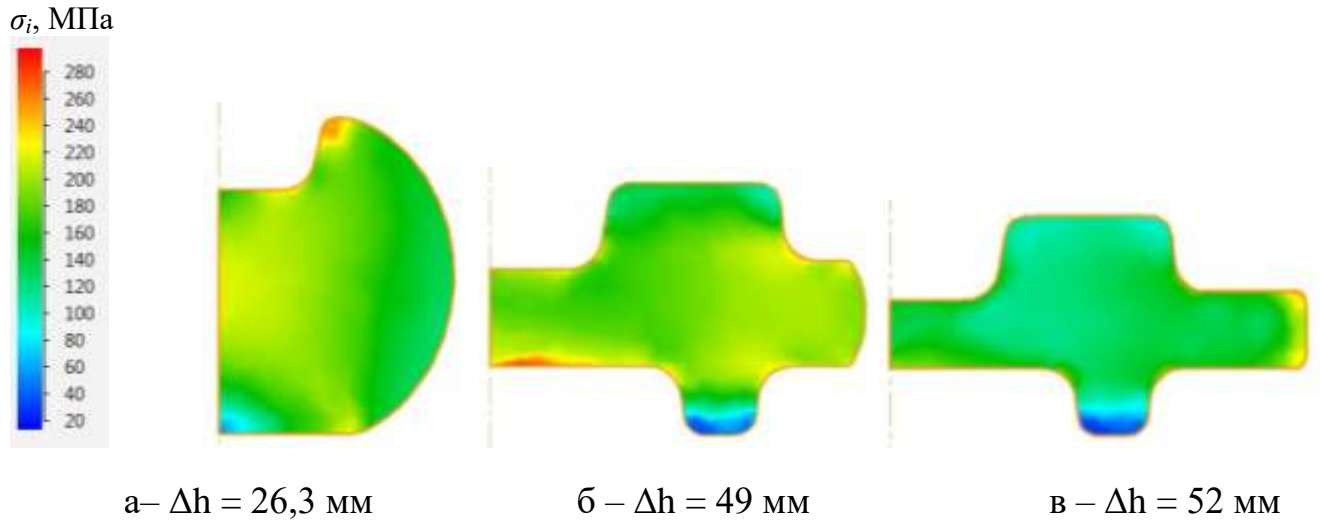


Рисунок 2.15 – Формоизменение металла при штамповке фланца из шаровой заготовки

Результаты исследования напряженного состояния (интенсивность напряжений) при штамповке фланца из шаровой заготовки приведены на рисунке 2.16.



г

Рисунок 2.16 – Распределение интенсивности напряжений  $\sigma_i$  в сечениях фланца

Как видно из рисунка 2.16г, при малой величине хода пуансона величина интенсивности напряжений в горизонтальном сечении фланца снижается от

вертикальной оси симметрии к торцу диска с 216,91 МПа до 127,6 МПа. С увеличением степени деформации (ход пуансона  $\Delta h = 49$  мм) интенсивность напряжений в области перехода от выступов к диску поковки возрастает, максимальное значение достигает 201,7 МПа, уменьшаясь к боковому торцу поковки.

На конечном этапе штамповки (закрытый штамп полностью заполняется металлом) интенсивность напряжений по горизонтальному сечению поковки снижается, оставаясь высоким только в торцевой части диска.

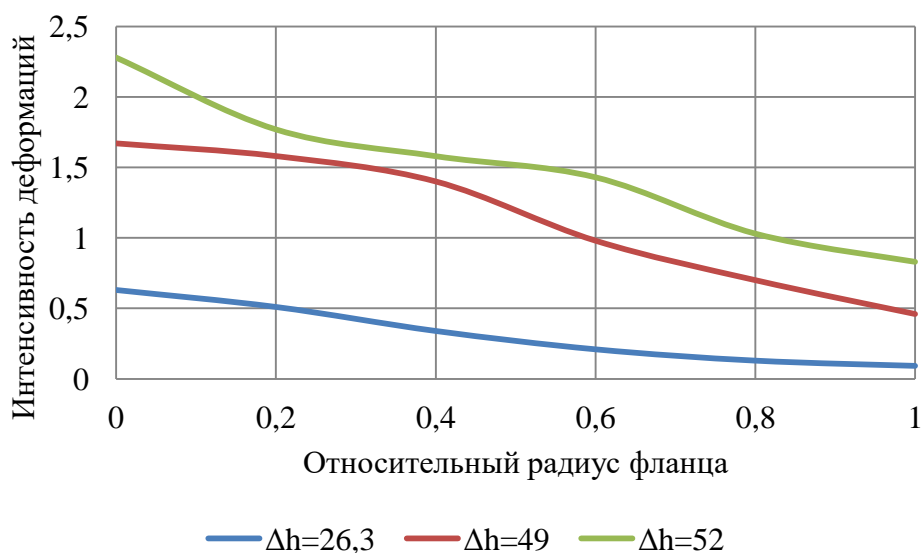
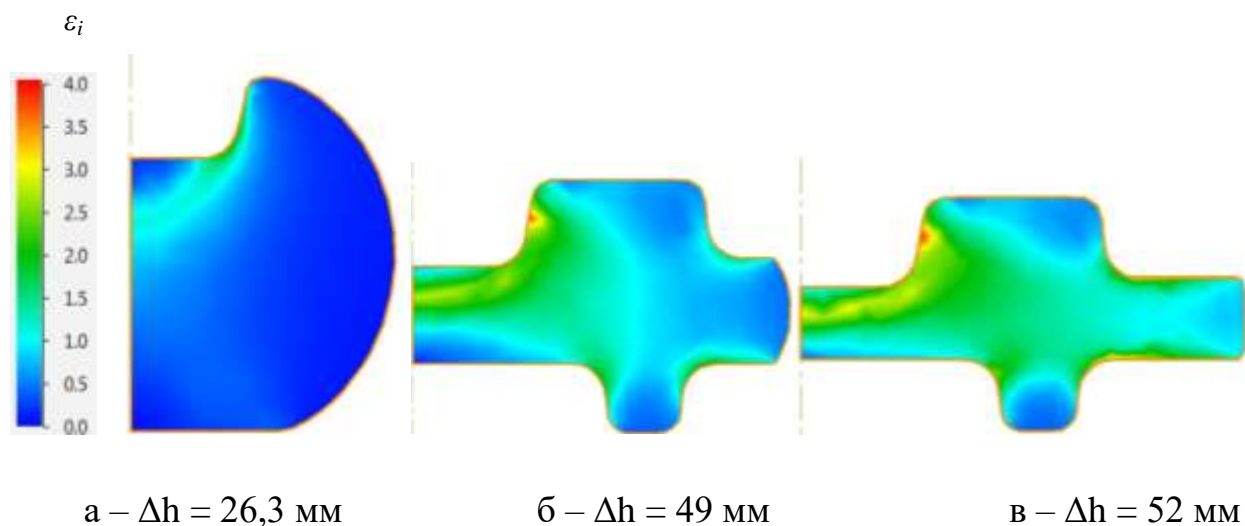
Распределение накопленной деформации в исследуемых точках при перемещении пуансона на 26,3 мм, 49 мм, и 52 мм соответственно приведено на рисунке 2.17.

Как видно из рисунка 2.17, интенсивность деформаций по сечениям поковки распределена неравномерно. С увеличением хода пуансона интенсивность деформаций во всех частях поковки возрастает. Максимальная величина интенсивности деформаций наблюдается в центральной части поковки и снижается в направлении торцевой части фланца.

В горизонтальном осевом сечении фланца (рисунок 2.17г) при перемещении пуансона на 26,3 мм интенсивность деформаций уменьшается с 0,63 на вертикальной оси фланца до 0,09 на боковой поверхности поковки. При дальнейшем перемещении пуансона интенсивность деформаций также уменьшается от вертикальной оси симметрии поковки до боковой поверхности и составляет 2,28–0,83 в готовой поковке.

Распределение среднего нормального напряжения (гидростатического давления со знаком минус) по сечениям поковки фланца при поэтапной деформации приведено на рисунке 2.18.

Распределение среднего нормального напряжения в горизонтальных сечениях поковки зависит от величины заполнения штампа металлом.



г

Рисунок 2.17 – Распределение интенсивности деформации  $\varepsilon_i$  в сечениях фланца

На графике 2.18г видно, что в начальной стадии заполнения штампа центральные слои металла поковки испытывают напряженное сжатие, величина которого уменьшается по направлению к боковому торцу поковки. Однако на расстоянии 0,8 относительного радиуса поковки среднее нормальное напряжение изменяет знак, и на боковой поверхности поковки фланца появляются растягивающие напряжения.

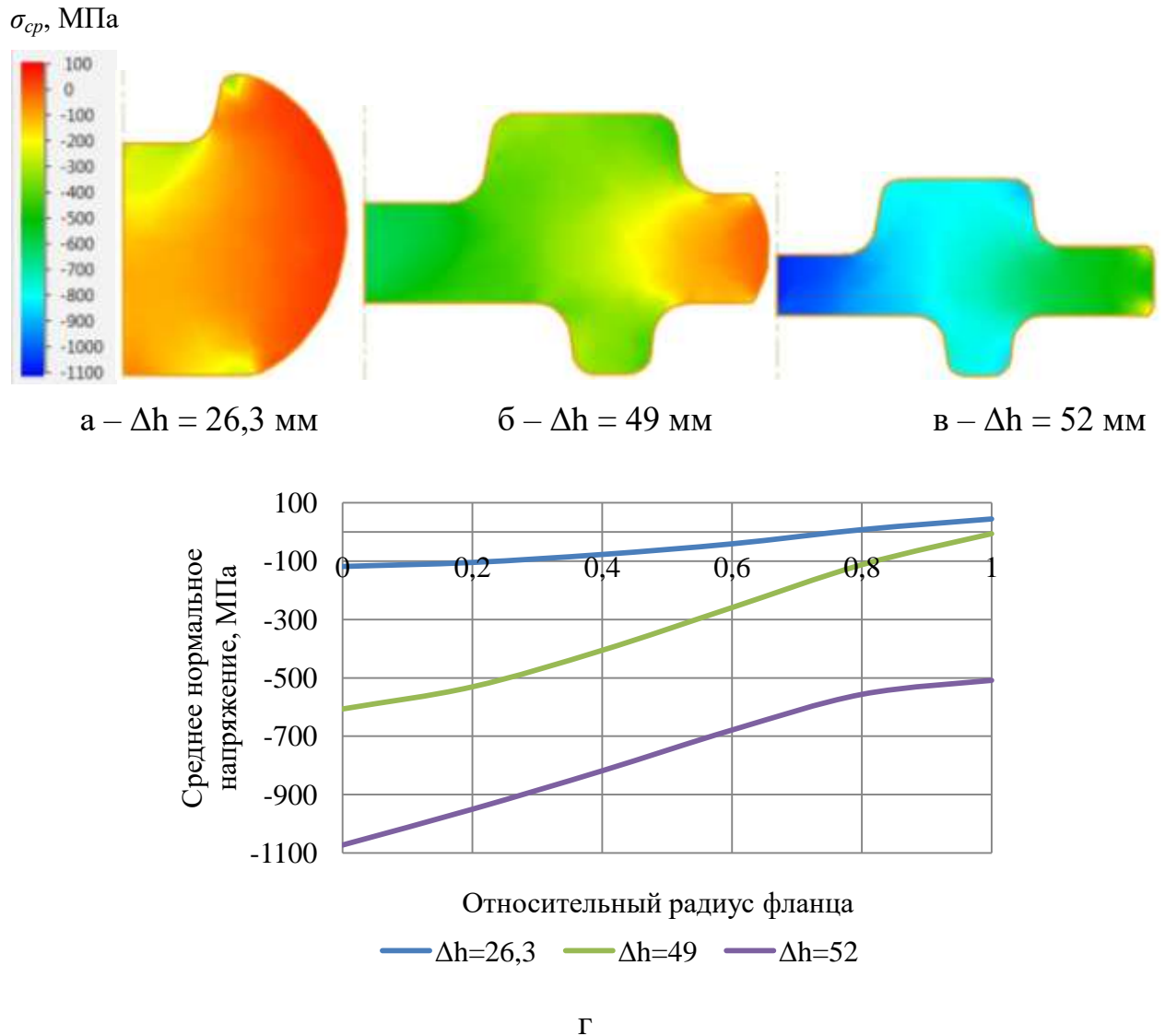


Рисунок 2.18 – Распределение среднего нормального напряжения  $\sigma_{cp}$  в сечениях фланца

На промежуточной стадии штамповки фланца величина среднего нормального напряжения во всем объеме поковки имеет отрицательное значение.

В готовой поковке, при 100 % заполнении гравюры штампа металлом, среднее нормальное напряжение по сечениям фланца остается сжимающим и изменяется по величине от -1072,72 МПа до -508,33 МПа.

На рисунке 2.19 представлен процесс штамповки шестерни из шаровой заготовки [305–310] при величине хода пуансона,  $\Delta h$ :

а)  $\Delta h = 0$ . Исходное положение состояние заготовки и инструмента;

б)  $\Delta h = 14,5$  мм. Стадия заполнения ступицы;

в)  $\Delta h = 30$  мм. Стадия установившегося течения металла, заполнение диска;

г)  $\Delta h = 41$  мм. Полное заполнение гравюры штампа (готовая поковка).

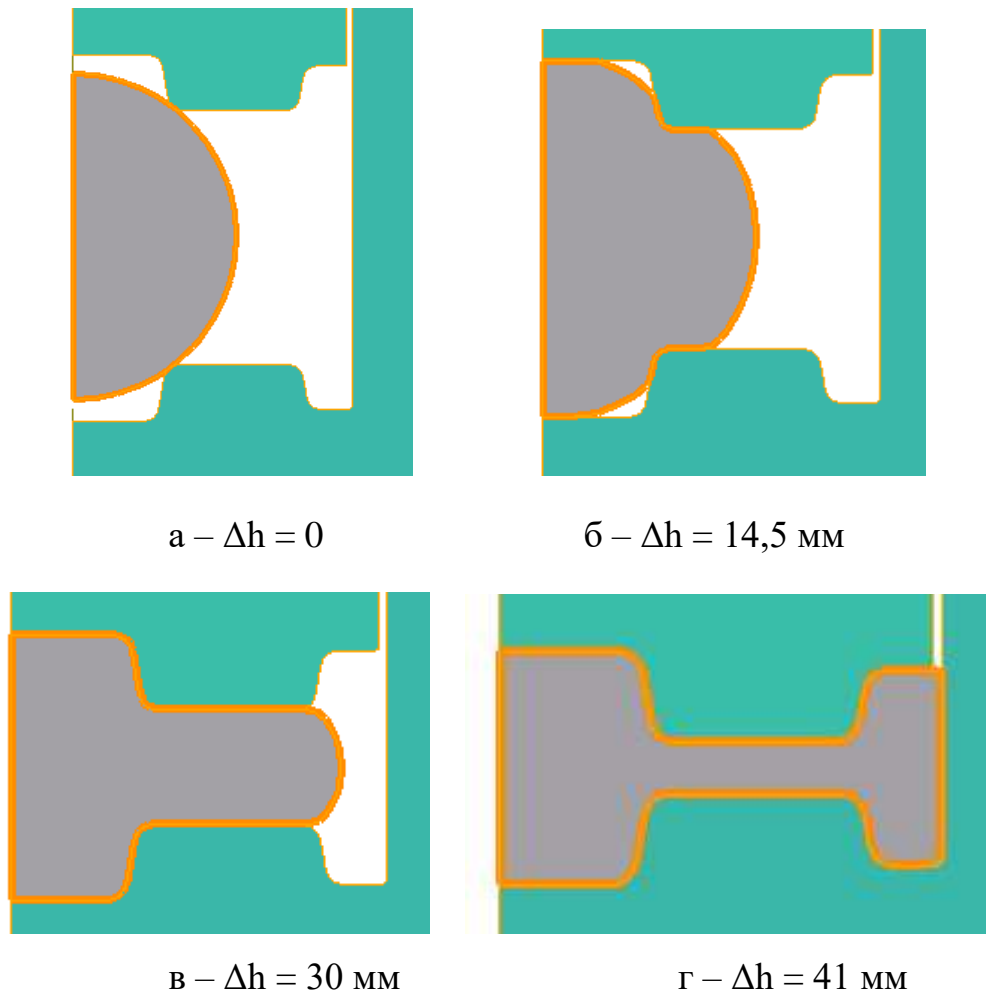
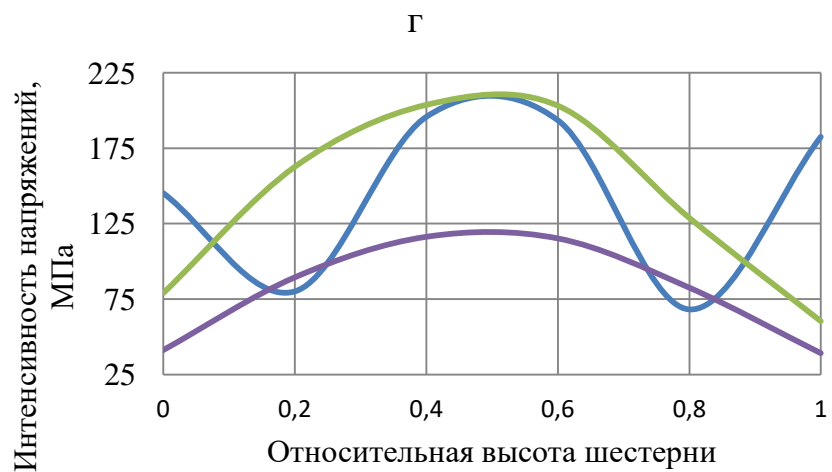
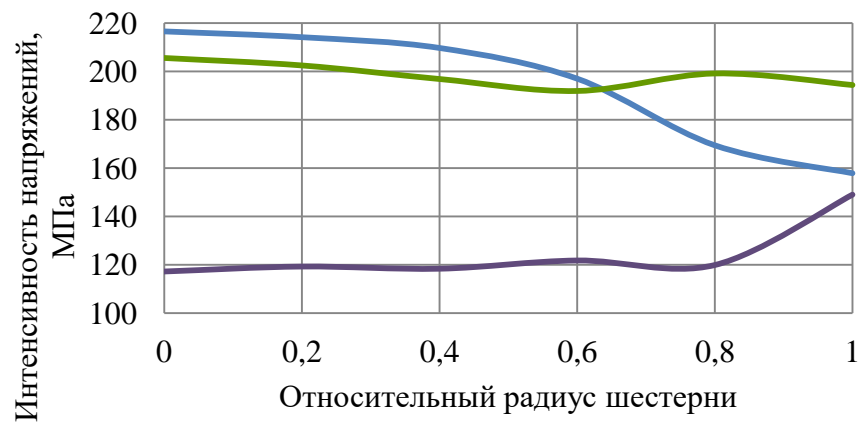
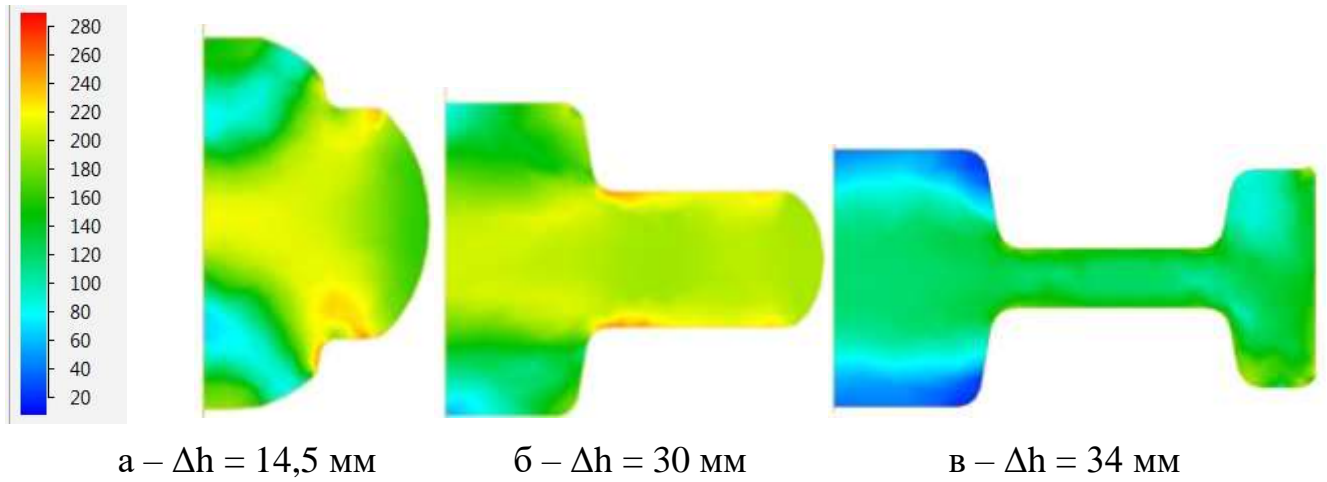


Рисунок 2.19 – Формоизменение металла при штамповке шестерни из шаровой заготовки

Результаты компьютерного моделирования показали, что в процессе штамповки происходит полное заполнение штампов. Вытеснение излишков металла не происходит, зажимы, разрушения и прочие дефекты не образуются.

Распределение интенсивности напряжений по сечению поковки «шестерня» приведено на рисунке 2.20. Как видно из рисунка, интенсивность напряжений по сечению поковки распределена неравномерно.

$\sigma_i$ , МПаРисунок 2.20 – Распределение интенсивности напряжений  $\sigma_i$  в сечениях шестерни

В горизонтальном осевом сечении шестерни при перемещении пуансона на  $\Delta h = 14,5$  мм максимальное значение интенсивности напряжений наблюдается в центральной части поковки. На промежуточных этапах штамповки интенсивность напряжений уменьшается от ступицы шестерни к венцу. На последнем этапе штамповки интенсивность напряжений значительно снижается: в центральной части шестерни с 205,6 МПа при величине хода пуансона  $\Delta h = 30$  мм до 149,1 МПа при полном заполнении штампа и с 194 МПа до 149,1 МПа в венечной части.

В вертикальном сечении поковки (рисунок 2.20д) распределение интенсивности напряжений симметрично относительно горизонтальной оси.

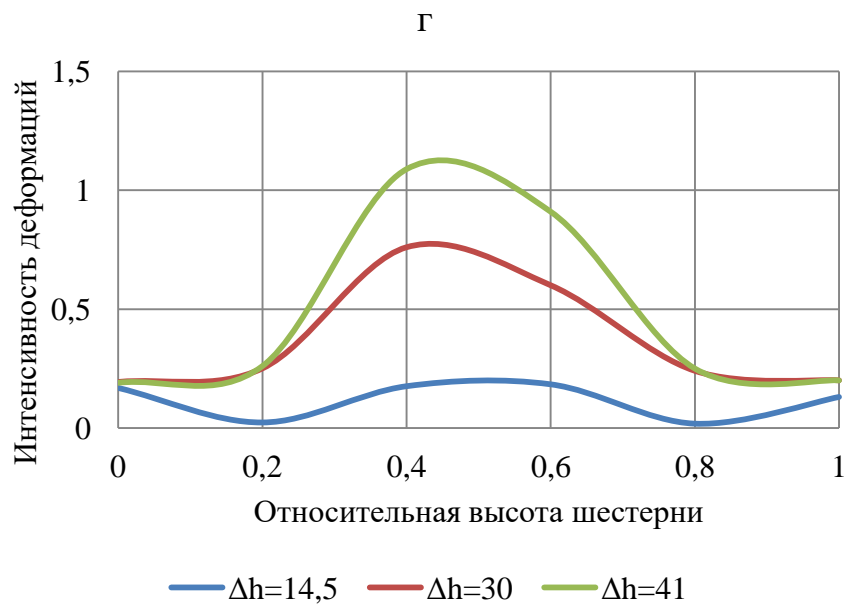
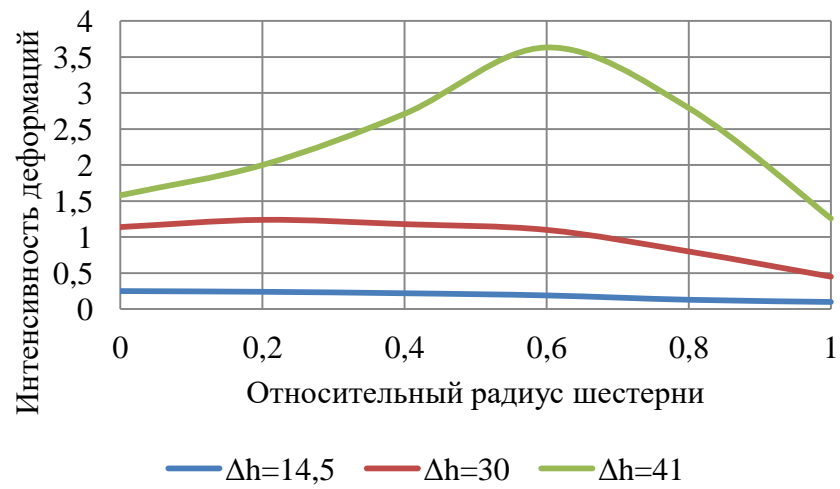
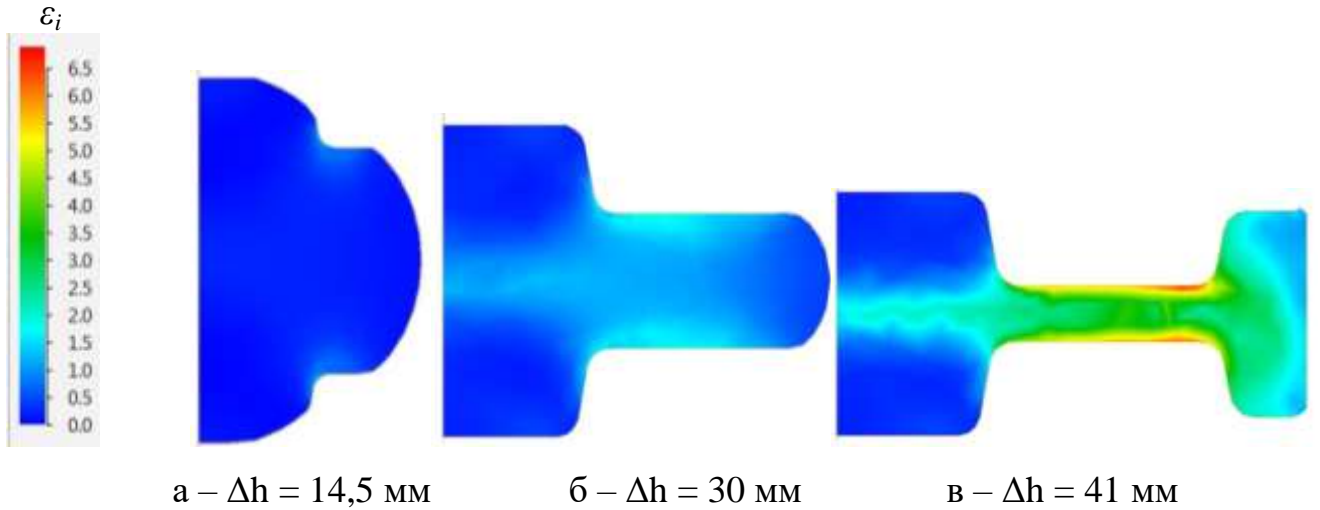
При величине хода пуансона  $\Delta h = 14,5$  мм на расстоянии 0,2 и 0,8 относительной высоты ступицы интенсивность напряжений имеет минимальное значение, так как эти слои металла еще не подвержены значительной деформации. При перемещении пуансона на  $\Delta h = 30$  мм интенсивность напряжений в центральной области поковки возрастает, достигая значения 203,67 МПа, а на поверхности контакта металла с инструментом уменьшается.

В готовой поковке при  $\Delta h = 41$  мм значение интенсивности напряжений снижается, оставаясь высоким в центральной части шестерни и уменьшаясь к верхнему и нижнему торцам ступицы.

Так же по результатам моделирования исследовано распределение интенсивности деформаций в осевых сечениях поковки «шестерня» при трех положениях пуансона, рисунок 2.21.

Из рисунка 2.21 видно, что интенсивность деформаций по сечениям шестерни распределена неравномерно. В горизонтальном осевом сечении поковки (рисунок 2.21г) наблюдается общая тенденция возрастания интенсивности деформации при увеличении степени деформации.

Величина интенсивности деформаций от оси поковки к ее боковой поверхности незначительно уменьшается. Так, при ходе пуансона  $\Delta h = 14,5$  мм интенсивность деформации уменьшается от 0,25 до 0,1.



Д

Рисунок 2.21 – Распределение интенсивности деформаций  $\varepsilon_i$  в сечениях шестерни

В готовой поковке, при ходе пуансона  $\Delta h = 41$  мм, происходит значительное увеличение интенсивности деформаций в диске шестерни. В точках, расположенных вблизи поверхности контакта металла со штампом, интенсивность деформаций изменяется незначительно.

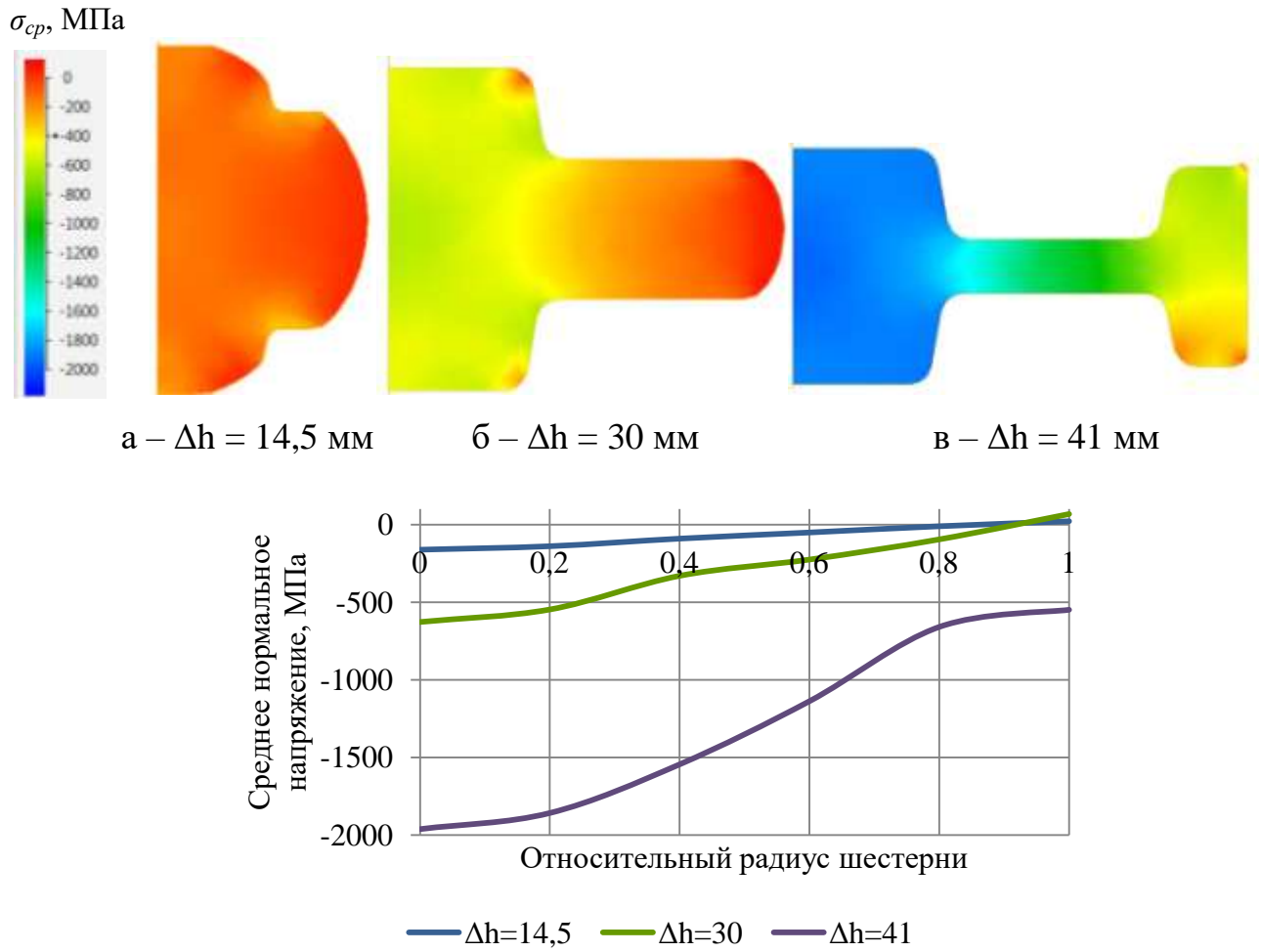
В вертикальном осевом сечении шестерни (рисунок 2.21д) интенсивность деформаций распределяется симметрично относительно горизонтальной оси поковки.

При трех рассматриваемых положениях пуансона в центральной части поковки значение интенсивности деформаций выше, чем на торцевых поверхностях ступицы. С увеличением хода пуансона интенсивность деформации вблизи горизонтальной оси поковки возрастает, на поверхности контакта металла с инструментом значение интенсивности деформаций изменяется незначительно.

На рисунке 2.22 приведен график изменения среднего нормального напряжения по осевым сечениям поковки «шестерня».

Из рисунка 2.22г видно, что величина среднего нормального напряжения увеличивается от ступицы к венечной части поковки. Изменения среднего нормального напряжения на свободной боковой поверхности поковки на отдельных этапах ее штамповки представлены на рисунке 2.23.

Как видно из рисунка 2.23, при штамповке шестерни из шаровой заготовки на боковой поверхности при ходе пуансона от 9,8 мм до 34,6 мм величина среднего нормального напряжения уходит в область положительных значений (имеются растягивающие напряжения). Поэтому, несмотря на отрицательное значение среднего нормального напряжения на последнем этапе штамповки по всему объему поковки, на промежуточных этапах штамповки за счет растягивающих напряжений могут появляться дефекты.



Г

Рисунок 2.22 – Распределение среднего нормального напряжения  $\sigma_{cp}$  в сечениях шестерни

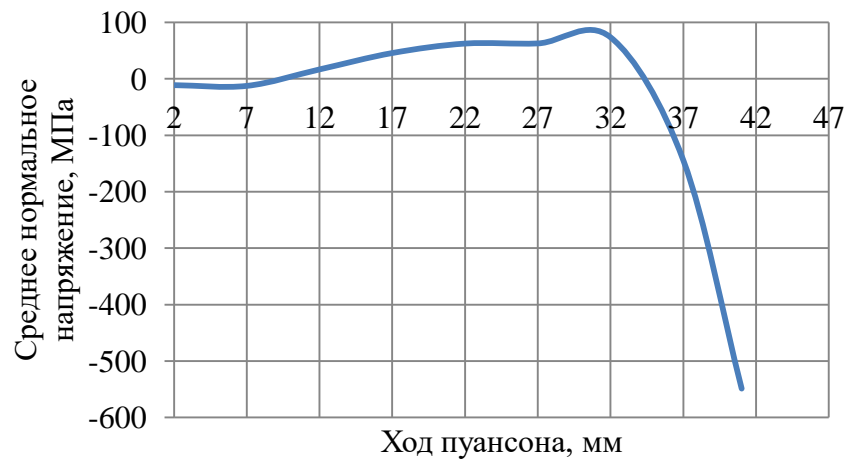


Рисунок 2.23 – Среднее нормальное напряжение на боковой поверхности поковки «шестерня»

Компьютерное моделирование показало, что максимальные растягивающие напряжения на свободной боковой поверхности поковки (73,8 МПа) наблюдаются при величине хода пуансона  $\Delta h = 30,4$  мм, во время интенсивного радиального течения металла в области диска.

### **2.3.2 Безоблойная штамповка поволок круглых в плане из цилиндрической заготовки**

Для сравнительного анализа распределения интенсивности напряжений, интенсивности деформаций и среднего нормального напряжения по объему поковки проведено моделирование безоблойной штамповки в закрытом штампе с использованием цилиндрической заготовки диаметром  $d = 49$  мм и высотой  $h = 60$  мм [308; 310].

На рисунке 2.24 представлен процесс штамповки фланца из цилиндрической заготовки. Приведены данные по заполнению полости штампа при перемещении пуансона на  $\Delta h = 36,2$  мм,  $\Delta h = 49,4$  мм и  $\Delta h = 52$  мм.

Графики распределения интенсивности напряжений горизонтальному осевому сечению поковки представлены на рисунке 2.25.

В горизонтальном сечении фланца (рисунок 2.25) наблюдается общая тенденция, связанная с тем, что с увеличением хода пуансона интенсивность напряжений уменьшается в центральной части поковки и незначительно увеличивается в области бокового торца фланца.

Распределение среднего нормального напряжения (гидростатического давления со знаком минус) по горизонтальному сечению поковки приведено на рисунке 2.26.

По графику видно, что с увеличением хода пуансона значение среднего нормального напряжения по оси поковки численно возрастает.

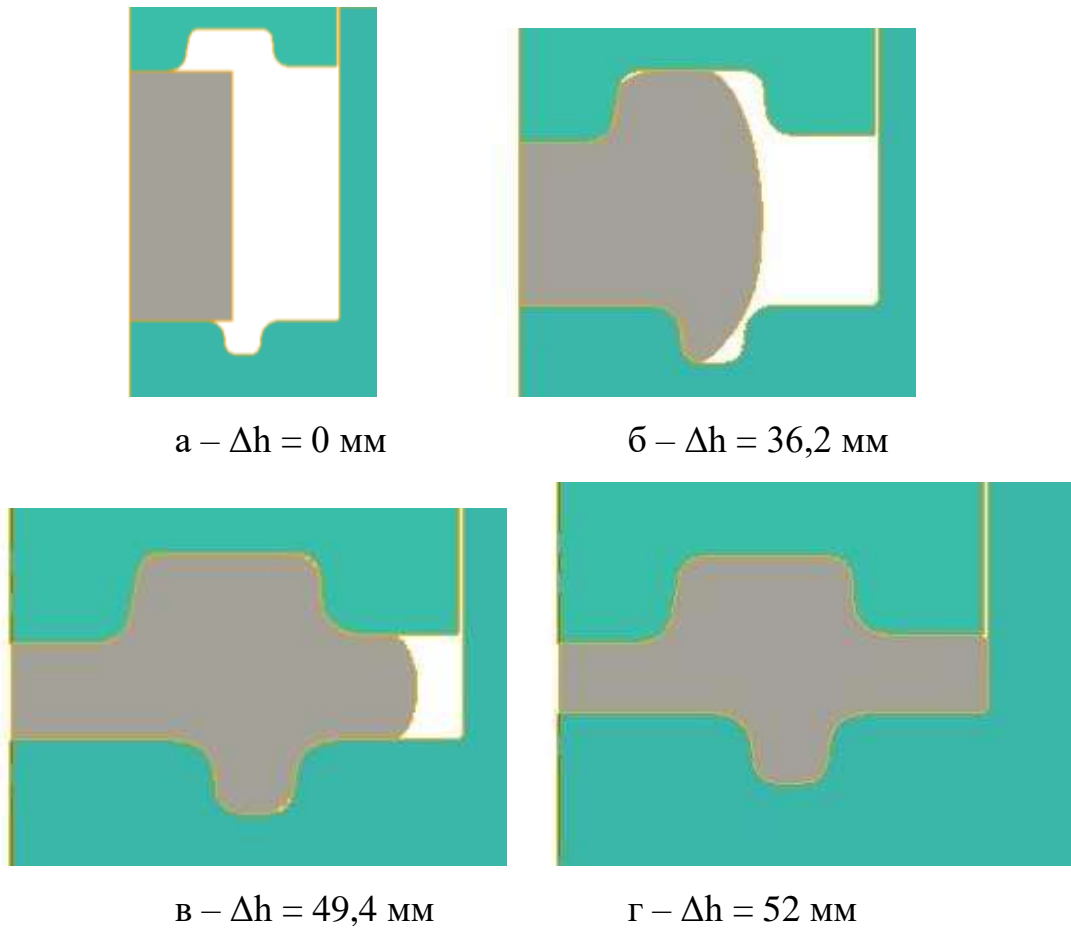


Рисунок 2.24 – Формоизменение металла при штамповке фланца из цилиндрической заготовки

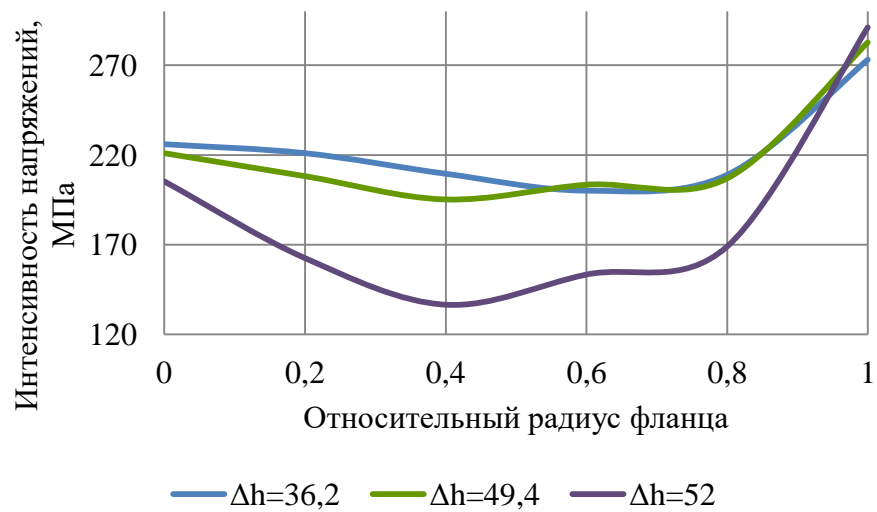


Рисунок 2.25 – Интенсивность напряжений  $\sigma_i$  в горизонтальных сечениях осевой плоскости поковки «фланец»

Следует отметить, что на промежуточных этапах штамповки, при величине хода пуансона  $\Delta h = 36,2$  мм и  $\Delta h = 49,4$  мм на боковых поверхностях поковки возникают растягивающие напряжения, что может привести к образованию дефектов. На последнем этапе штамповки, в готовой поковке величина среднего нормального напряжения максимальна и уменьшается от вертикальной оси фланца к периферии.

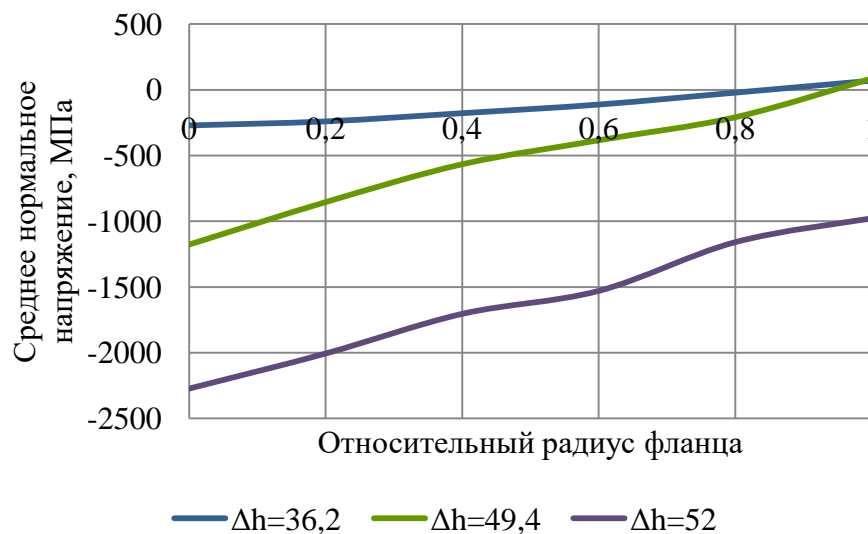


Рисунок 2.26 – Распределение среднего нормального напряжения  $\sigma_{cp}$  в горизонтальных сечениях поковки «фланец»

По данным компьютерного моделирования можно сравнить неравномерность распределения деформации по объему поковки при штамповке из шаровой и цилиндрической заготовок.

Принимаем, что величина неравномерности деформации рассчитывается как отношение максимального значения интенсивности деформаций в сечении поковки к величине высотной логарифмической деформации поковки (по ступице):

$$Q = \frac{\varepsilon_{imax}}{\varepsilon_{пок}}, \quad (2.17)$$

где  $\varepsilon_{imax}$  – максимальное значение интенсивности деформаций в сечении поковки;

$\varepsilon_{пок}$  – высотная логарифмическая деформации поковки по вертикальной оси симметрии.

$$\varepsilon_{пок} = \ln \left( \frac{h_0}{h_{пок}} \right) \quad (2.18)$$

где  $h_0$  и  $h_{пок}$  – высота заготовки и текущая высота поковки по вертикальной оси симметрии, мм.

По результатам расчета неравномерности пластической деформации  $Q$  в сечениях поковок «фланец» и «шестерня» построены сравнительные гистограммы, рисунок 2.27.

Из рисунка 2.27 видно, что значения неравномерности деформации  $Q$  в осевых сечениях поковок «фланец» и «шестерня» меньше при штамповке из шаровой заготовки.

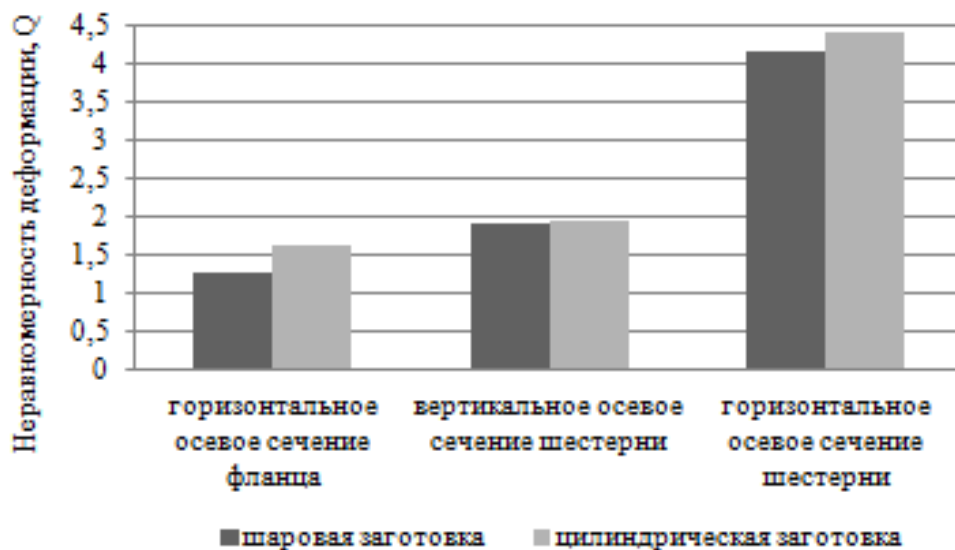


Рисунок 2.27 – Показатели неравномерности деформации при штамповке поковок «фланец» и «шестерня»

По результатам компьютерного моделирования построены графики «ход пуансона – сила штаповки» при штамповке фланца из шаровой и цилиндрической заготовок, рисунок 2.28, 2.29.

На графиках можно выделить три участка:

участок 1 – осадка заготовки, сила изменяется незначительно;  
 участок 2 – заполнения гравюры штампа;  
 участок 3 – полное заполнение всех элементов штампа, характеризуется максимальной величиной значения силы.

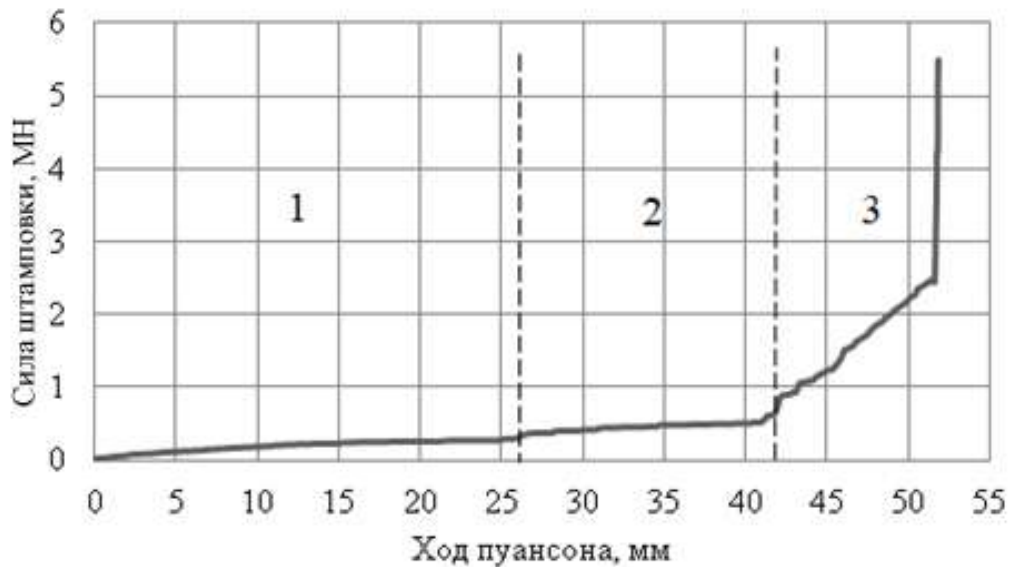


Рисунок 2.28 – Величина силы при штамповке фланца из шаровой заготовки

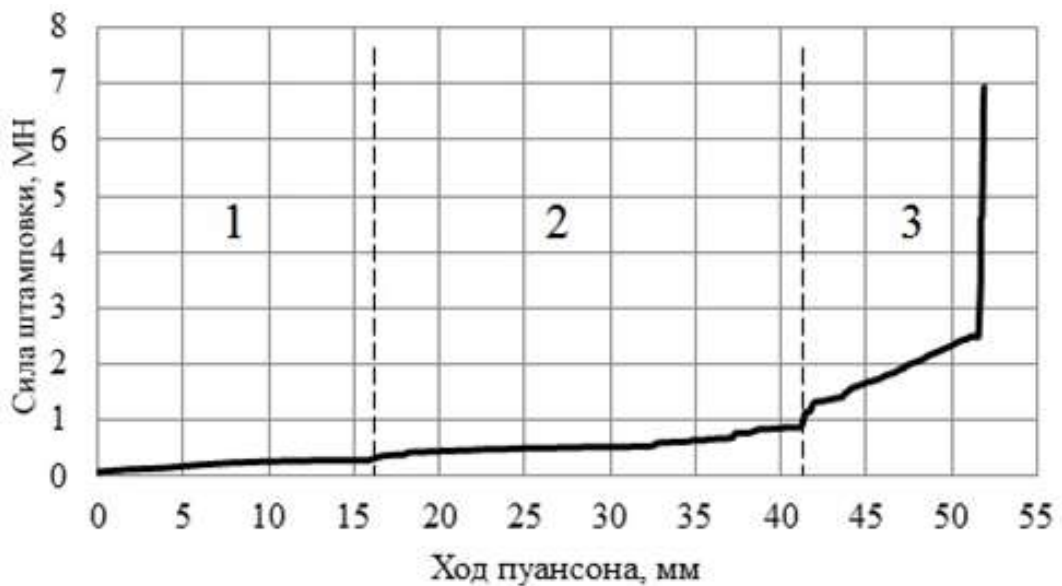


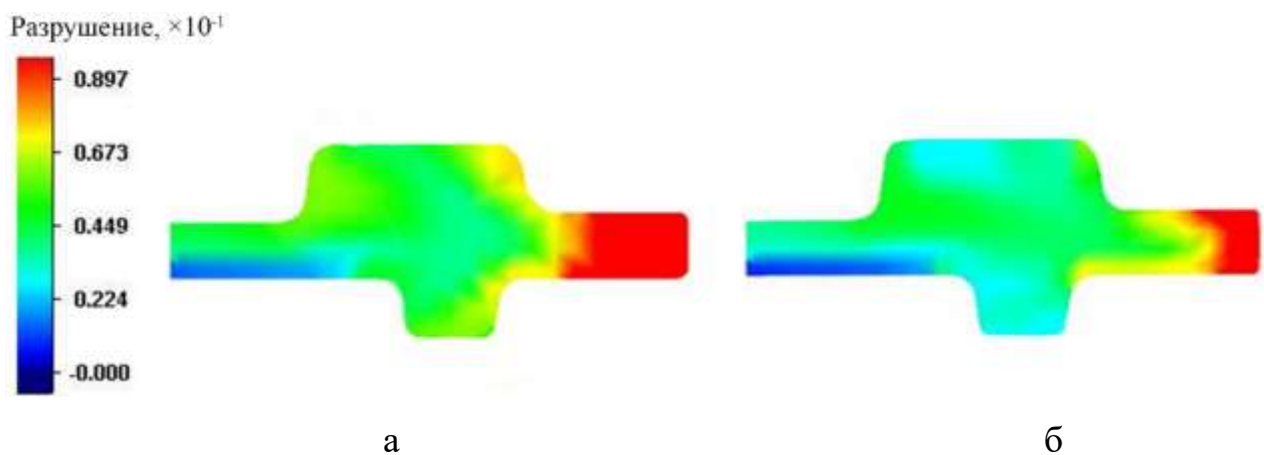
Рисунок 2.29 – Величина силы при штамповке фланца из цилиндрической заготовки

Как видно из рисунков 2.28. и 2.29, при штамповке фланца потребная сила деформации выше при использовании цилиндрической заготовки.

Для поковки «шестерня» необходимые силы штамповки составляют соответственно 5,17 МН при штамповке из цилиндрической заготовки и 4,22 МН при штамповке из шаровой заготовки.

## 2.4 Определение предельной пластичности металла при штамповке

На рисунке 2.30 приведено распределение ресурса пластичности при штамповке фланца из шаровой и цилиндрической заготовок с использованием показателя Кокрофта-Латэма.



а – шаровая заготовка; б – цилиндрическая заготовка

Рисунок 2.30 – Распределение ресурса пластичности в готовой поковке фланца

Из рисунка 2.30 видно, что наибольшее использования ресурса пластичности наблюдается в торце диска поковки. При штамповке из шаровой заготовки (рисунок 2.30а) при величине хода пуансона  $\Delta h = 26,3$  мм максимальная величина степени использования ресурса пластичности  $\psi_{\max}$  составляет 0,038, при  $\Delta h = 49$  мм  $\psi_{\max} = 0,081$ , и в готовой поковке  $\psi_{\max} = 0,18$ .

При штамповке из цилиндрической заготовки при величине хода пуансона  $\Delta h = 36,2$  мм максимальная величина степени использования ресурса пластичности  $\psi_{\max}$  составляет 0,069, при  $\Delta h = 49,4$  мм  $\psi_{\max} = 0,097$ , и в готовой поковке  $\psi_{\max} = 0,083$ . С увеличением степени деформации величина использования ресурса пластичности возрастает.

Графики использования ресурса пластичности в зависимости от величины хода пуансона для поковок «фланец» и «шестерня» представлены на рисунках 2.31, 2.32.

Можно отметить, что использование ресурса пластичности при штамповке из шаровой заготовки больше, чем при штамповке из цилиндрической заготовки, и возрастает с увеличением хода пуансона.

Как было отмечено ранее, условия деформации без разрушения по В. Л. Колмогорову и А. А. Богатову представлены формулой (1.5)  $\psi = \frac{\Lambda}{\Lambda_p} < 1$ .

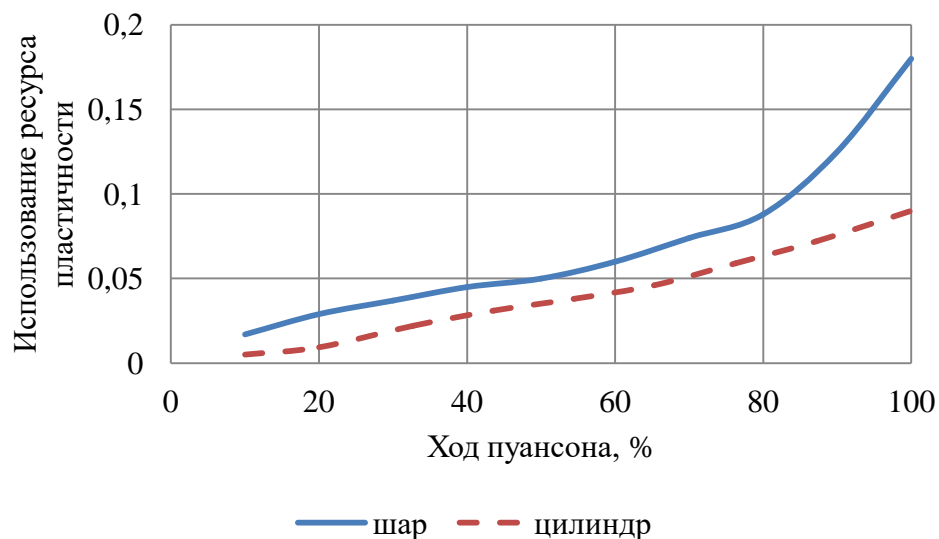


Рисунок 2.31 – Использование ресурса пластичности на боковой поверхности поковки при штамповке фланца из шаровой и цилиндрической заготовки

В свою очередь, степень деформации сдвига до разрушения (для данного металла и заданных температурно-скоростных условий) зависит от показателя напряженного состояния и описывается формулой (1.3)  $k = \frac{\sigma_{\text{ср}}}{T}$ .

Подставляя из формулы (1.4) сопротивление деформации сдвига, получим:

$$k = \frac{\sqrt{3} \sigma_{\text{ср}}}{\sigma_i}, \quad (2.19)$$

где  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений.

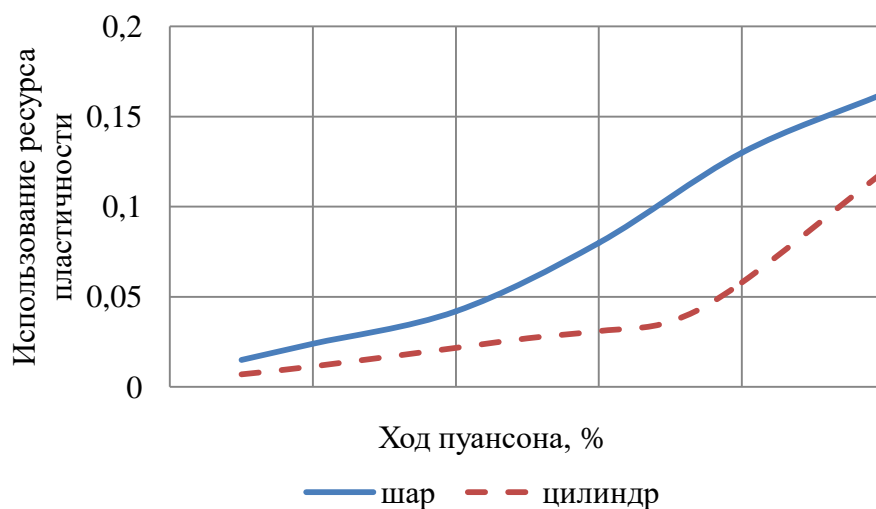


Рисунок 2.32 – Использование ресурса пластичности на боковой поверхности поковки при штамповке шестерни из шаровой и цилиндрической заготовки

При температурах горячей и полугорячей обработки давлением углеродистые и малолегированные стали обладают высокими пластическими свойствами, поэтому разрушение металла возможно только в областях, где имеются растягивающие напряжения. Чаще всего это области, в которых показатель напряженного состояния  $k$  имеет положительное значение.

$$k = \frac{\sigma_{\text{ср}}}{T} > 0, \text{ или } k = \frac{\sqrt{3} \sigma_{\text{ср}}}{\sigma_i} > 0 \quad (2.20)$$

В качестве примера рассмотрен расчет степени использования ресурса пластичности при штамповке шестерни из стали марки 20Х при температуре 850 °С:

1. На первом этапе при расчете используются данные компьютерного моделирования процесса полугорячей штамповки шестерни из шаровой заготовки, приведенные в разделе 2.3.1.

На промежуточных этапах штамповки в горизонтальном осевом сечении шестерни возникают растягивающие напряжения (среднее нормальное напряжение приобретает положительное значение). Максимальное значение среднего нормального напряжения  $\sigma_{cp}$  наблюдается в точке, расположенной на боковой поверхности шестерни:  $\sigma_{cp(max)} = 73,8$  МПа. В этой же точке определяем величину интенсивности деформаций  $\varepsilon_i = 0,51$  и интенсивности напряжений  $\sigma_i = 189,76$  МПа.

Тогда:

- накопленная частицей степень деформации сдвига:  $\Lambda = \sqrt{3}\varepsilon_i = 0,88$ ;
- интенсивность касательных напряжений:  $T = \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} = 109,56$  МПа;
- показатель напряженного состояния  $k = \frac{\sigma_{cp}}{T} = 0,67$ .

2. На втором этапе строится диаграмма пластичности в области растягивающих напряжений для стали 20Х при температуре 850 °С. Для этого в лаборатории проводим исследование пластических свойств стали марки 20Х.

При испытании образцов стали 20Х на горячее скручивание до разрушения ( $k = 0$ ) при температуре 850 °С  $\Lambda_{p_{кр\text{уч}}} = 7,65$ . При испытании образцов на растяжение до разрушения ( $k = 0,72$ ) при температуре 850 °С  $\Lambda_{p_{раст}} = 3,91$ .

На рисунке 2.33 приведена диаграмма пластичности в области растягивающих напряжений для стали 20Х при температуре 850 °С.

В настоящее время существует много различных вариантов аппроксимации диаграмм предельной пластичности [121, 126, 311–313].

В работе [311] предложено область растягивающих напряжений ( $k > 0$ ) аппроксимировать линейной функцией:

$$\Lambda_p = A + B \cdot k, \quad (2.21)$$

где  $A$  и  $B$  – константы уравнения. Константы  $A$  и  $B$  находим из граничных условий.

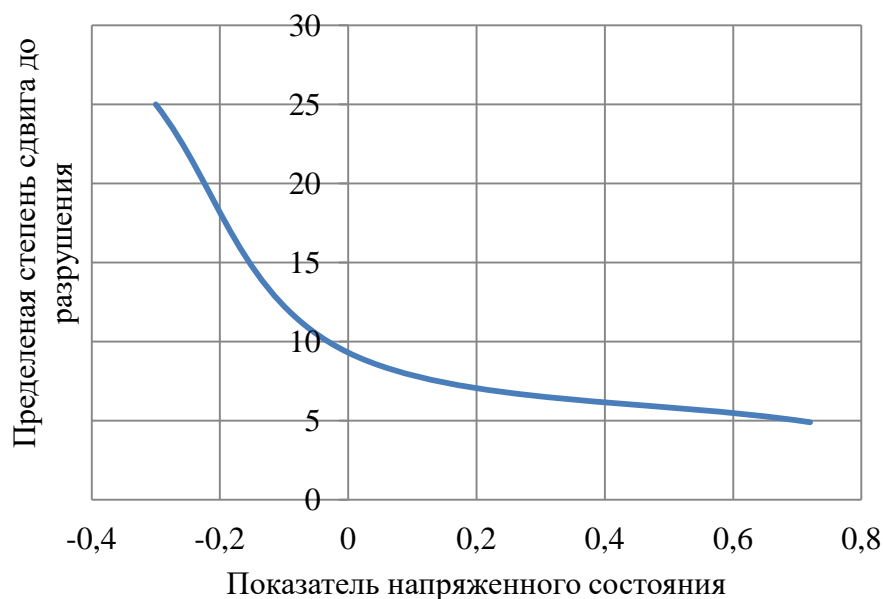


Рисунок 2.33 – Диаграмма пластичности стали 20X при температуре 850 °C

При испытании металла на торсионном пластометре (кручение)  $k = 0$ , и  $A = A_{\text{круч}}$ . При испытании металла на растяжение (с учетом наличия шейки)  $k=0,72$  [116], и  $B = \frac{A_{\text{рас}} - A_{\text{круч}}}{0,72}$ , тогда:

$$A_p = A_{\text{круч}} + \frac{A_{\text{рас}} - A_{\text{круч}}}{0,72} \cdot k, \quad (2.22)$$

Подставляя в формулу (2.23) данные испытаний образцов из стали марки 20X при температуре 850 °C, получим:

$$A_p = 7,65 - 5,2k \quad (2.23)$$

Рассчитываем величину предельной деформации сдвига на свободной боковой поверхности шестерни при показателе напряженного состояния  $k = 0,67$ , получим:  $A_p = 7,65 - 5,2 \cdot 0,67 = 4,17$ .

Тогда степень использования запаса пластичности составляет:

$$\psi = \frac{A}{A_p} = \frac{0,88}{4,17} = 0,21, \text{ или } 21 \%$$

Таким образом, на торцевой поверхности шестерни на промежуточных стадиях штамповки разрушение металла не происходит.

Аналогичные результаты получены при расчете степени использования запаса пластичности металла при штамповке фланца.

## **2.5 Напряженно-деформированное состояния металла при прямом выдавливании**

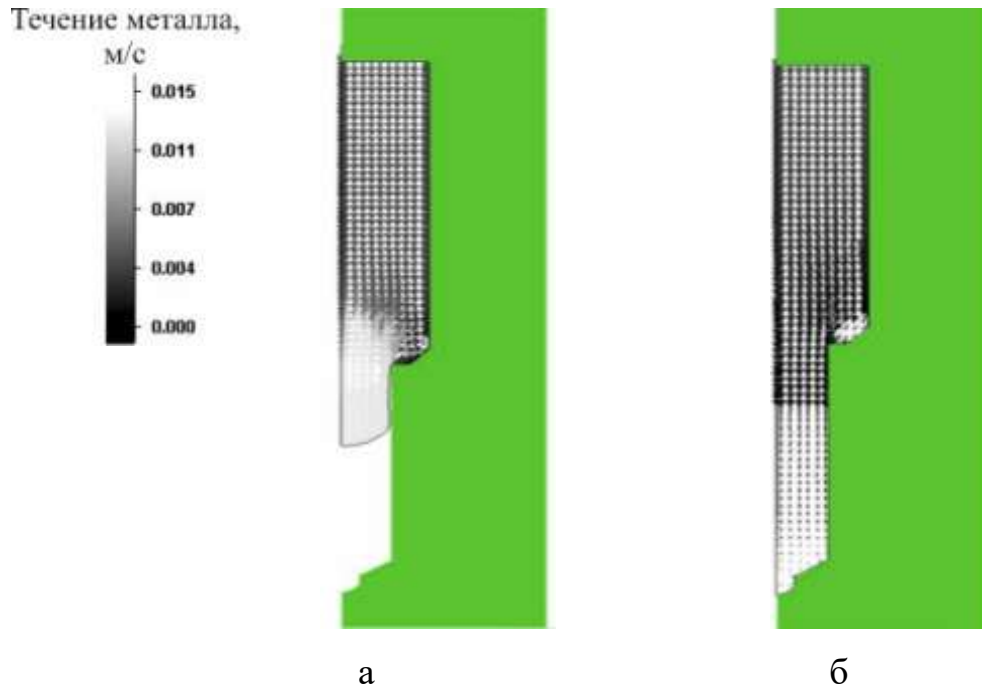
Процесс штамповки выдавливанием в настоящее время исследован не полностью. В научной литературе имеется большое количество работ, посвященных установившемуся процессу выдавливания (прямое прессование), однако отдельные вопросы течения металла требуют уточнения [187–189; 314–317].

Для исследования процесса штамповки выдавливанием было проведено компьютерное моделирование выдавливания малогабаритных деталей «корпус форсунки распылителя».

На рисунке 2.34 приведены результаты компьютерного моделирования скорости течения металла при прямом выдавливании. Ввиду симметрии показана половина штампа.

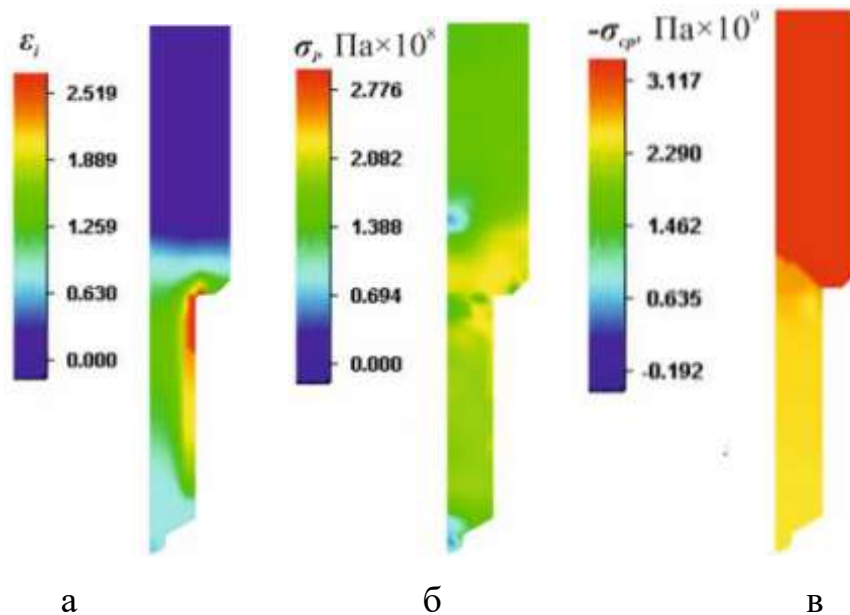
Как видно из рисунка, скорость течения металла, обозначенная вектором белого цвета, имеет максимальное значение в торцевой части стержня и в месте пережима (деформации) заготовки. Центральная часть стержня перемещается с постоянной скоростью как жесткое тело.

На рисунке 2.35 приведено напряженно-деформированное состояние поковки «корпус форсунки распылителя». Можно отметить зону высокой интенсивности деформаций в правой верхней части стержня поковки и уменьшения интенсивности деформаций по высоте стержня. Интенсивность напряжений по высоте стержня изменяется незначительно.



а – установившийся процесс; б – готовая поковка

Рисунок 2.34 – Скорость течения металла



а – интенсивность деформаций; б – интенсивность напряжений;  
в – среднее нормальное напряжение

Рисунок 2.35 – Напряженно-деформированное состояние поковки  
«корпус распылителя»

При анализе значения среднего нормального напряжения можно отметить зону высоких сжимающих напряжений в утолщенной части поковки и зону несколько меньших сжимающих напряжений в стержне поковки.

На рисунке 2.36 приведена типовая кривая силы деформации на пуансоне и матрице.

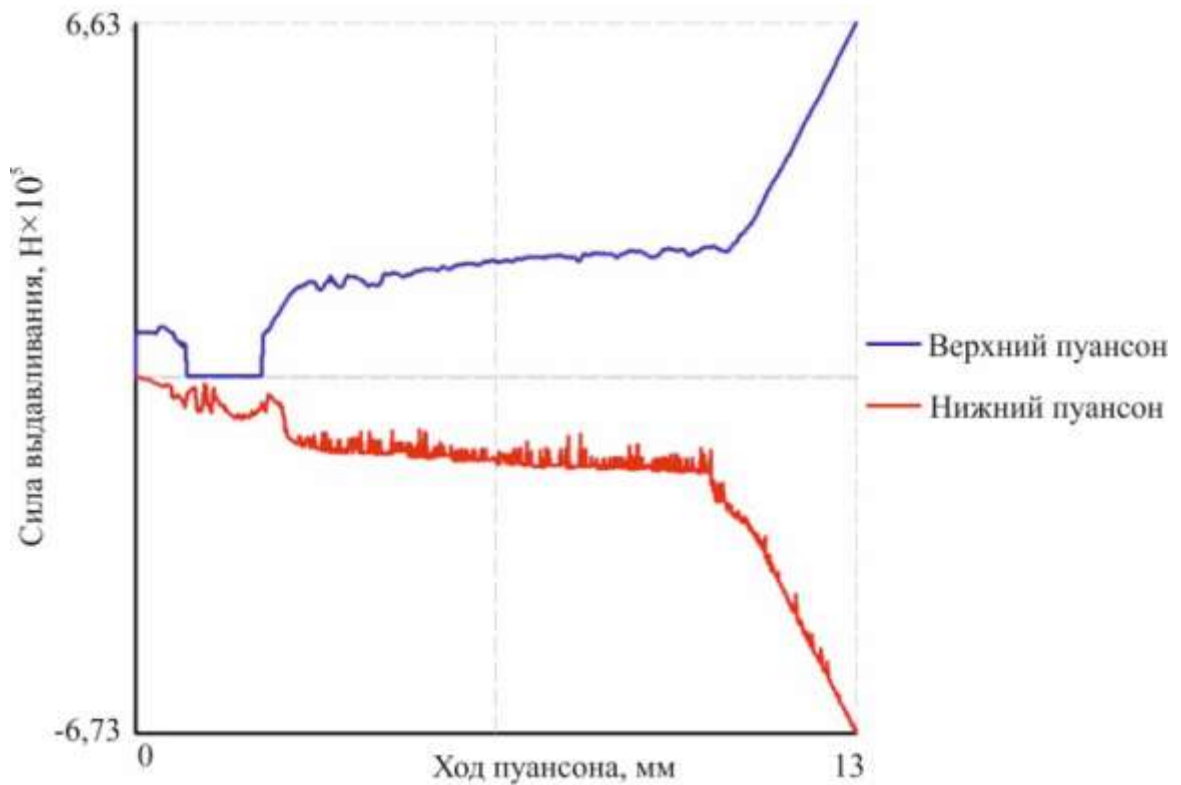


Рисунок 2.36 – График силы при выдавливании поковки «корпус распылителя»

Как видно из рисунка, на первой стадии выдавливания происходит выбирание зазоров и «распрессовка» заготовки, затем наступает стадия установившегося процесса выдавливания, при котором сила непрерывно возрастает.

На заключительной стадии выдавливания происходит заполнение металлом торца («носика») заготовки и резкое возрастание силы выдавливания.

Можно отметить, что величина силы деформации возрастает с увеличением хода пуансона.

Для исследования влияния размера заготовки, угла наклона матрицы и коэффициента трения на удельную силу выдавливания в процессе моделирования варьировали: диаметр заготовки от 14 до 24 мм, угол наклона матрицы  $\gamma$  от  $60^\circ$  до  $90^\circ$ , коэффициенте трения  $\mu$  от 0,1 до 0,3. Диаметр стержня готовой детали оставался постоянным и равным 9,6 мм. Коэффициент вытяжки  $\lambda = F_0/f$  при этом составлял от 2,2 до 6,3. Всего было поведено 32 модельных эксперимента.

На рисунках 2.37 и 2.38 приведены графики зависимости относительной удельной силы  $q$  от коэффициента вытяжки  $\lambda$  и угла наклона матрицы к вертикальной оси  $\gamma$  (рисунок 2.37 для коэффициента трения  $\mu = 0,1$  и рисунок 2.38 для  $\mu = 0,3$ ).

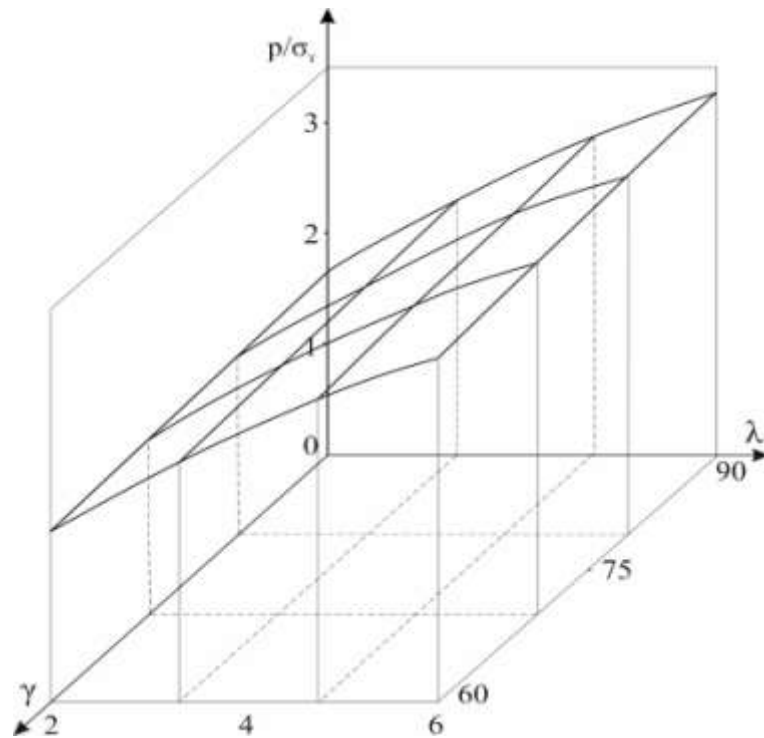


Рисунок 2.37 – Влияние коэффициента вытяжки и угла наклона матрицы на коэффициент напряженного состояния при  $\mu = 0,1$

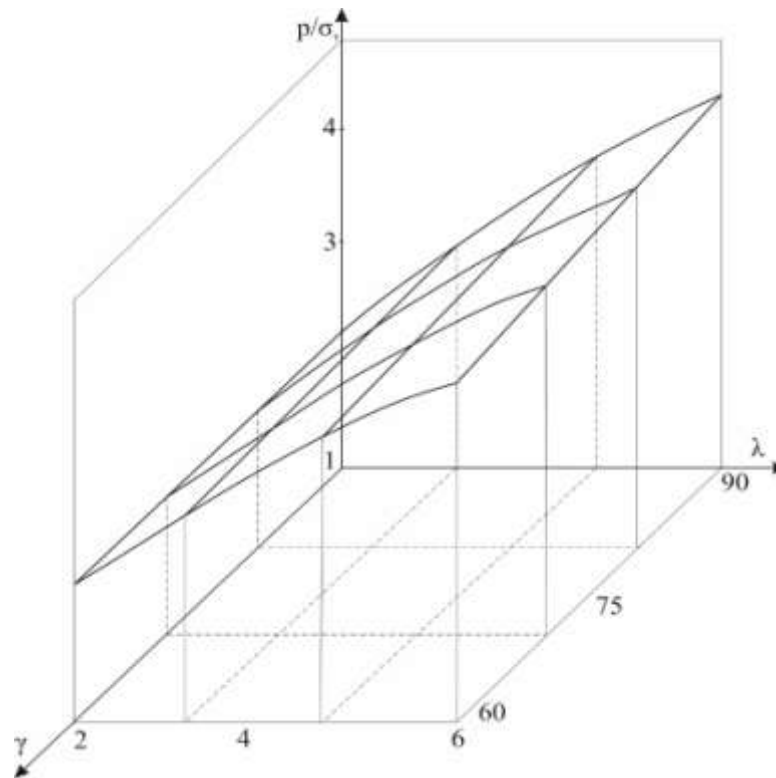


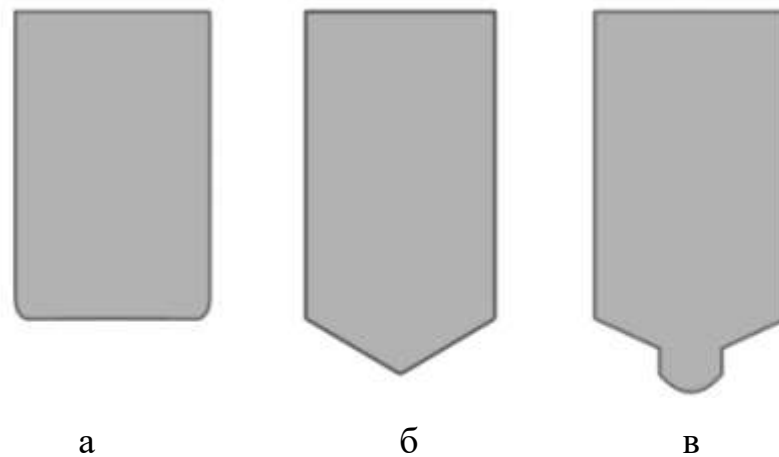
Рисунок 2.38 – Влияние коэффициента вытяжки и угла наклона матрицы на коэффициент напряженного состояния при  $\mu = 0,3$

Как видно из рисунков, с увеличением коэффициента вытяжки относительная удельная сила увеличивается. Относительная удельная сила растет с увеличением угла наклона матрицы ( $\gamma$ ). С увеличением коэффициента трения  $\mu$  возрастает величина относительной удельной силы, однако характер общей зависимости  $q = f(\lambda, \gamma)$  не изменяется.

Полученные данные не противоречат ранее проведенным исследованиям [205].

Также было исследовано заполнение металлом торцевой части поковки стержня диаметром 9,6 мм. Торцевая часть стержня поковки выполнена в виде цилиндра, конуса и специальной формы. На рисунке 2.39 приведена конфигурация торцевой части стержня.

Результаты распределения интенсивности напряжений в торцевой части стержня поковки приведены на рисунке 2.40.



а – цилиндрическая форма; б – коническая форма; в – специальная форма  
 Рисунок 2.39 – Конфигурация торцевой части стержня при выдавливании  
 в закрытых штампах

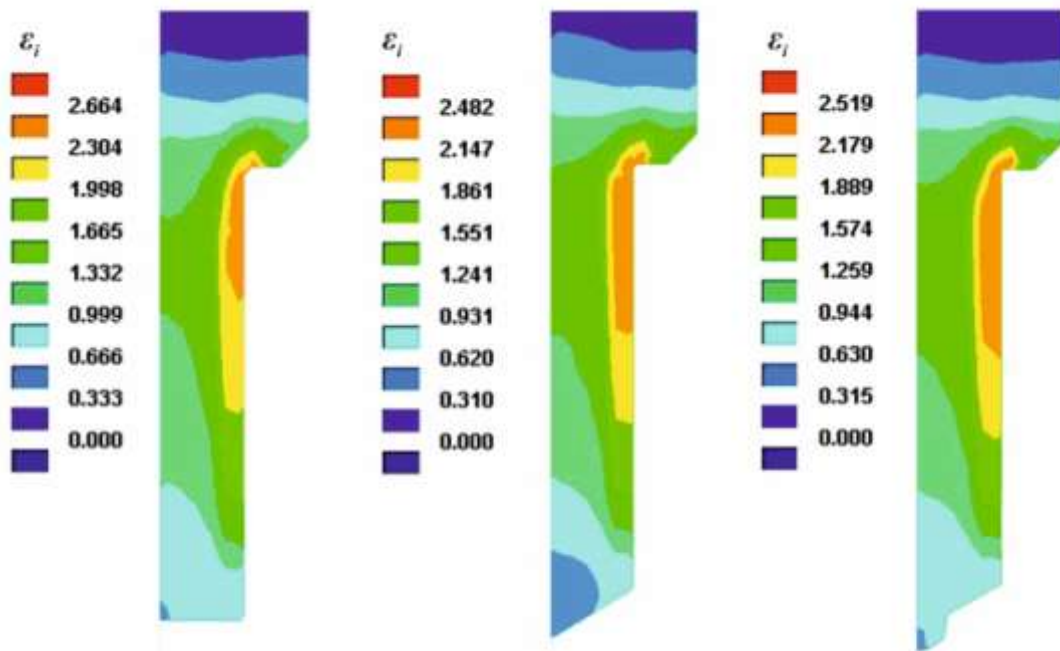


Рисунок 2.40 – Мозаика интенсивности деформаций при заполнении  
 торцевой части стержня поковки

Как видно из рисунка 2.40, наибольшая интенсивность деформаций наблюдается в средней части выходного цилиндрического участка. Наличие фаски в нижней части приемника исходной заготовки исключает наличие застойной зоны.

Влияние формы торцевой части на величину силы штамповки оценивалась в виде коэффициента  $K_\phi$ :

$$K_\phi = \frac{p}{p_\phi}, \quad (2.24)$$

где  $p$  – удельная сила деформации при заполнении торцевой части стержня, кН;

$p_\phi$  – удельная сила деформации при установившемся процессе выдавливания, кН.

Коэффициенты формы торцевой части поковки:  $K_\phi$  для цилиндра, конуса и специальной формы, полученные по результатам компьютерного моделирования, составляют 3,14; 2,9; 2,8 соответственно.

Таким образом, на заполнение торцевой части стержня цилиндрической формы требуется большая сила, чем для заполнения конической и специальной формы.

## Выводы по главе 2

1. Разработана виртуальная модель стана поперечно-винтовой прокатки и проведены исследования напряженно-деформированного состояния металла при прокатке геометрически точных шаровых заготовок при каждом повороте валков последовательно на  $90^0$ .

Установлено, что интенсивность деформаций вдоль оси прокатки распределена неравномерно. Основная деформация металла при прокатке шаровых заготовок наблюдается на формирующем участке, причем наибольшая величина интенсивности деформаций наблюдается под первой ребордой при ее внедрении в металл заготовки. На отделочном участке, где происходит обкатка шаров, интенсивность деформаций незначительна; наибольшие значения интенсивности напряжений наблюдается при деформации металла под первой ребордой и составляют 180–220 МПа. При прокатке шара при всех четырех положений валков (при повороте валков на  $90^0$ ) растягивающие напряжения отсутствуют, величина среднего нормального напряжения во всех точках деформированного металла отрицательна, напряженное состояние металла – объемное сжатие.

Использование пластичности металла распределяется по длине прокатываемой заготовки неравномерно. Наибольшее значение величины использования пластичности наблюдается под ребордой валка. С увеличением высоты реборды происходит разделение металла на шаровые заготовки, и коэффициент использования пластичности плавно повышается от 0,716 до 1,0. Истощение ресурса пластичности соответствует разрушению металла – отделению шаровой заготовки от прутка.

2. Разработаны научные основы применения обобщенной функции желательности для определения оптимальной температуры нагрева заготовок для полугорячей штамповки.

3. Разработана виртуальная модель и проведено компьютерное моделирование полугорячей штамповки в закрытых штампах из шаровой и цилиндрической заготовок поковок круглых в плане.

Установлено, что вне зависимости от вида заготовки полость штампа полностью заполняется металлом, поверхностных дефектов на готовой поковке не обнаружено. Отмечено наличие растягивающих напряжений на свободной поверхности поковки на промежуточных стадиях формоизменения. Однако максимальная степень использования запаса пластичности для всех исследованных поковок не превышает 25 %.

При штамповке из шаровой заготовки неравномерность деформации на 5–10 % меньше, чем при штамповке из цилиндрической заготовки. Можно отметить также, что при штамповке из шаровой заготовки сила штамповки ниже, чем при штамповке из цилиндрической заготовки.

4. Проведены исследования технологии полугорячего прямого выдавливания в закрытом штампе. По результатам исследования установлено, что торцевая часть стержня поковки любой конфигурации заполняется металлом. При заполнении металлом торцевой части поковки сила выдавливания ~ в 3 раза больше, чем при свободном течении металла. С увеличением коэффициента вытяжки от 2 до 4 относительная удельная сила возрастает в 1,8–1,9 раза; скорость течения металла имеет максимальное значение в торцевой части стержня и в месте пережима (деформации) заготовки. Центральная часть стержня перемещается с постоянной скоростью как жесткое тело. С увеличением коэффициента трения  $\mu$  возрастает величина относительной удельной силы, однако характер общей зависимости  $q = f(\lambda, \gamma)$  не изменяется.

### **3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУГОРЯЧЕЙ БЕЗОБЛОЙНОЙ ШТАМПОВКИ**

В данном разделе рассмотрены методики и результаты: лабораторных и промышленных исследований разделения металла на стане поперечно-винтовой прокатки (шаропрокатном стане); экспериментальных исследований по влиянию температуры на прочностные и пластические свойства металла, процессы окисления стали при нагреве; нагрева металла для штамповки, штамповки поковок круглых в плане, операции выдавливания.

#### **3.1 Экспериментальное исследование разделения металла на шаровые заготовки на стане поперечно-винтовой прокатки**

Разделение стального прутка на шаровые заготовки осуществляется между двумя вращающимися валками, на бочках которых нарезаны винтовые калибры. Профиль и размеры калибра соответствуют профилю прокатываемого изделия. Оси прокатных валков обычно наклонены под небольшим углом к оси прокатываемой заготовки, за счет чего обеспечивается осевая подача металла в валках.

Передний конец нагретого прутка задается во вращающиеся валки прокатного стана. При этом заготовка начинает вращаться и одновременно продвигаться по оси прокатки. В валках вращающаяся заготовка обжимается ребрами калибра и приобретает форму шара, соединенного перемычкой с остальной заготовкой. При дальнейшем продвижении в валках шар калибруется и полностью отделяется от прутка [318].

Для удержания обжимаемой заготовки на оси прокатки служат проводки.

Очаг деформации при прокатке шаров имеет два основных участка [59]:

- формирующий участок, где заготовка обжимается с изменением формы и размеров винтовой реборды;
- отделочный участок, где форма и размеры реборды остаются неизменными, а обжатие осуществляется за счет оваллизации заготовки.

Формовка шара осуществляется ребордами валков, высота которых постепенно возрастает. В производственных условиях для упрощения расчета калибровки и изготовления прокатных валков принимают, что высота реборды калибра изменяется по закону прямой линии [319].

Для нормального процесса прокатки профиль и размеры формирующего участка калибра рассчитывается таким образом, чтобы в процессе обжатия заготовки соблюдались следующие три основных положения [62]:

- объем металла, обжимаемый в калибре, должен оставаться постоянным в течение всего процесса формовки;
- изменение профиля и размеров реборды калибра должно соответствовать вытяжке обжимаемой заготовки;
- обжатие должно осуществляться относительно узкими участками, чтобы предотвратить разрыхление металла по оси заготовки.

Соблюдение указанных условий обеспечивает прокатку шаров правильной геометрической формы при минимальном расходе энергии на деформацию. Однако при проектировании и изготовлении калиброванных валков неизбежны отступления от этих условий в пределах, существенно не нарушающих нормальное течение процесса прокатки.

Согласно первому условию необходимо, чтобы объем некоторой части заготовки, захваченной валками, оставался неизменным по мере прохождения его через остальные участки калибра. В этом случае в любой момент прокатки не будет избытка металла. При появлении избытка металла искажается геометрическая форма шара и возможно появление пустот в осевой зоне

заготовки. Наличие небольшого избытка металла допускается лишь в начале калибра, когда реборда еще сравнительно низка и не препятствует вытеснению металла из калибра.

Согласно второму условию нормального образования формы шара вытяжка обжимаемого участка заготовки должна соответствовать изменению формы и размеров реборды калибра. В случае прокатки шаров длина обжимаемой перемычки ( $b_a$ ) должна быть равна ширине прямого участка реборды калибра ( $a_a$ ). Если изменение ширины реборды калибра меньше вытяжки обжимаемой заготовки ( $a_a < b_a$ ), то металл будет отходить от реборды, и на поверхности заготовки будет образовываться накат, который при дальнейшем обжати заготовки раскатывается в плену. Если же изменение ширины реборды калибра больше, чем вытяжка заготовки ( $a_a > b_a$ ), то в обжимаемой перемычке возникают осевые растягивающие напряжения, которые могут привести к разрыву перемычки.

Таким образом, для выполнения как первого, так и второго условий образования формы шара реборда на различных участках калибра должна иметь строго определенную ширину. В связи с этим формирующий участок калибра имеет переменный шаг нарезки.

На основании третьего положения можно отметить, что обжатие заготовки ведется сравнительно узкими участками, поэтому разрушение металла в осевой зоне не происходит [59; 62].

Таким образом при проектировании калибровки формирующего участка валков необходимо рассчитать изменение ширины реборды и переменный шаг нарезки калибров.

### 3.1.1 Исходные данные

Исследования прокатки шаровых заготовок проводились на промышленном шаропрокатном комплексе ШПК 40-80, предназначенном для прокатки шаров диаметром от 40 до 80 мм [59; 319; 320].

Нагрев заготовки, горячекатаного стального прутка, перед прокаткой производится в нагревательной печи до температуры 900–1100 °С.

Высокие требования к качеству шаровой заготовки, а также необходимость производства шаровых заготовок большого диаметра (свыше 90 мм) привели к необходимости модернизации линии шаропрокатного стана.

Для модернизации основного оборудования необходимо провести расчеты калибровки валков стана, исследовать формоизменение металла в калибрах и разработать технологию прокатки шаров большого диаметра. Модернизацию основного оборудования проводили за два этапа. На первом этапе исследовали возможность прокатки шаровых заготовок номинальным диаметром 90 мм [321].

### 3.1.2 Калибровка валков стана поперечно-винтовой прокатки

Разработана новая методика расчета калибровки валков стана поперечно-винтовой прокатки, [319; 322–325], которая отличается от существующих тем, что при подрезке калибров изменяется ширина реборды, которую необходимо пересчитывать. При разработке данной методики калибровки валков использовали общие положения по калибровке, изложенные в работах [59, 62, 64–66]. Алгоритм расчета калибровки валков представлен на рисунке 3.1.

Исходные данные для калибровки валков приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Исходные данные для калибровки валков

| Наименование                    | Размерность | Величина |
|---------------------------------|-------------|----------|
| Номинальный диаметр шара        | мм          | 90       |
| Номинальный диаметр валков      | мм          | 460–440  |
| Длина бочки валка, не более     | мм          | 370      |
| Угол раскатки                   | град.       | 0–1,5    |
| Угол подачи                     | град.       | 0–7      |
| Частота вращения рабочих валков | об/мин      | 65–130   |
| Общая длина калибра             | град.       | 1260     |
| Длина формующего участка        | град.       | 540      |
| Длина отделочного участка       | град.       | 720      |

Расчет калибровки выполняется для левого валка, калибровка правого валка аналогична. Единственное отличие в том, что после нарезки реборды правого валка она подрезается по высоте на определенную величину.

Как уже отмечалось, винтовой калибр при прокатке шаров можно разделить на два участка – формующий и отделочный. На формующем участке происходит обжатие перемычки и формирование шаров из круглой заготовки, соединенных перемычками. На отделочном участке происходит окончательная отделка шаров. На этом участке калибра обжатие шара не происходит.

Протяженность калибра (число витков) условно измеряется в градусах развертки винтовой линии. За начало калибра ( $0^0$ ) принят центр радиуса калибра, расположенного на прямой, проходящей вдоль торца валка со стороны выхода готового шара. Диаметр заготовки равен  $d_z = d_{ш}/\eta_0$ , где  $d_{ш}$  – диаметр шара, мм;  $\eta_0$  – коэффициент, учитывающий радиальный рост размера шара во время прокатки. Примем  $\eta_0 = 1,03$ .

По ГОСТ 2590-2006 «Прокат сортовой стальной горячекатаный круглый» выбираем ближайшую по диаметру заготовку.

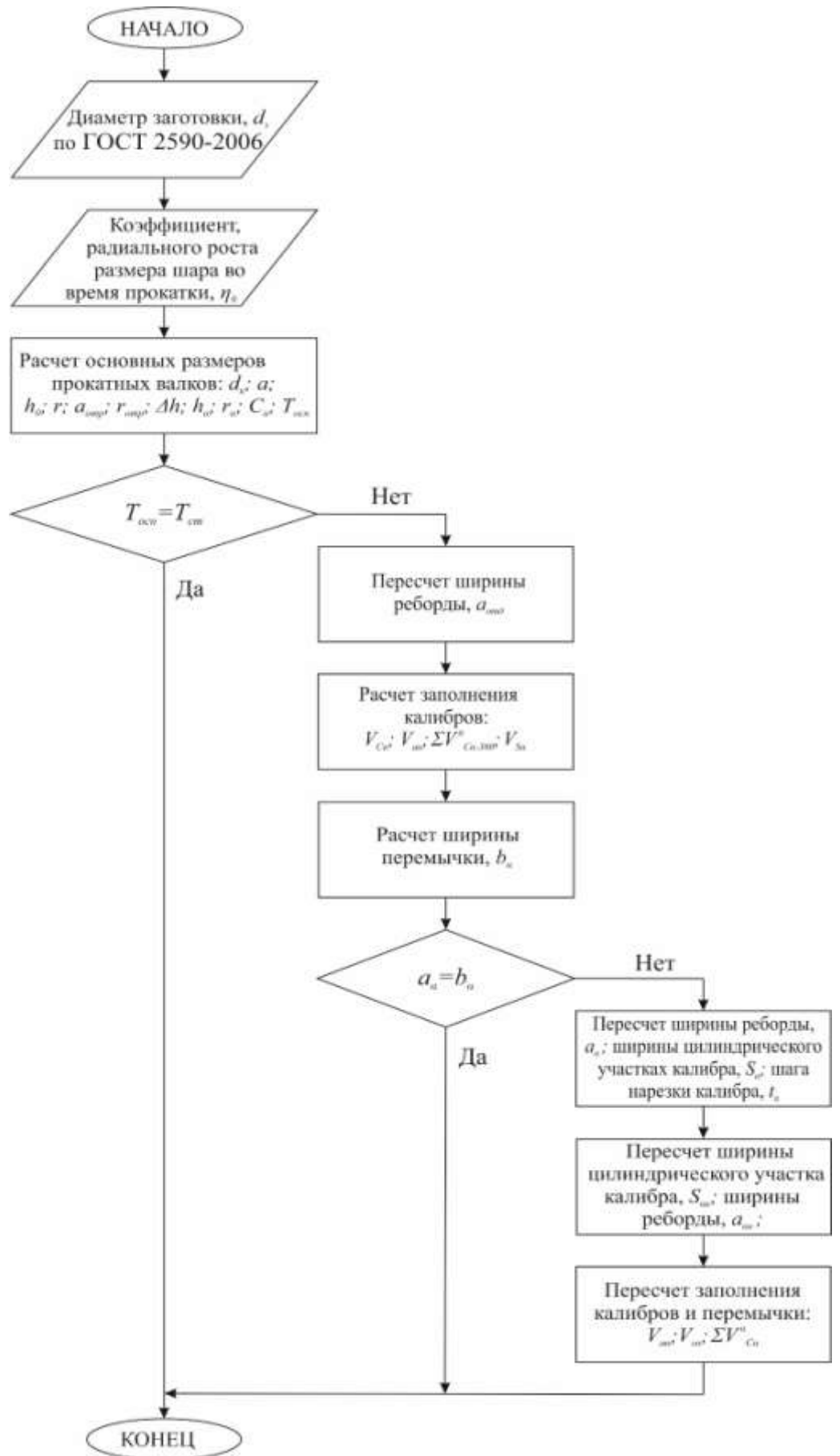


Рисунок 3.1 – Алгоритм расчета калибровки валков

Рассчитываем уточненный диаметр шара:

$$d_{\text{ш}} = d_3 \cdot \eta_0, \text{ мм.} \quad (3.1)$$

Дальнейший расчет калибровки можно разбить на несколько последовательных этапов.

На предварительном этапе определяются основные размеры прокатных валков (рисунок 3.2).

Диаметр калибра:

$$d_{\text{к}} = d_{\text{ш}} \cdot \eta_t, \text{ мм,} \quad (3.2)$$

где  $\eta_t = 1,013$  – коэффициент, учитывающий температурное расширение металла.

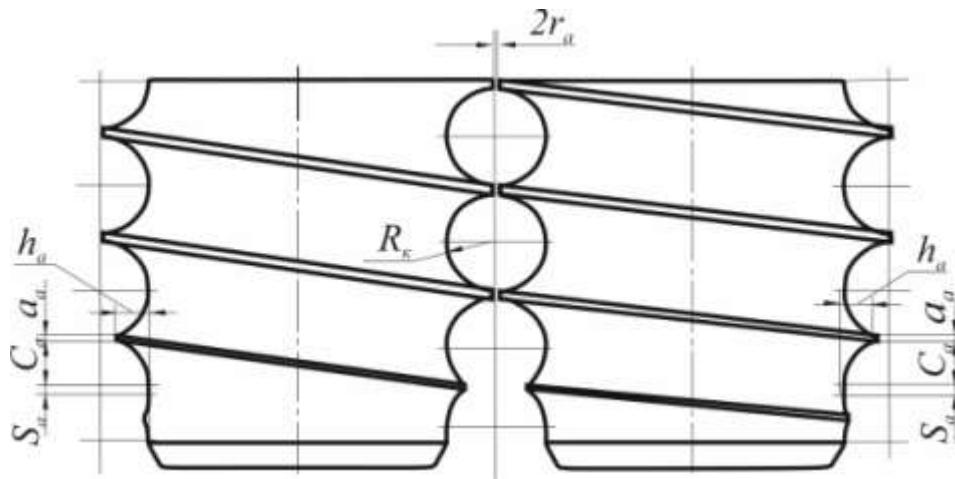
Минимальная ширина реборды:

$$a_{\text{мин}} = 0,04R_{\text{к}} + 1,3, \quad \text{мм,} \quad (3.3)$$

где  $R_{\text{к}} = d_{\text{к}}/2$  – радиус калибра, мм.

Начальная высота реборды:

$$h_0 = 1,5 + 0,007(R_{\text{к}} - 10), \text{ мм.} \quad (3.4)$$



$h_{\alpha}$  – высота реборды валка;  $a_{\alpha}$  – ширина реборды валка;  $C_{\alpha}$  – ширина сферического участка калибра;  $r_{\alpha}$  – радиус перемычки;  $R_{\text{к}}$  – радиус калибра;  $S_{\alpha}$  – ширина цилиндрического участка калибра

Рисунок 3.2 – Основные размеры прокатных валков

Минимальный радиус перемычки:

$$r = 1 + 0,04(R_K - 10), \text{ мм.} \quad (3.5)$$

Ширина реборды перед отрезкой:

$$a_{\text{отр}} = 4 + 0,14(R_K - 10), \text{ мм} \quad (3.6)$$

Разбиваем длину калибра на участки равной длины, для предварительного расчета достаточен угол разбивки  $\Delta\alpha = 90^0$ .

Радиус перемычки в конце формовки при  $\alpha = \alpha_\phi - \Delta\alpha$ .

$$r_{\text{отр}} = r + \frac{R_K - h_0 - r}{\alpha_\phi}, \text{ мм} \quad (3.7)$$

где  $r$  – минимальный радиус перемычки, мм;

$h_0$  – начальная высота реборды, мм;

$\alpha_\phi$  – длина формующего участка в град;

$\Delta\alpha$  – угол разбивки калибра, град.

Изменения высоты реборды при повороте валка на  $90^0$ :

$$\Delta h = r_{\text{отр}} - r, \text{ мм.} \quad (3.8)$$

Для каждого угла поворота валков от  $\alpha_{\text{общ}}$  до  $0^0$  через промежуток  $90^0$  находим высоту реборды:

$$h_{\alpha-90} = h_\alpha + \Delta h, \text{ мм,} \quad (3.9)$$

Рассчитываем радиус перемычки. Радиус перемычки на формовочном участке определяем по зависимости:

$$r_{(\alpha-90)} = r_\alpha + \Delta h, \text{ мм.} \quad (3.10)$$

Определяем ширину сферического участка  $C_\alpha$ :

$$C_\alpha = \sqrt{R_K^2 - r_\alpha^2}, \text{ мм.} \quad (3.11)$$

Так как разделение перемычки начинается еще во время формовки шара, то принимаем ширину сферического участка отрезки именно на угле поворота валка  $\alpha_{\text{отд}+90}$ , предшествующему отделочному участку калибра.

Определяем основной шаг нарезки реборды:

$$\frac{T}{Z} = 2 \cdot C_{\text{отр}} + a_{\text{отр}}, \quad (3.12)$$

где  $Z$  – число заходов реборды валка. Для однозаходной калибровки  $Z = 1$ .

Нарезка калибров производится на токарно-винторезном станке модели 165 (или модели РТ 911Ф). Проверяем возможность получения расчетного основного шага нарезки реборды. Методом подбора шестерен гитары станка находим максимально приближенное значение основного шага,  $T_{\text{ст}}$ .

По величине нового шага уточняем ширину реборды на отделочном участке. Из уравнения (3.12), рассчитываем предварительную ширину реборды на отделочном участке:

$$a_{\text{отд}} = T_{\text{стосн}} - 2 \cdot C_{\text{отд}}, \text{ мм.} \quad (3.13)$$

Согласно рекомендациям [64] для определения ширины реборды калибра используем кривую, имеющую минимум. Поэтому при обжати формуемой заготовки ширина реборды вначале должна уменьшаться с начальной ширины  $a_{\text{нач}}$  до минимальной ширины  $a_{\text{мин}}$ , а затем постепенно увеличивается до величины  $a_{\text{отд}}$ .

С учетом ранее проведенных расчетов (3.3), (3.13), принимаем ширину реборды  $a_{\text{нач}}$ ,  $a_{\text{мин}}$ ,  $a_{\text{отд}}$  и рассчитываем ширину реборды на отделочном участке при повороте валка на  $90^0$ .

Исходя из принятой ширины реборды, рассчитываем заполнение калибра металлом. На рисунке 3.3 приведены объемы металла, которые необходимы для заполнения калибра.

Объем металла в сферической части калибра:

$$V_{c\alpha} = \pi \cdot C_{\alpha} \cdot \left( R_K^2 - \frac{C_{\alpha}^2}{3} \right), \text{ мм}^3. \quad (3.14)$$

Объем металла в перемычках:

$$V_{a\alpha} = \pi \cdot r_{\alpha}^2 \cdot a_{\alpha}, \text{ мм}^3. \quad (3.15)$$

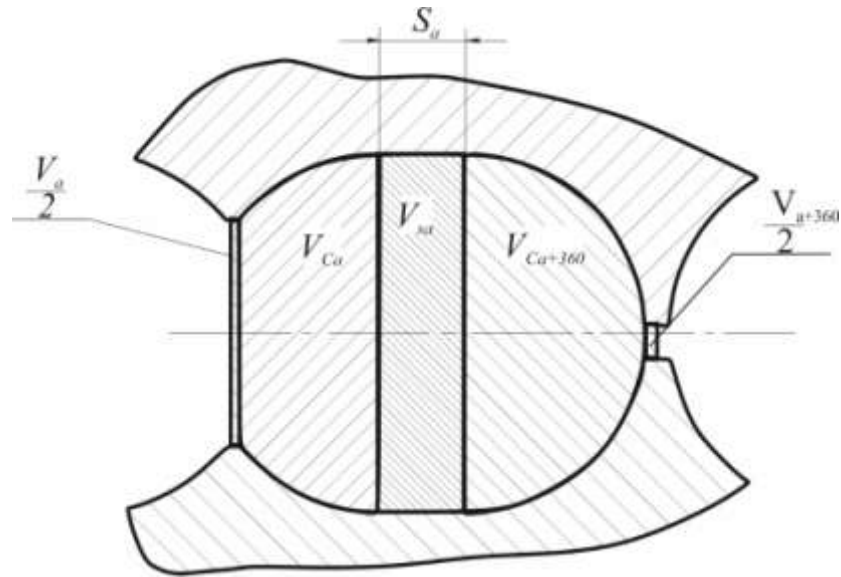


Рисунок 3.3 – Заполнение калибра металлом

Объем шара с перемычками:

$$V_{ш} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_K^3 + \pi \cdot r_\alpha^2 \cdot a_\alpha, \text{ мм}^3. \quad (3.16)$$

Зная значения объема металла в перемычках и сферических частях калибра, можем определить объем металла в цилиндрической части калибра.

$$V_{S\alpha} = V_{ш} - \sum V_{\alpha-360}^\alpha, \text{ мм}^3, \quad (3.17)$$

где

$$\sum V_{\alpha-360}^\alpha = \frac{V_{a\alpha}}{2} + V_{Ca} + \frac{V_{a\alpha-360}}{2} + V_{Ca-360}, \text{ мм}^3. \quad (3.18)$$

На основном этапе расчета проверяем принятую ширину перемычки  $b_\alpha$  для каждого угла  $\alpha$  по условию соответствия вытяжке:

$$b_\alpha = \frac{V_{a\alpha+90} - 2 \cdot (V_{Ca} - V_{Ca+90})}{\pi \cdot r_\alpha^2}, \text{ мм}. \quad (3.19)$$

Значение  $b_\alpha$  на заходе формовочного участка имеет отрицательное значение, так как перемычка еще не сформировалась, но по мере вытяжки ширина перемычки приобретает положительное значение. До момента отрезки перемычки ее длина должна быть равна ширине реборды во избежание переполнения и

плены. Исходя из этого условия, производится перерасчет ширины реборды и пересчет объемов металла на участках калибра.

Ширина цилиндрического участка калибра:

$$S_{\alpha} = \frac{V_{S\alpha}}{\pi \cdot R_K^2}, \text{ мм.} \quad (3.20)$$

На первой итерации рассчитываем значения ширины реборды по формуле:

$$a_{\alpha} = T_{\text{осн}} - 2C_{\alpha} - S_{\alpha}, \text{ мм.} \quad (3.21)$$

Принимаем окончательные значения ширины реборды. Определяем шаги нарезки калибра, рассчитывая от  $\alpha_{\text{отд} - 90}$  до  $\alpha_{\text{общ}}$

$$t_{\alpha} = T_{\text{осн}} - \frac{360}{\Delta\alpha} (S_{\alpha+90} - S_{\alpha}), \text{ мм.} \quad (3.22)$$

На последнем этапе проводим корректировку калибровки прокатных валков. Для этого вычисляем ширину цилиндрического участка калибра, исходя из полученных шагов, на углах от  $\alpha_{\text{отд} - 90}$  до  $\alpha_{\text{общ}}$ .

$$S_{\alpha} = \frac{T_{\text{осн}} - t_{\alpha}}{4} + S_{\alpha - \Delta\alpha}, \text{ мм} \quad (3.23)$$

На второй итерации, согласно рисунку 3.4, по формуле (3.12) уточняем ширину реборды.

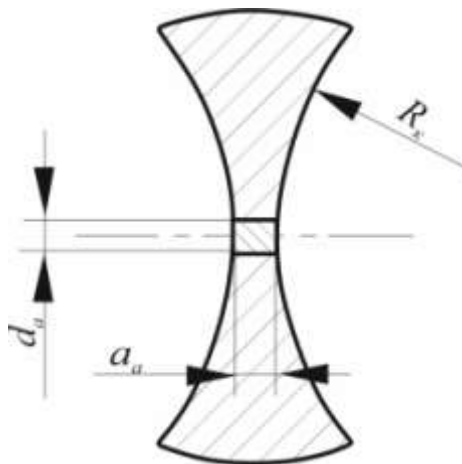


Рисунок 3.4 – Заполнение перемычки

Уточняем объем металла в перемычках:

$$V_{\alpha} = \pi \cdot r_{\alpha}^2 \cdot a_{\alpha}, \text{ мм}^3. \quad (3.24)$$

Уточняем объем металла в цилиндрической части:

$$V_{s\alpha} = \pi \cdot R_K^2 \cdot S_{\alpha}, \text{ мм}^3. \quad (3.25)$$

Проверяем заполнение калибров по формуле (3.18). Заполнение калибра по мере прокатки должно приближаться к полному объему шара.

Полученные значения ширины реборды  $a_{\alpha}$  и величины цилиндрического участка калибра  $S_{\alpha}$ , мало отличаются друг от друга. Однако корректировка размеров позволяет получить геометрически точный шар и несколько снизить износ калибров.

По окончательным результатам строим график изменения высоты реборды и график подрезки реборды. Подрезка реборды производится только на формирующем участке при каждом повороте валка на  $90^{\circ}$ .

Новая методика расчета калибровки валков для прокатки шаров внедрена в производство на АО «Евраз ЗСМК», приложение Б.

### **3.1.3 Производственные исследования прокатки шаровых заготовок диаметром 90 мм**

Для исследования возможности прокатки шаровых заготовок большого диаметра на существующем оборудовании были проведены исследования по определению усилия прокатки шаровых заготовок диаметром 90 мм (фактический диаметр 93 мм). Калибровка для прокатки исследуемой шаровой заготовки – однозаходная. Расчет калибровки валков приведен в Приложение Б. Согласно паспорту на прокатное оборудование, допустимые усилия прокатки составляют 690 кН.

Для замера силовых параметров прокатки использовали месдозы, которые устанавливали под нажимные винты прокатного стана. После усиления сигналы от месдоз фиксировались на осциллографе [297; 320; 326].

Осциллограмма усилия прокатки представлена на рисунке 3.5 и представляет собой пилообразные кривые изменения силы прокатки. При каждом полном обороте валка изменение силы на осциллограмме имеет два максимума.

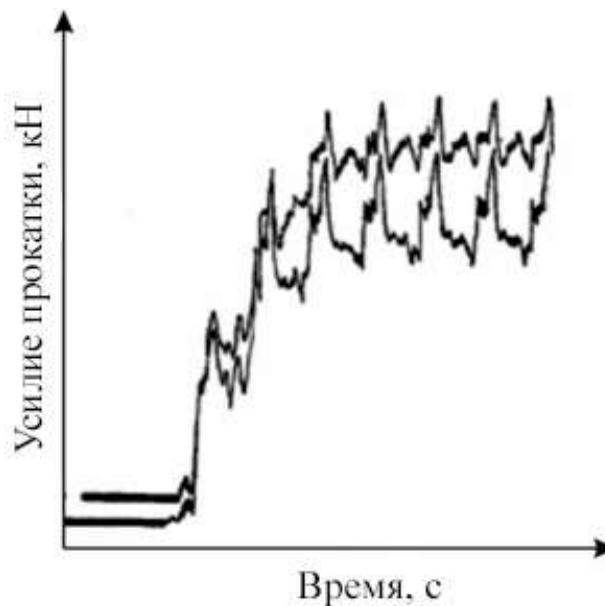


Рисунок 3.5 – Типовая осциллограмма изменения усилия при прокатке шара

При вращении валков с начала внедрения реборды валка в металл происходит увеличение усилия до угла поворота  $240^{\circ}$ , далее происходит отделение шара от штанги и резкое уменьшение усилия, после чего при повороте валка на  $285^{\circ}$  шар калибруется с небольшим увеличением усилия и при дальнейшем повороте валка на  $360^{\circ}$  шаровая заготовка выходит из валков с незначительным уменьшением силы прокатки.

Далее цикл прокатки повторяется с изменением усилия прокатки за каждый оборот валка и выбросом одной шаровой заготовки.

Для анализа влияния температуры и скорости на усилие прокатки были проведены экспериментальные исследования на стане поперечно-винтовой

прокатки ШПК 40-80. При проведении исследований использовали метод планирования экспериментов [326].

В качестве факторов (независимых переменных) были выбраны:

$X_1$  – температура прокатки, °С;

$X_2$  – скорость прокатки, об/мин.

Локальная область определения факторов устанавливалась исходя из производственных условий. Варьирование факторов проводилось на двух уровнях. Величина варьирования факторов и их значения в натуральном масштабе на основном верхнем и нижнем уровнях приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Планирование эксперимента при определении силы прокатки

| Факторы                           | Температура прокатки, °С | Скорость прокатки, об/мин |
|-----------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Основной уровень, $X_i$           | 975                      | 55                        |
| Интервал варьирования, $\Delta x$ | 75                       | 25                        |
| Верхний уровень, $X_i = +1$       | 1050                     | 80                        |
| Нижний уровень, $X_i = -1$        | 900                      | 30                        |

При двухфакторном эксперименте необходимо провести 4 опыта. После реализации опытов можно построить следующую линейную модель:

$$Y = b_0 + b_0X_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2, \quad (3.26)$$

где  $Y$  – функция отклика;

$b_0, b_1, b_2, b_{12}$  – коэффициенты регрессии;

$X_0, X_1, X_2$  – факторы эксперимента.

План эксперимента в кодовом и натуральном масштабе, а также результаты экспериментов приведены в таблице 3.3. Каждый опыт проводили 3 раза.

Коэффициенты регрессии рассчитывали по зависимости

$$v_i = \frac{\sum X_i \cdot Y_i}{N}, \quad (3.27)$$

где N – количество опытов.

Таблица 3.3 – План и результаты экспериментов

| Номер опыта | Кодовый масштаб |       |       | $X_1 \cdot X_2$ | Натуральный масштаб |       | Среднее усилие прокатки, У, кН |
|-------------|-----------------|-------|-------|-----------------|---------------------|-------|--------------------------------|
|             | $X_0$           | $X_1$ | $X_2$ |                 | $x_1$               | $x_2$ |                                |
| 1           | +               | +     | +     | +               | 1050                | 80    | 610                            |
| 2           | +               | -     | +     | -               | 900                 | 80    | 660                            |
| 3           | +               | +     | -     | -               | 1050                | 30    | 430                            |
| 4           | +               | -     | -     | +               | 900                 | 30    | 470                            |

После расчетов получили следующие коэффициенты регрессии:

$$v_0 = 542,5; v_1 = -22,5; v_2 = 92,5; v_{12} = -2,5.$$

Проверка статистической значимости коэффициентов регрессии показала, что значение коэффициента парного взаимодействия является незначимым.

Таким образом, после реализации эксперимента получили линейное уравнение регрессии в кодовом масштабе:

$$Y = 542,5 - 22,5X_1 + 92,5X_2. \quad (3.28)$$

Проверка адекватности модели по критерию Фишера показала, что гипотеза об адекватности модели не отвергается.

При анализе модели следует отметить, что все соображения о направлении и силе влияния факторов можно отнести только для выбранного интервала опытов. В этом интервале опытов на усилие прокатки шаров наиболее сильное влияние оказывает скорость прокатки ( $X_1$ ), влияние температуры в этом интервале незначительное ( $X_2$ ).

В натуральном масштабе уравнение (3.28) можно записать в виде:

$$P = 631,5 - 0,3t + 3,7n, \quad (3.29)$$

где  $P$  – усилие прокатки, кН;

$t$  – температура прокатки,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$n$  – скорость прокатки, об/мин.

На рисунке 3.6 приведен график изменения усилия прокатки от скорости для температур 900–1050  $^{\circ}\text{C}$ .

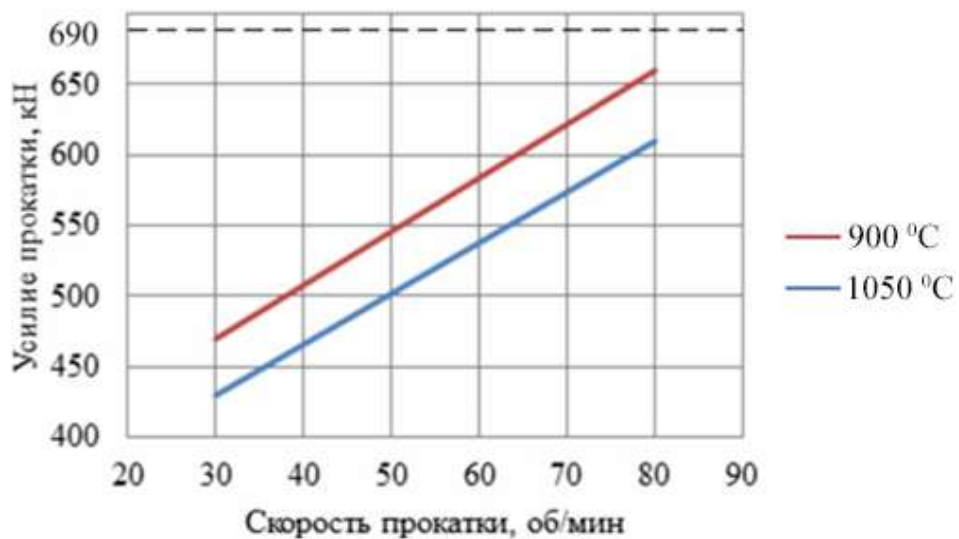


Рисунок 3.6 – График зависимости усилия прокатки от скорости прокатки

Из рисунка видно, что с увеличением скорости прокатки и понижением температуры усилие прокатки возрастает. Сравнивая полученные данные по усилию прокатки с величиной максимально допустимых усилий (690 кН), можно отметить, что прокатка шара номинальным диаметром 90 мм возможна при всех скоростях работы стана.

Характер изменения моментов в процессе прокатки шара номинальным диаметром 90 мм соответствует характеру изменения давления. Момент при установившемся процессе прокатки падает при отделении шара от заготовки, далее наблюдается увеличение до максимума и спад [326].

По замеренным давлениям металла на валки и моментам прокатки произведен проверочный расчет на прочность главной линии стана. Расчеты

показали, что запас прочности шпинделя равен 7,62, валка 8,9 и станины 9,8, что значительно больше допустимого.

Таким образом, на исследуемом шаропрокатном стане 40–80 без перегрузки по усилиям можно прокатывать шаровые заготовки номинальным диаметром 90 мм.

### **3.2 Экспериментальные исследования влияния температуры на сопротивление металла пластической деформации, пластические свойства и окисление при нагреве до температур полугорячей штамповки**

Приведены комплексные исследования влияния температуры на прочностные, пластические свойства металлов и окисление при нагреве, проведенные на предварительно деформированных (катаных) образцах стали в интервале температур полугорячей штамповки 600–1000 °С [298]. Справочные данные по величине значений пластических свойств и поверхностного угара в указанном интервале температур отсутствуют.

Для исследования пластичности стали и ее сопротивления деформации использованы испытания на горячее скручивание, которые проводили на специально сконструированной машине (торсионном пластометре) со следующими техническими характеристиками: температура испытания от 20 до 1250 °С; скорость вращения активного захвата 60–3500 об/мин; мощность двигателя тиристорного электропривода 1,5 кВт.

Конструктивно машина (рисунок 3.7) состоит из жесткой станины, на которой установлена левая бабка 1 с активным вращающимся захватом 2 и удлинителем 4. Удлинитель помещается в рабочее пространство печи. Контактный датчик 3 позволяет с точностью до 0,1 оборота считывать количество оборотов до разрушения образца. Образец закрепляется в захватах машины, которые помещены в нагревательную печь 5.

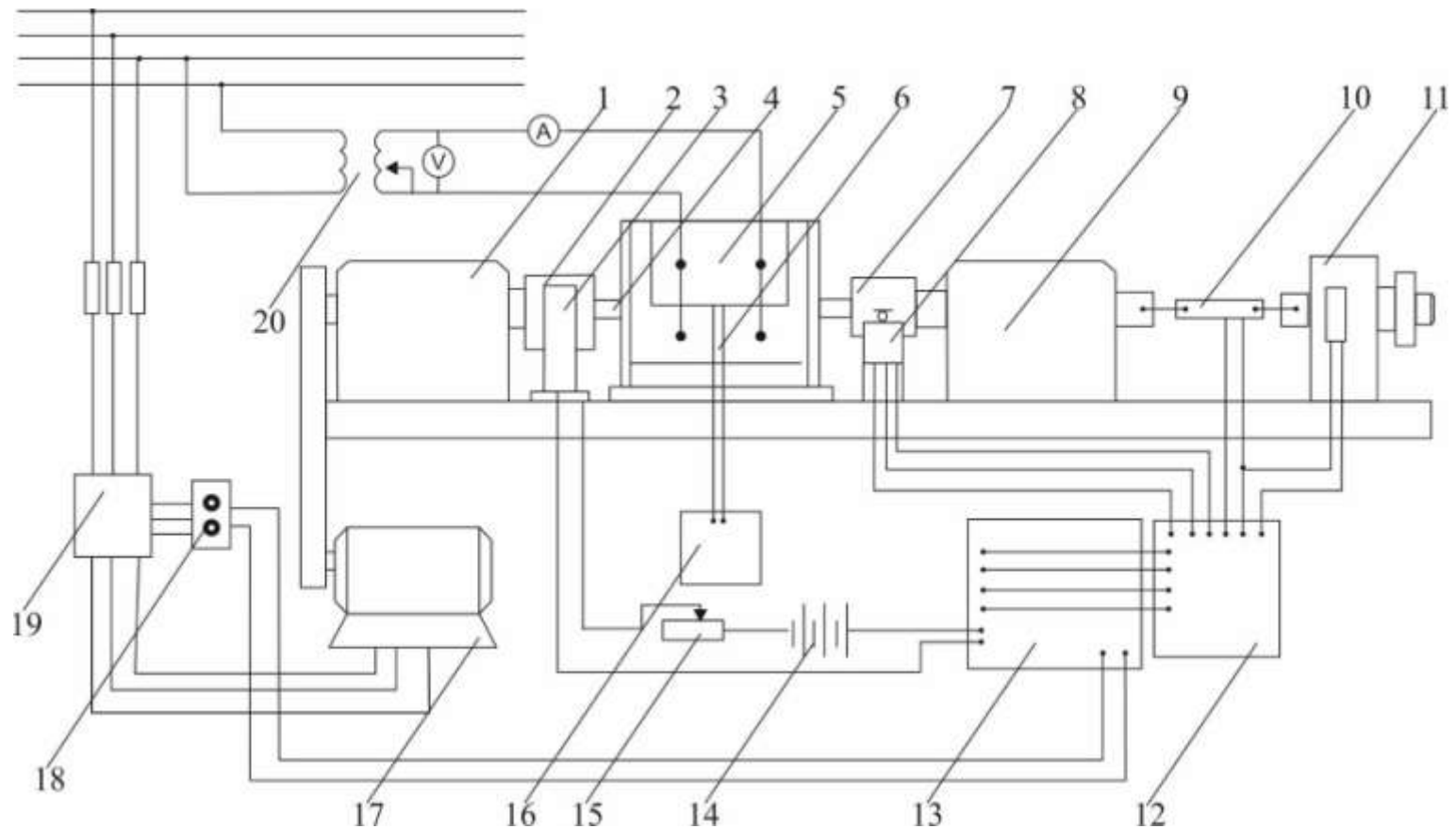
Для замера температуры используется платино-платинородиевая термопара 6. Правый пассивный захват 7 с удлинителем закреплен в правой бабке 9 и имеет тензометрический датчик для замера крутящего момента 8. Для проведения специальных исследований машина оборудована специальным тензометрическим датчиком для замера осевых усилий 10,11.

Комплект измерительной аппаратуры включает в себя усилитель 12, осциллограф 13, аккумулятор 14, реостат 15, потенциометр для записи и регулировки температуры 16. Для включения тиристорного привода 17 установлен электромагнитный пускатель 19 и кнопочный выключатель 18. Регулировка температуры рабочего пространства печи производится автотрансформатором 20.

В процессе испытания образцов на горячее скручивание записывалась диаграмма в координатах «крутящий момент – деформация» и фиксировалось количество оборотов до разрушения образца. Перестраивая диаграмму кручения в другие координаты «деформация – сопротивление деформации», были получены «кривые упрочнения металла» или «масс». Кривые течения были использованы для расчета оптимальной температуры нагрева данной стали.

Для исследования использовались цилиндрические образцы диаметром 6 мм и длиной рабочей части 30 мм, изготовленные из металла с предварительно деформированной (катаной) структурой. Температура испытаний 600–1000 °. Скорость деформации 1 с<sup>-1</sup> [127].

Химический состав исследованных марок стали приведен в приложении Г.



1 – левая бабка, 2 – активный захват, 3 – датчик количества оборотов, 4 – удлинитель захвата, 5 – нагревательная печь, 6 – термопара, 7 – пассивный захват, 8 – датчик замера крутящего момента, 9 – правая бабка, 10 – датчик замера осевого усилия, 11 – регулятор датчика осевого усилия, 12 – тензометрический измеритель, 13 – осциллограф, 14 – аккумулятор, 15 – реостат, 16 – потенциометр для записи и регулировки температуры, 17 – тиристорный привод, 18 – выключатель, 19 – электромагнитный пускатель, 20 – автотрансформатор.

Рисунок 3.7 – Схема установки на горячее кручение

### 3.2.1 Сопротивление металла деформации

Значения удельных и полных сил необходимы для прочностных расчетов машин для обработки металлов давлением, энергетических расчетов процессов, рационализации режимов деформации и др.

Многочисленные исследования [87; 92; 93; 95; 99; 101; 102 и др.] позволили установить, что удельные силы деформации при обработке металлов давлением являются функцией многих переменных [327].

$$p = p(x, c, \varepsilon, t, u, b, n), \quad (3.30)$$

где  $x$  и  $c$  – характеристики, отражающие влияние химического состава и структуры металла;

$\varepsilon$ ,  $t$  и  $u$  – параметры, отражающие влияние степени деформации, температуры и скорости деформации;

$b$  и  $n$  – параметры, отражающие влияния истории нагружения и коэффициента схемы напряженного состояния.

Анализируя уравнение (3.30), можно отметить, что химический состав и структура являются природными свойствами металла и могут рассматриваться как первая группа независимых факторов.

Температура нагрева, степень и скорость деформации, а также история нагружения определяются условиями деформации, и их можно рассматривать как вторую группу независимых факторов.

В третью группу независимых факторов входит коэффициент схемы напряженного состояния, который зависит только от способа деформирования (учитывает коэффициент трения и размеры очага деформации).

Факторы первой и второй групп определяют механические свойства металла  $\sigma_T$  при пластической деформации в зависимости от температурно-скоростных условий.

Удельную силу деформирования можно представить как:

$$p = 1,155 \cdot n \cdot \sigma_T, \quad (3.31)$$

где  $n$  – коэффициент напряженного состояния;

$\sigma_T$  – сопротивление металла деформации, Па.

Таким образом, сопротивление металла деформации  $\sigma_T$  или  $\beta\sigma_T$  и коэффициент напряженного состояния  $n$  являются независимыми переменными и могут быть исследованы отдельно. Значения величин сопротивления деформации определяют экспериментальным путем.

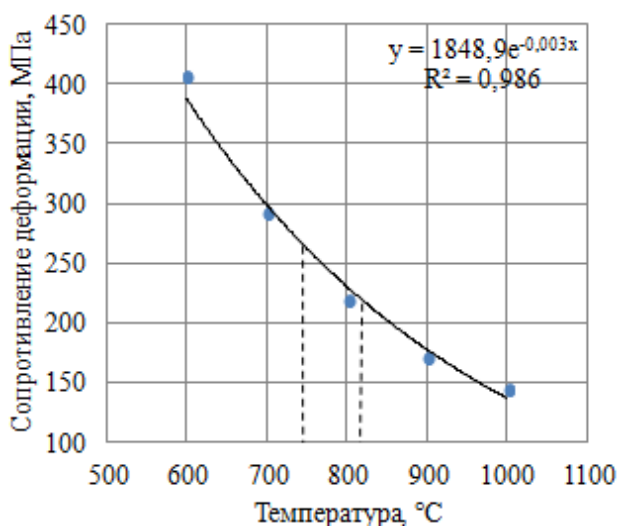
Для определения сопротивления металла деформации по опытным данным на горячее кручение воспользуемся зависимостью (2.11).

Учитывая, что диаметр образца  $d_o = 6$  мм:

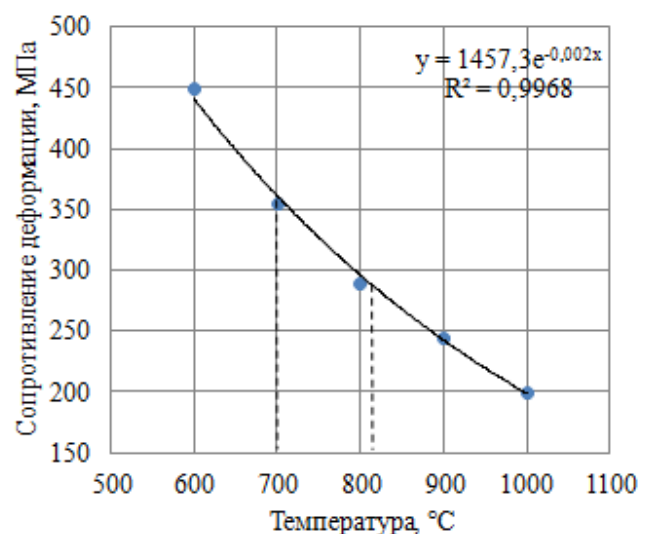
$$\sigma = 0,0306M_{max} \quad (3.32)$$

Рассмотрим результаты испытания сталей марок 40X и 18X2H4MA [298] на горячее скручивание, обработанных в соответствии с уравнением (3.32).

На рисунке 3.8 приведены графики зависимости сопротивления металла деформации сталей марок 40X и 18X2H4MA от температуры испытания, пунктиром обозначены температуры критических точек  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$  [328].



а – сталь марки 40X



б – сталь марки 18X2H4MA

Рисунок 3.8 – Влияние температуры на сопротивление деформации стали

Систематизированные данные по сопротивлению металла деформации в зависимости от температуры испытания для исследованных марок стали приведены на рисунках 3.9, 3.10, пунктиром обозначены критические температуры  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$  [328].

Сопоставляя полученные значения сопротивления металла деформации со справочными [93], можно отметить, что экспериментальные данные соответствуют справочным в пределах погрешности.

### 3.2.2 Пластичность металла

Пластические свойства металла в общем случае можно описать сложной кривой с максимальной пластичностью при определенной температуре [87; 105; 117; 329–331]. Однако для исследованных марок стали в интервале температур полугорячей штамповки можно принять, что пластические свойства металла возрастают по экспоненциальной зависимости [298]:

$$A = a_2 \cdot \exp(b_2 \cdot T), \quad (3.36)$$

где  $a_2$  и  $b_2$  – коэффициенты, определяемые экспериментально;

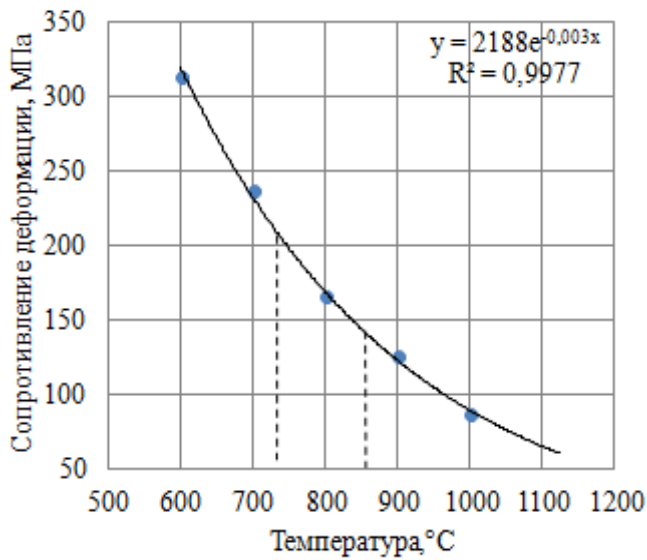
$T$  – температура, град. К.

Подставив размеры образцов в формулу (2.7), получим частный случай уравнения величины степени деформации сдвига до разрушения для образца диаметром 6 мм с длиной рабочей части 30 мм:

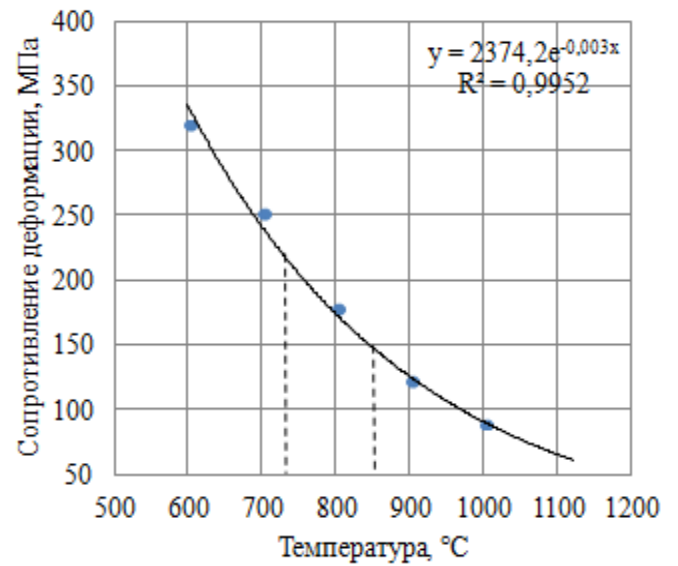
$$A_p = 0,628n_z, \quad (3.37)$$

где  $n_z$  – количество оборотов до разрушения образца.

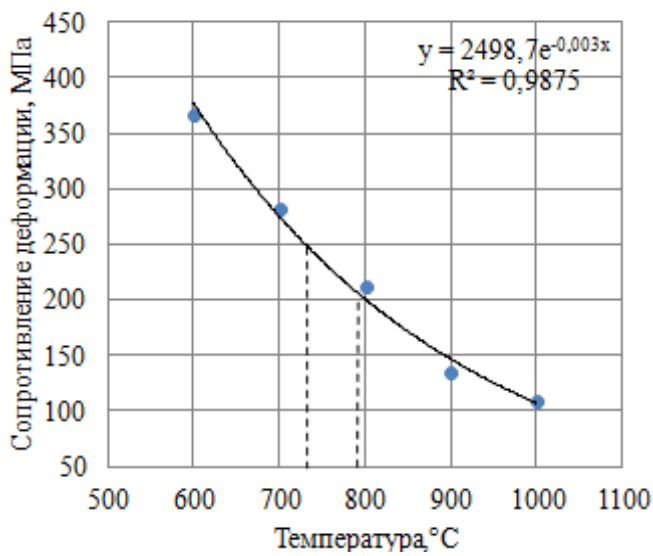
Величина степени деформации сдвига до разрушения зависит от схемы напряженного состояния  $\sigma_{cp}/T$ . Как известно, кручение образцов протекает при плоском напряженном состоянии, когда  $\sigma_1 = \tau$ ,  $\sigma_2 = 0$  и  $\sigma_3 = -\tau$  [120].



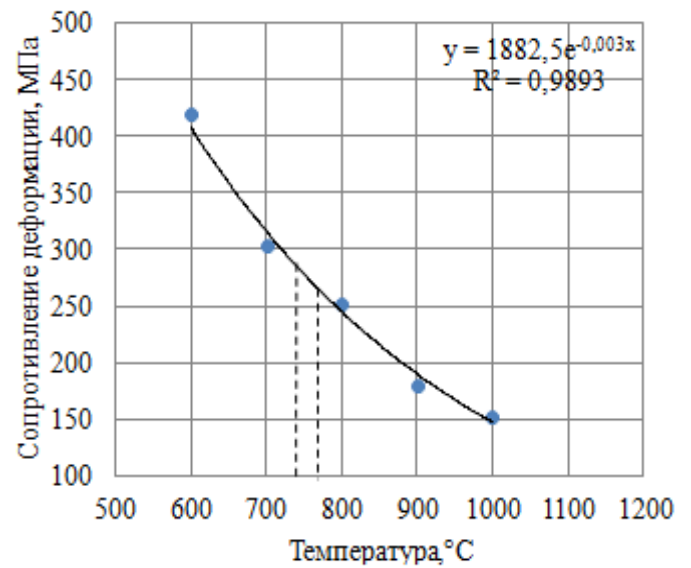
а – сталь марки Ст3сп



б – сталь марки 20

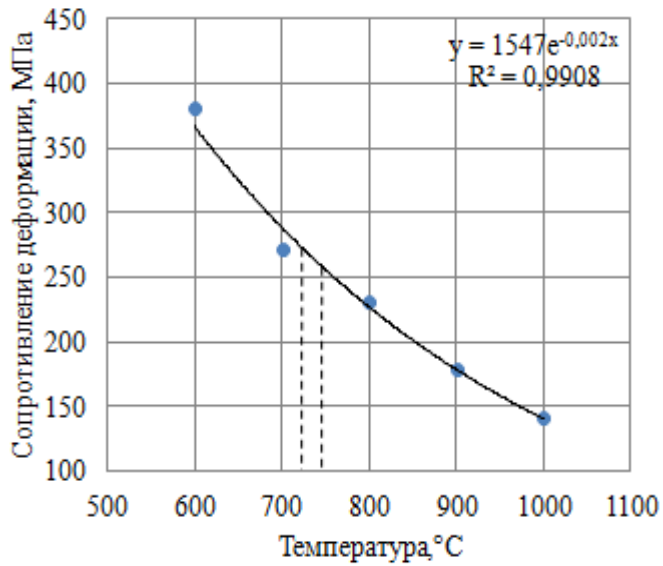


в – сталь марки 40

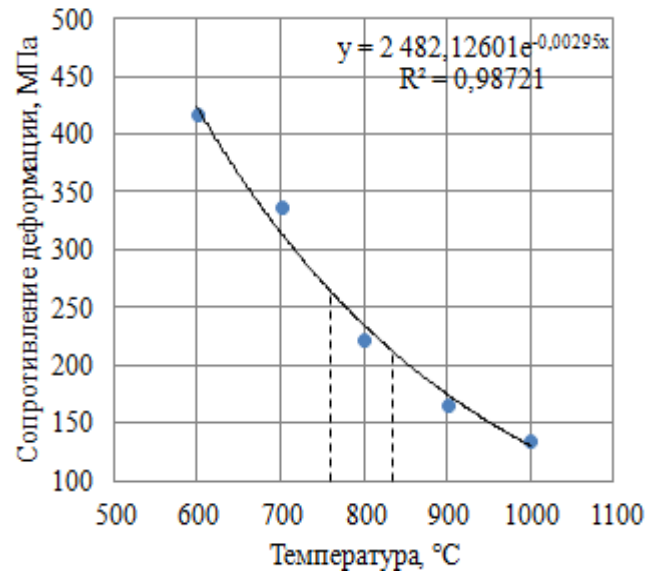


г – сталь марки 40ХН

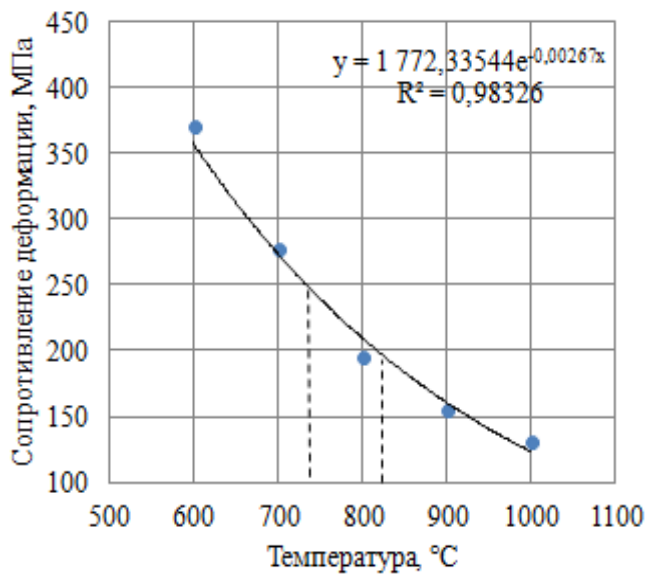
Рисунок 3.9 – Влияние температуры на сопротивление деформации стали



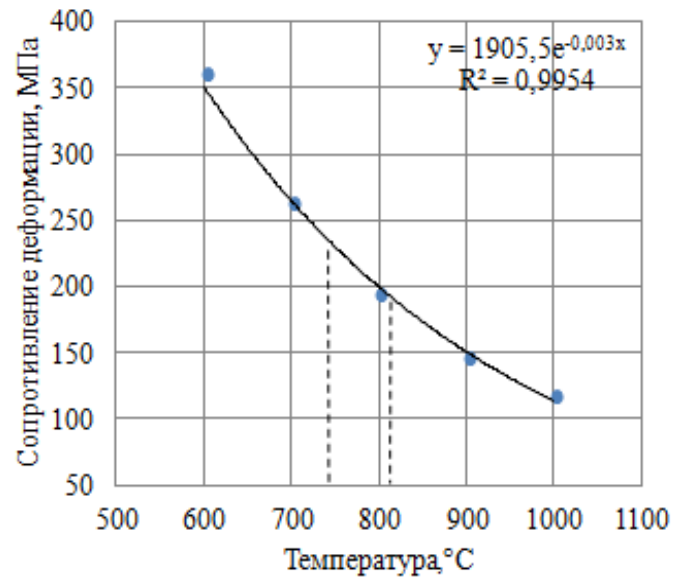
а – сталь марки 65Г



б – сталь марки 35ХГСА



в – сталь марки 18ХГТ

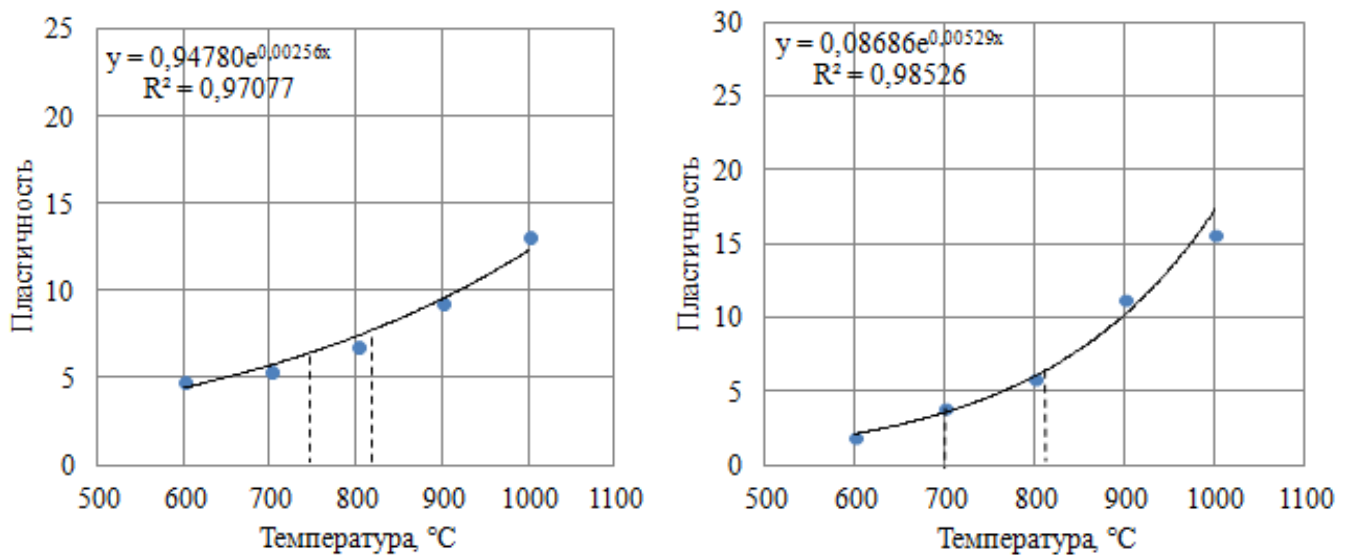


г – сталь марки 20ХН

Рисунок 3.10 – Влияние температуры на сопротивление деформации стали

Подставив в уравнение для расчета гидростатического давления (2.3) значения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , получим, что  $\sigma_{ср} / T = 0$ . Таким образом, предельную пластичность при кручении (степень деформации сдвига до разрушения образца) находим по зависимости (3.37).

Результаты испытания сталей 40X и 18X2H4MA на горячее скручивание, обработанных в соответствии с уравнением (3.37), представлены на рисунке 3.11.



а – сталь марки 40X

б – сталь марки 18X2H4MA

Рисунок 3.11 – Пластические свойства стали

Можно отметить, что в исследованном интервале температур пластические свойства металла возрастают с увеличением температуры.

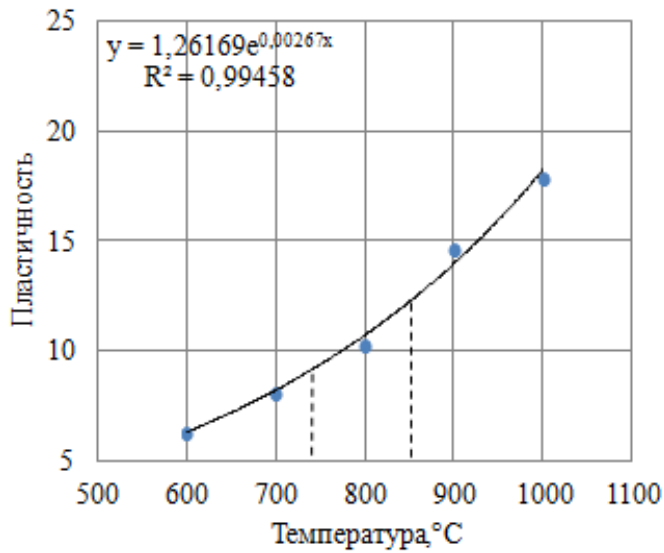
Аппроксимируя экспериментальные данные уравнением экспоненты, находим  $A_p$ :

$$\text{для стали 40X} \quad A_p = 0,4708 \exp(0,0026T), \quad R^2=0,971, \quad (3.38)$$

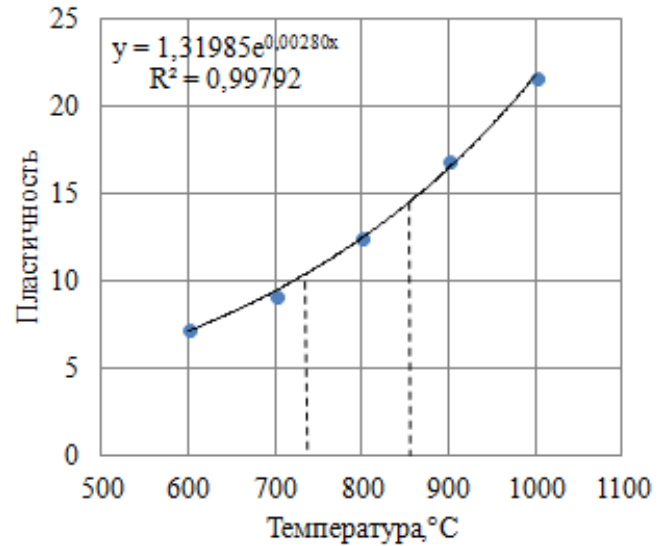
$$\text{для стали 18X2H4MA} \quad A_p = 0,0205 \exp(0,0053T), \quad R^2=0,985. \quad (3.39)$$

Систематизированные данные по пластическим свойствам металла в зависимости от температуры испытания для исследованных марок стали

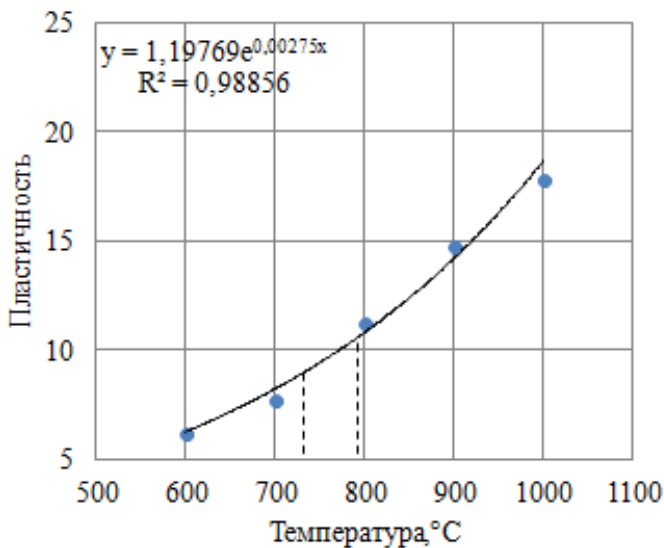
приведены на рисунках 3.12, 3.13, пунктиром обозначены критические температуры  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$  [328].



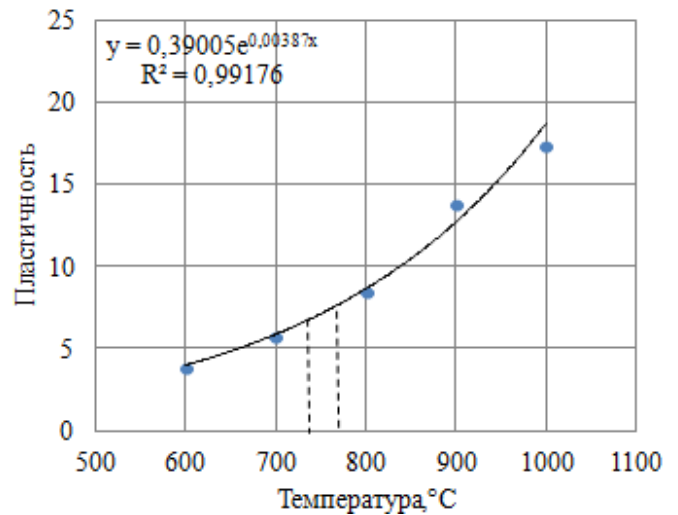
а – сталь марки ст3сп



б – сталь марки 20

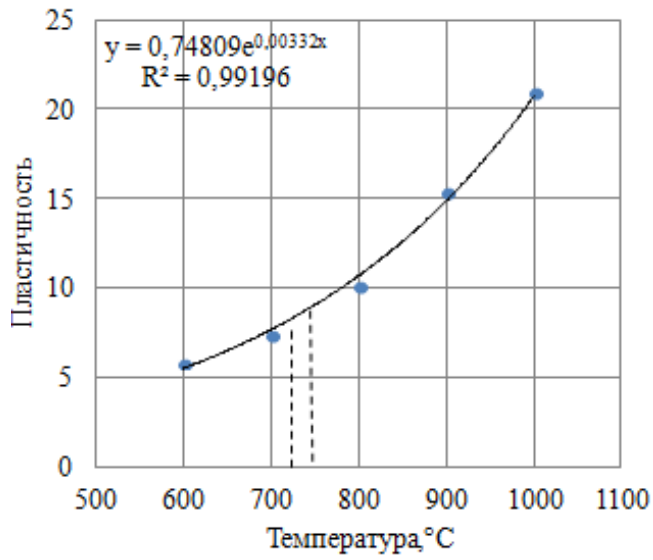


в – сталь 40

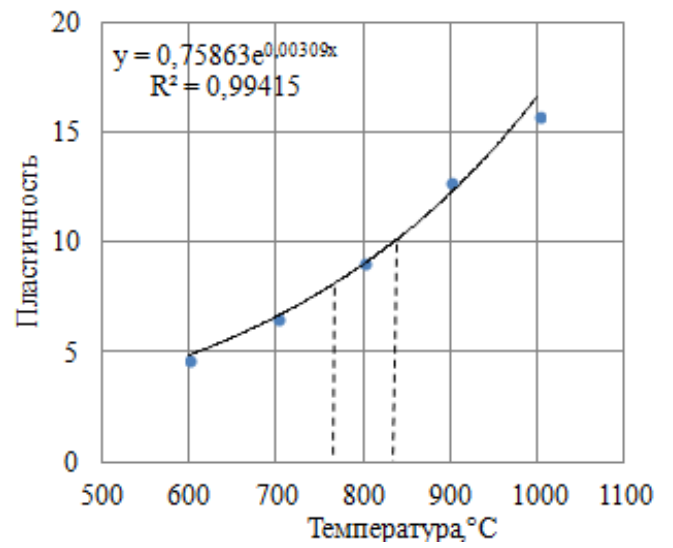


г – сталь марки 40ХН

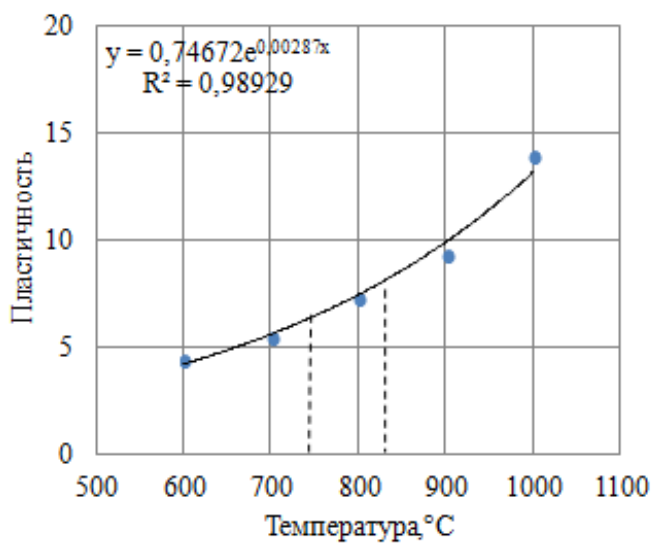
Рисунок 3.12 – Пластические свойства стали



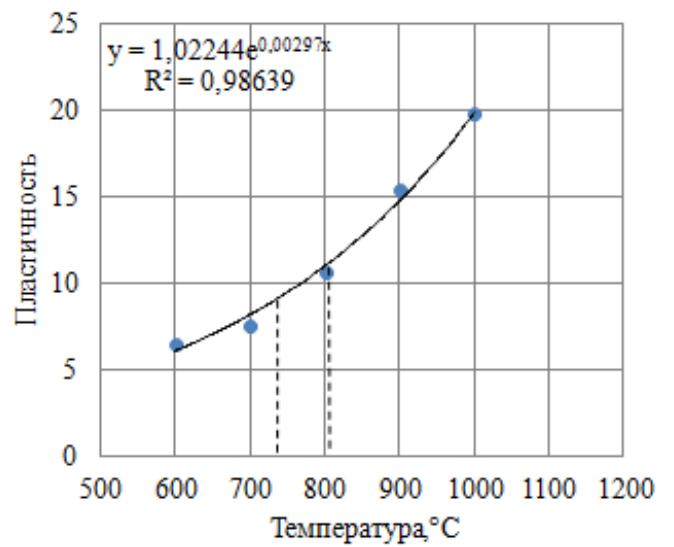
а – сталь марки 65Г



б – сталь марки 35ХГСА



в – сталь 18ХГТ



г – сталь марки 20ХН

Рисунок 3.13 – Пластические свойства стали

### 3.2.3 Окисление стали при нагреве

Для выбора рациональной температуры полугорячей штамповки проведены исследования влияния температуры нагрева на величину угара при температурах полугорячей штамповки [298].

Исследование угара при нагреве измеряли с помощью гравиметрического метода по потере массы металла. Перед нагревом стальные образцы сечением  $10 \times 10$  мм длиной 30 мм взвешивали и измеряли их геометрические размеры штангенциркулем, предварительно удалив 1 мм поверхностного слоя металла.

Далее образцы нагревали в муфельной печи в атмосфере воздуха до заданной температуры и проводили выдержку при постоянной температуре. В процессе нагрева температуру поверхности образцов измеряли с помощью термопары. После выдержки образцы охлаждали в воде. Удаление окалина производили с помощью травления поверхности образцов раствором серной кислоты с добавлением тиомочевины. После удаления окалина с помощью весов с точностью до 0,01 г проводили повторное взвешивание.

Величину поверхностного угара при заданной температуре и времени нагрева определяли по соотношению:

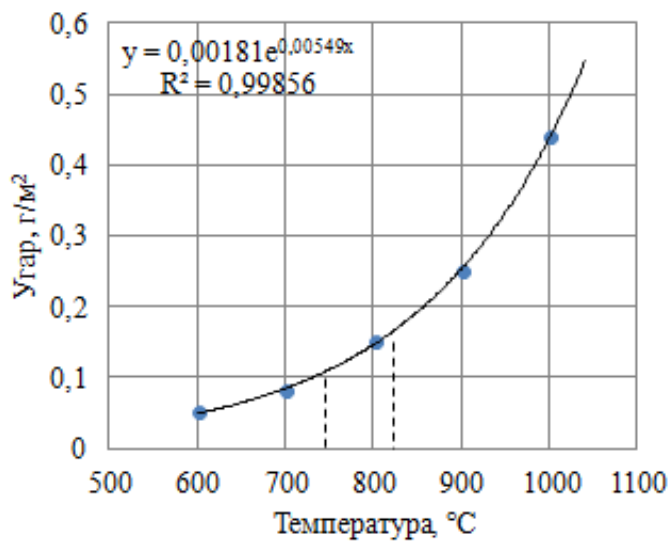
$$y_{\Gamma} = \frac{m_1 - m_2}{F}, \quad (3.40)$$

где  $m_1, m_2$  – масса образца до нагрева и после удаления окалина, г;

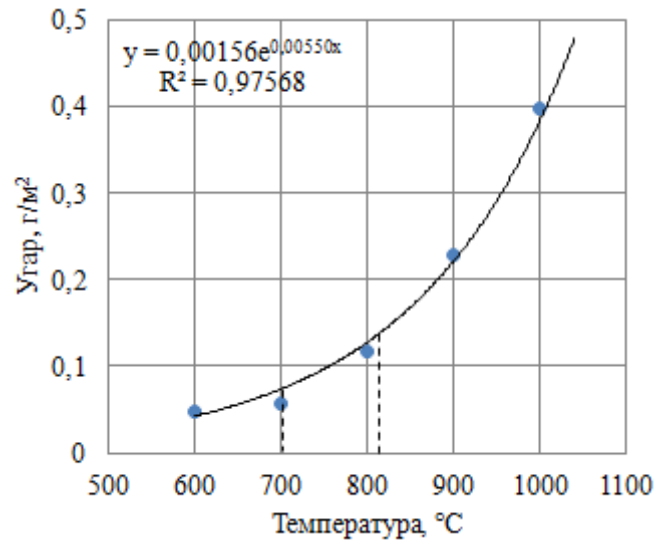
$F$  – площадь поверхности образца,  $\text{м}^2$ .

Время нагрева и выдержки до заданной температуры поверхности образцов составляло 90–140 с. Исследования проводили в интервале температур 600–1000 °С.

Результаты исследования окисления стали марок 40Х и 18Х2Н4МА при нагреве, которое оценивается величиной поверхностного угара, приведены на рисунке 3.14.



а – сталь 40X



б – сталь 18X2H4MA

Рисунок 3.14 – Величина поверхностного угара при нагреве сталей

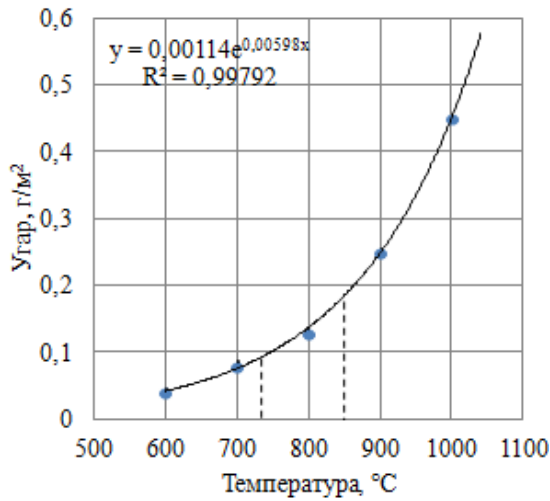
Можно отметить, что с повышением температуры величина поверхностного угара резко возрастает. В частности, для стали марки 40X при увеличении температуры нагрева с 600 °C до 1100 °C величина поверхностного угара возрастает более чем в 8 раз – с 0,05 г/м<sup>2</sup> до 0,44 г/м<sup>2</sup>.

Аппроксимируя экспериментальные данные уравнением экспоненты, получаем для сталей марок:

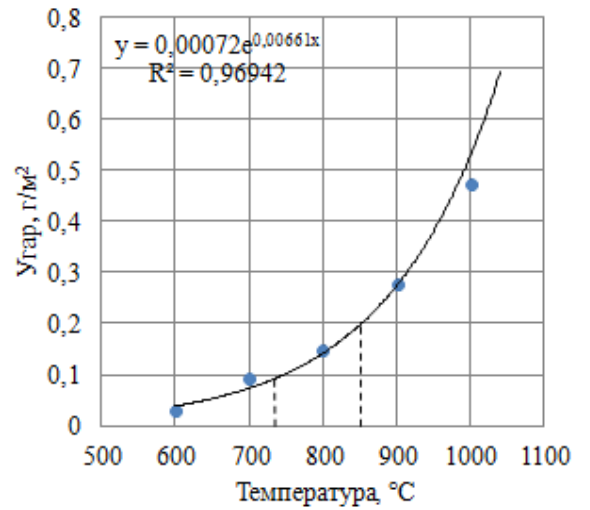
$$\text{для стали 40X } Уг = 0,0004exp(0,0055T), R^2 = 0,999 \quad (3.41)$$

$$\text{для стали 18X2H4MA } Уг = 0,0003exp(0,0056T), R^2 = 0,976 \quad (3.42)$$

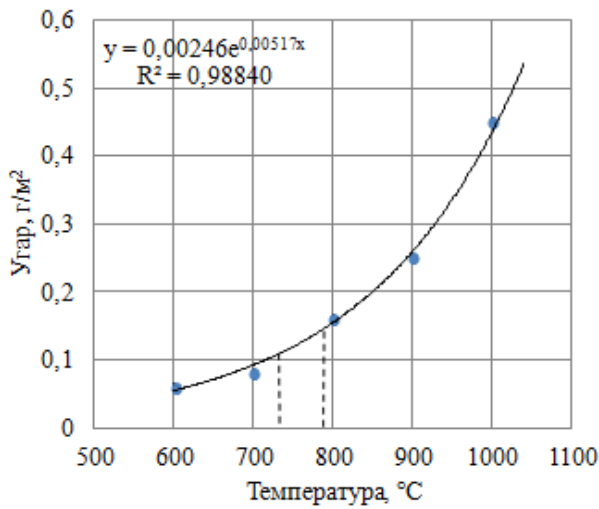
Систематизированные данные по окислению углеродистых и легированных марок стали при нагреве до температур полугорячей штамповки приведены на рисунках 3.15, 3.16, пунктиром обозначены критические температуры  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$  [328].



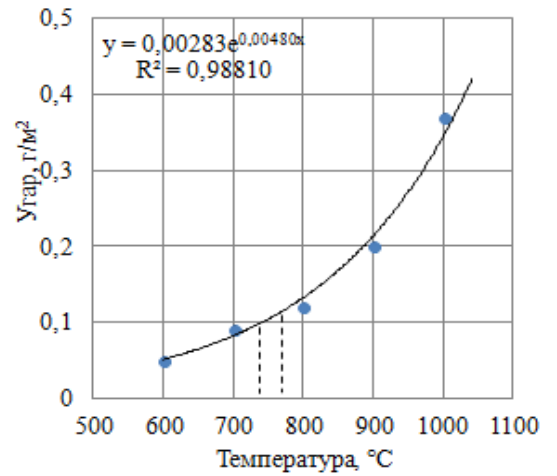
а – сталь марки СтЗсп



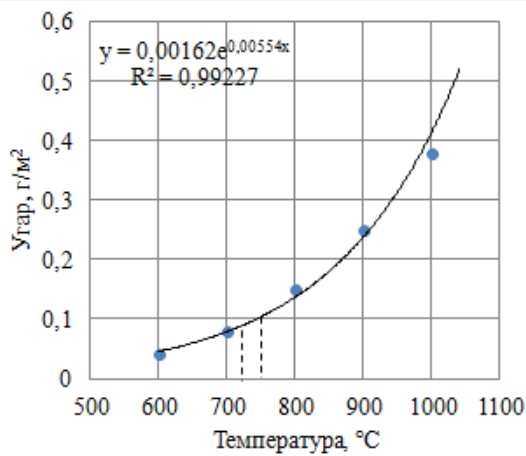
б – сталь марки 20



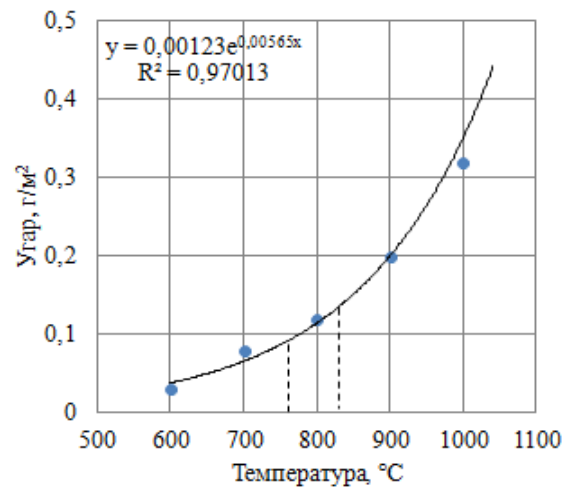
в – сталь марки 40



г – сталь марки 40ХН

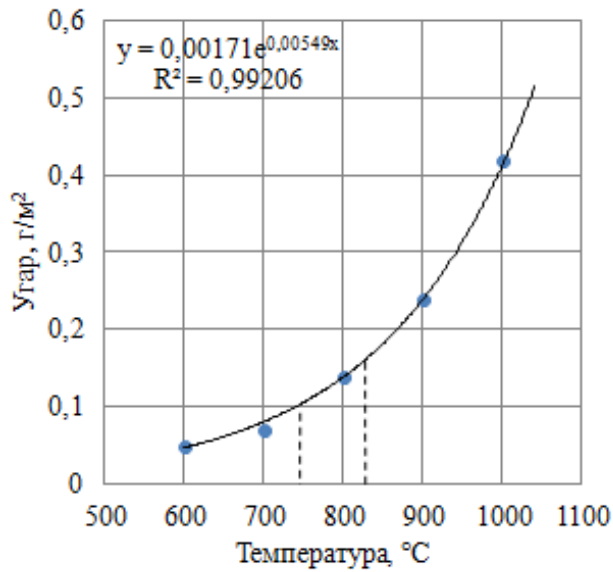


д – сталь марки 65Г

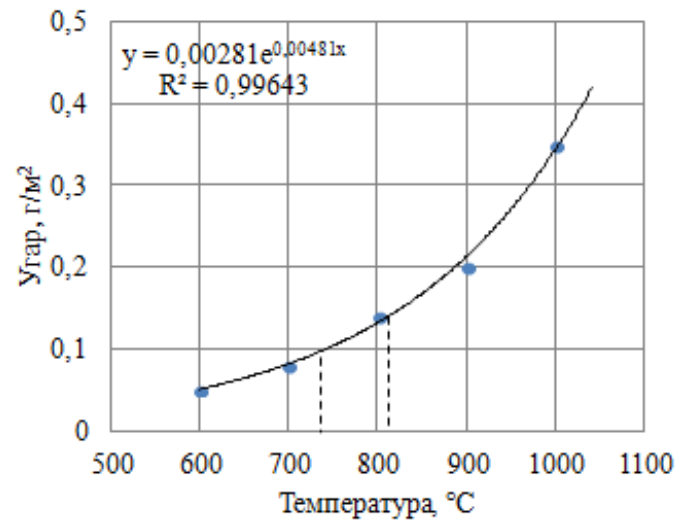


е – сталь марки 35ХГСА

Рисунок 3.15 – Величина поверхностного угара стали



а – сталь марки 18ХГТ



б – сталь марки 20ХН

Рисунок 3.16 – Величина поверхностного угара стали

### 3.3 Экспериментальные исследования штамповки поковок круглых в плане

Современные пакеты прикладных программ моделирования процессов обработки металлов давлением позволяют получить результаты высокой степени точности [270]. Но моделирование не может полностью заменить экспериментальные исследования, поэтому необходимо проверять адекватность результатов компьютерного моделирования.

#### 3.3.1 Методика исследования

Для оценки достоверности результатов распределения деформаций и напряжений по объему поковок проведены лабораторные исследования с

применением метода определения напряженного состояния в пластической области по распределению твердости [185; 186; 308]. Согласно выбранной методике [332] для определения деформаций (напряжений) в исследуемом образце на первом этапе исследований необходимо выбрать модельный материал и построить тарировочный график «твердость – интенсивность деформаций – интенсивность напряжений».

В качестве модельного материала принят технический алюминий по ГОСТ Р 55375-2012 с содержанием алюминия 99,7 % [332].

Для построения тарировочного графика использовали алюминиевые цилиндрические образцы высотой 45 мм, диаметром 30 мм.

Экспериментальные образцы вытачивали из алюминиевого прутка круглого сечения. Для снятия остаточных напряжений после механической обработки заготовки подвергали гомогенизационному отжигу.

Цилиндрические образцы подвергались деформации в условиях осевого сжатия – осадке в торец – на плоскопараллельных плитах. Для снижения контактного трения для смазки плит использовали графитоминеральную смазку. Величина степени деформации образцов составила от 10 до 60 % с шагом 10 %. На каждую степень деформации осаживалось 3 образца. В связи с малыми величинами степени деформации и наличием смазки бочкообразность на образцах практически отсутствовала, поэтому переточка образцов не проводилась [332]. Осадка проводилась на испытательном прессе с фиксацией силы осадки.

После осадки цилиндрические образцы разрезали в диаметральном сечении на уровне половины высоты. Для уменьшения погрешности эксперимента поверхность замера подвергалась шлифовке.

Для построения тарировочного графика «твердость – интенсивность деформаций – интенсивность напряжений» проводили замеры твердости по Роквеллу на твердомере ТК-2, внедряя стальной шарик диаметром 1,588 мм усилием 980,7 Н (100 кгс).

На всех осаженных образцах проводили по 5 замеров твердости. Результаты замеров твердости подвергали статистической обработке.

Интенсивность деформаций  $\varepsilon_i$  и интенсивность напряжений  $\sigma_i$  соответственно определяли по формулам [332; 333]:

$$\varepsilon_i = \ln\left(\frac{h_0}{h}\right), \quad (3.43)$$

и

$$\sigma_i = \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot d^2}, \quad (3.44)$$

где  $h_0$  и  $h$  – высота цилиндрического образца до и после осадки, мм;

$P$  – сила осадки, Н;

$d$  – диаметр осаженого образца, мм.

Полученный тарировочный график приведен на рисунке 3.17.

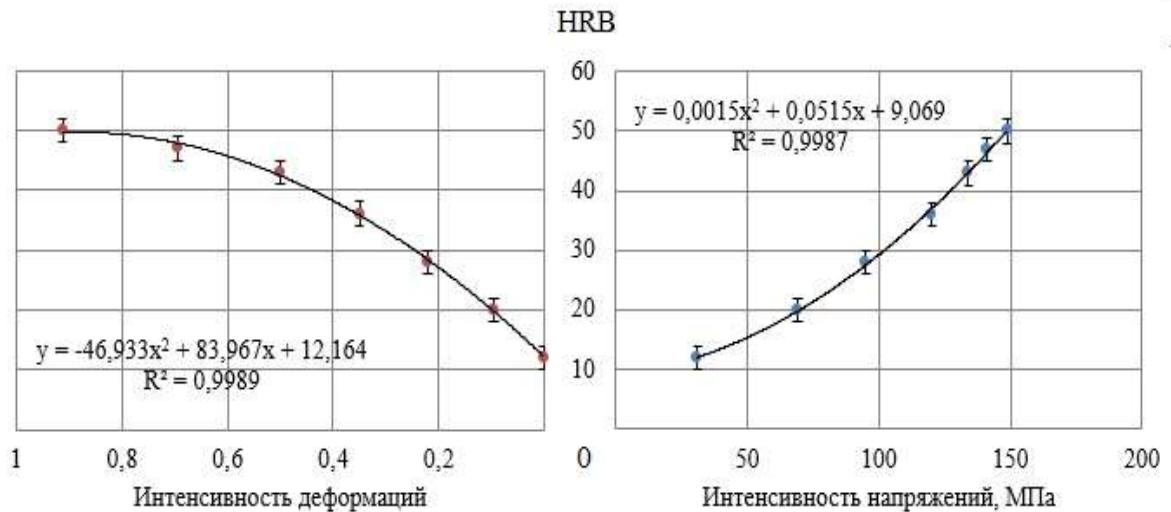


Рисунок 3.17 – График зависимости интенсивности деформаций и интенсивности напряжений от твердости

Как видно из рисунка 3.17, с увеличением твердости образца величина интенсивности деформаций интенсивности и напряжений возрастает.

Штамповка поковок «фланец» и «шестерня» из шаровой и цилиндрической алюминиевых заготовок осуществлялась в закрытом штампе на кривошипном горячештамповочном прессе АК КБ8544 усилием 25 МН (2500 т) без

предварительного нагрева [334]. Поверхность штампа перед штамповкой смазывалась солидолом.

Готовые поковки разрезали вдоль вертикальной оси симметрии, слой металла, наклепанный после разрезки, удалялся посредством шлифовки. Для замера твердости на поверхность измерения с помощью координатно-расточного станка модели 2450 (классом точности  $\pm 0,01$ ) наносилась ортогональная координатная сетка с шагом ячеек  $4 \times 4$  мм [303].

Замеры твердости в узлах сетки проводили на твердомере типа ТК-2 стальным шариком диаметром 1,588 мм с усилием 980,7 Н (100 кгс), рисунок 3.18



Рисунок 3.18 – Поковка «фланец» после замера твердости

По результатам замера твердости в узлах координатной сетки при помощи уравнений аппроксимации тарировочного графика были определены значения интенсивности деформаций и интенсивности напряжений в готовой поковке.

### 3.3.2 Результаты и проверка адекватности моделирования

По результатам экспериментального исследования и компьютерного моделирования построены графики распределения интенсивности деформаций и интенсивности напряжений в сечениях готовой поковки «фланец» [74].

На рисунке 3.19 приведен графики распределения интенсивности деформаций по горизонтальному осевому сечению фланца.

Анализируя рисунок 3.19, можно отметить, что экспериментальные данные хорошо подтверждают результаты компьютерного моделирования. Погрешности величины интенсивности деформаций не превышают 7 %.

Распределение интенсивности деформаций в вертикальном осевом сечении фланца приведено в таблице 3.4.

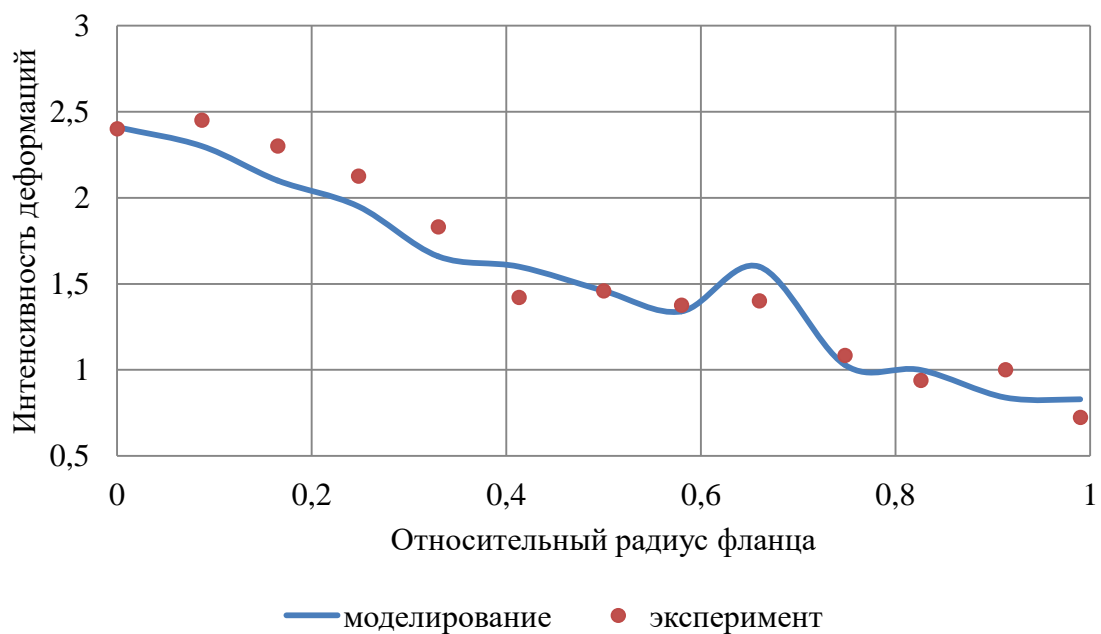


Рисунок 3.19 – Изменение интенсивности деформаций  $\varepsilon_i$  в горизонтальном осевом сечении фланца при штамповке из шаровой заготовки

Таблица 3.4 – Распределение интенсивности деформаций в вертикальном осевом сечении фланца

| Относительная высота фланца | Моделирование | Эксперимент |
|-----------------------------|---------------|-------------|
| 0,2                         | 2,16          | 2,2         |
| 0,46                        | 2,41          | 2,4         |
| 0,7                         | 1,34          | 1,4         |

Как видно из таблицы 3.4, погрешность полученных данных не превышает 2 %.

На рисунке 3.20 приведен график распределения интенсивности напряжений по горизонтальному осевому сечению фланца.

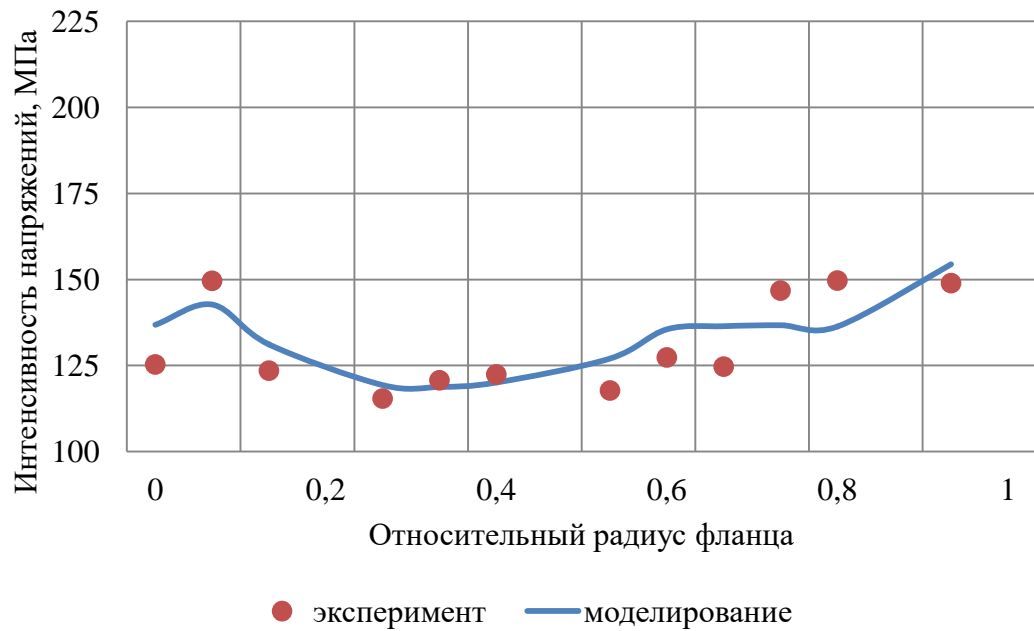


Рисунок 3.20 – Изменение интенсивности напряжений  $\sigma_i$  в горизонтальных осевых сечениях фланца при штамповке из шаровой заготовки

В вертикальном осевом сечении фланца значения величин интенсивности напряжений представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Распределение интенсивности напряжений в вертикальном осевом сечении фланца

| Относительная высота фланца | Моделирование | Эксперимент |
|-----------------------------|---------------|-------------|
| 0,2                         | 142,1         | 146,3       |
| 0,46                        | 138,2         | 132,8       |
| 0,7                         | 146,0         | 153,7       |

Зависимость величины неравномерности деформаций по горизонтальному осевому сечению готовой поковки «фланец» от формы исходной заготовки при штамповке из шаровой и цилиндрической алюминиевых заготовок представлена на рисунке 3.21. Для сравнения рядом приведены данные неравномерности деформаций, полученные с помощью компьютерного моделирования.

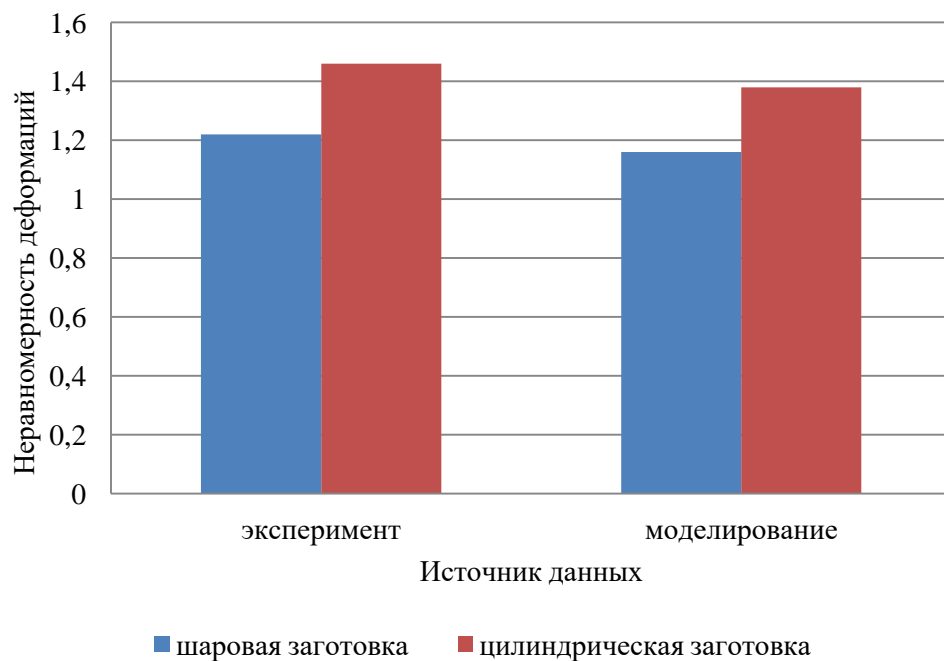


Рисунок 3.21 – Неравномерность деформации в готовой поковке «фланец»

Как видно из рисунка 3.21, значения неравномерности деформации при использовании цилиндрической заготовки выше, чем при использовании шаровой заготовки. Данные компьютерного моделирования близко совпадают с результатами эксперимента.

Экспериментальную штамповку для определения зависимости величины требуемых сил штамповки поволоков «фланец» и «шестерня» от формы исходной заготовки проводили на универсальной испытательной машине ИК 6830-500-3 из свинцовых заготовок. График зависимости силы штамповки от величины хода

пуансона при штамповке поковки фланца из шаровой заготовки диаметром 60 мм приведен на рисунке 3.22.

Из графика видно, что с увеличением хода пуансона сила деформации возрастает. Особенно резко сила возрастает на конечном этапе заполнения штампа.

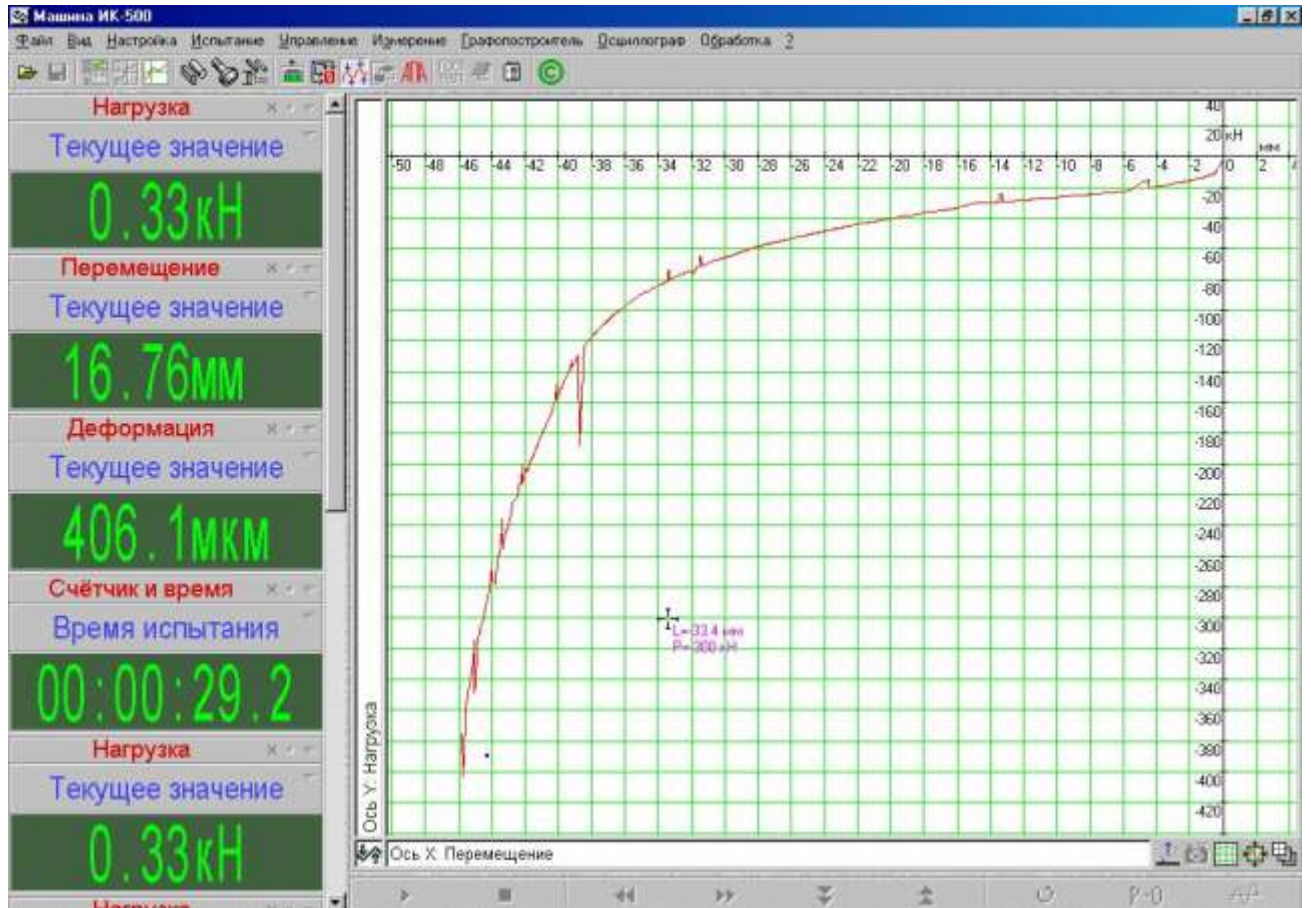


Рисунок 3.22 – График зависимости силы штамповки от величины хода пуансона при штамповке фланца из шаровой заготовки

Для сравнения экспериментальных данных, полученных на свинцовых образцах, и результатов компьютерного моделирования полугорячей штамповки стальных поволоков величину силы необходимо представить в безразмерном виде. Относительная удельная сила (коэффициент напряженного состояния):

$$q = \frac{p}{\sigma_T} = \frac{P}{\sigma_T \cdot F}, \quad (3.45)$$

где  $p$  – удельная сила штамповки, МПа;

$P$  – полная сила штамповки, МН;

$\sigma_T$  – предел текучести при температуре штамповки, МПа;

$F$  – площадь сечения поковки, перпендикулярной действующей нагрузки, мм<sup>2</sup>.

Значения относительных удельных сил  $q$ , полученные по результатам компьютерного моделирования и экспериментальным данным, приведены в таблице 3.6

Таблица 3.6 – Значения коэффициента напряженного состояния

| Поковка  | Относительная удельная сила, $q$ |             |
|----------|----------------------------------|-------------|
|          | Компьютерное моделирование       | Эксперимент |
| фланец   | 3,14                             | 2,85        |
| шестерня | 2,66                             | 2,38        |

Сравнивая значения, полученные экспериментальным путем, с результатами компьютерного моделирования, можно отметить, что погрешность не превышает 9 %.

Анализ полученных данных показал, что результаты компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния металла и силы штамповки близко совпадают с результатами эксперимента.

### **3.4 Экспериментальное исследование прямого выдавливания в закрытом штампе**

Проверку адекватности компьютерного моделирования на стадии свободного выдавливания проводили путем экспериментального исследования силы выдавливания с использованием метода планирования эксперимента [166].

В качестве факторов (независимых переменных) выбрали:

$X_1$  – коэффициент вытяжки,  $\lambda = \frac{F_0}{f}$ ;

$X_2$  – коэффициент трения,  $\mu$ ;

$X_3$  – угол наклона матрицы,  $\gamma$ , град.;

$X_4$  – относительные размеры утолщенной части поковки и стержневой части,  $\frac{L}{D} \cdot \frac{d}{l}$ .

Локальную область определения факторов устанавливали из априорных соображений. Варьирование факторов проводили на двух уровнях. Величина варьирования факторов и их значения в натуральном масштабе на основном, верхнем и нижнем уровнях приведены в таблице 3.7 [335].

Таблица 3.7 – Планирование эксперимента при выдавливании в закрытом штампе

| Факторы                             | Коэффициент вытяжки ( $x_1$ ) | Коэффициент трения ( $x_2$ ) | Угол матрицы, рад. ( $x_3$ ) | Относительные размеры заготовки и стержня ( $x_4$ ) |
|-------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|---|
| Основной уровень, $X_i$             | 4                             | 0,2                          | 1,309                        | 1,0   |
| Интервал варьирования, $\Delta X_i$ | 2                             | 0,1                          | 0,262                        | 0,5   |
| Верхний уровень, $X_i = +1$         | 6                             | 0,3                          | 1,571                        | 1,5   |
| Нижний уровень, $X_i = -1$          | 2                             | 0,1                          | 1,047                        | 0,5   |

Натуральные значения факторов  $x_i$  переводили в кодированные значения ( $X_i$ ) с использованием зависимостей:

$$X_1 = \frac{x_1 - 4}{2}, \quad X_2 = \frac{x_2 - 0,2}{0,1}, \quad X_3 = \frac{x_3 - 1,309}{0,264}, \quad X_4 = \frac{x_4 - 1,0}{0,5}. \quad (3.46)$$

Для сокращения объема экспериментальных исследований в работе была использована полуреплика  $2^{4-1}$ , которая содержит 8 опытов. Приняли план  $2^{4-1}$  с определяющим контрастом  $1 = X_1 X_2 X_3 X_4$ . После реализации опытов можно построить следующую линейную модель:

$$y = \epsilon_0 + \sum_{i=1}^4 \epsilon_i X_i . \quad (3.47)$$

План эксперимента в кодовом и натуральном масштабе, а также результаты экспериментов приведены в таблице 3.8.

В соответствии с планом эксперимента были изготовлены штампы для выдавливания. Опыты проводили на гидравлическом прессе с электронной записью диаграммы силы выдавливания. В качестве модельного материала для проведения исследований использовали заготовки, изготовленные из свинца [334].

Таблица 3.8 – План  $2^{4-1}$  и результаты экспериментов

| Номер опыта | Кодовый масштаб |                |                |                | Натуральный масштаб |                |                |                | Относительная удельная сила q |
|-------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|
|             | X <sub>1</sub>  | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> | X <sub>4</sub> | x <sub>1</sub>      | x <sub>2</sub> | x <sub>3</sub> | x <sub>4</sub> |                               |
| 1           | +               | +              | +              | +              | 6                   | 0,3            | 1,571          | 1,5            | 4,26                          |
| 2           | -               | +              | +              | -              | 2                   | 0,3            | 1,571          | 0,5            | 2,21                          |
| 3           | +               | -              | +              | -              | 6                   | 0,1            | 1,571          | 0,5            | 3,28                          |
| 4           | -               | -              | +              | +              | 2                   | 0,1            | 1,571          | 1,5            | 1,71                          |
| 5           | +               | +              | -              | -              | 6                   | 0,3            | 1,047          | 0,5            | 4,06                          |
| 6           | -               | +              | -              | +              | 2                   | 0,3            | 1,047          | 1,5            | 2,16                          |
| 7           | +               | -              | -              | +              | 6                   | 0,1            | 1,047          | 1,5            | 3,08                          |
| 8           | -               | -              | -              | -              | 2                   | 0,1            | 1,047          | 0,5            | 1,66                          |

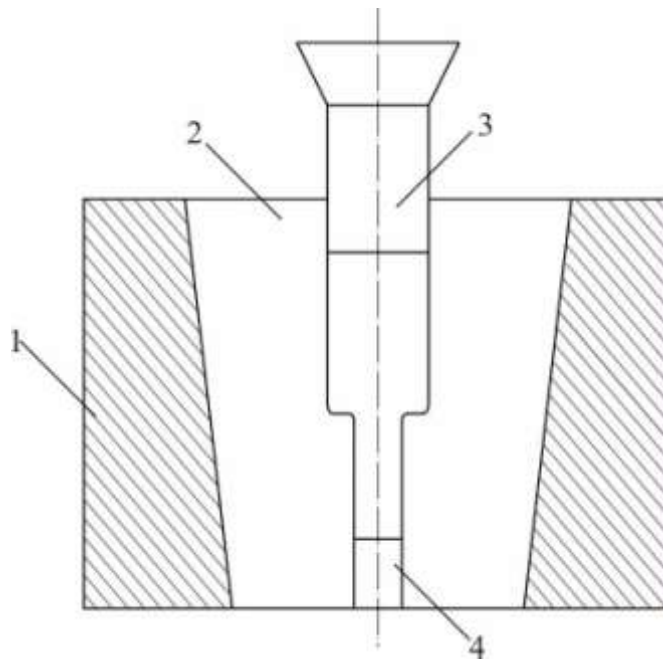
В таблице знак (+) означает верхний уровень фактора, знак (-) – нижний уровень; x<sub>3</sub> – угол наклона матрицы в радианах (90° → 1,571 рад и 60° → 1,047 рад).

При проведении опытов изменение параметров технологического инструмента, определяемого планом эксперимента, достигалось применением сменных матриц и пуансонов. Их размеры, определяющие форму и размеры выдавливаемых деталей для каждого опыта, приведены в таблице 3.9.

Эскиз экспериментального штампа приведен на рисунке 3.23.

Таблица 3.9 – Размеры инструмента при экспериментальных исследованиях

| № опыта          | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  |
|------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $D_m$ , мм       | 24 | 14 | 24 | 14 | 24 | 14 | 24 | 14 |
| $\gamma$ , град. | 90 | 90 | 90 | 90 | 60 | 60 | 60 | 60 |



1 – обойма; 2 – разъемная матрица; 3 – пуансон; 4 – выталкиватель

Рисунок 3.23 – Эскиз штампа для закрытого выдавливания

Каждый опыт проводили 3 раза. Всего с учетом дублирования было проведено 24 опыта. Среднее значение из 3 опытов приведено в последнем столбце таблицы 3.8.

Коэффициенты регрессии рассчитывали по зависимости 3.45:

$$v_0 = 2,802; v_1 = 0,867; v_2 = 0,37; v_3 = 0,063; v_4 = 0.$$

Проверка статистической значимости коэффициентов регрессии показала, что все коэффициенты статически значимые, кроме коэффициента  $v_4$  [335].

Общий вид матрицы и пуансона приведены на рисунке 3.23.

После реализации эксперимента получили линейное уравнение регрессии:

$$q = 2,802 + 0,867 \cdot X_1 + 0,37 \cdot X_2 + 0,063 \cdot X_3 \quad (3.48)$$

Проверка адекватности модели по критерию Фишера показала, что гипотеза об адекватности модели не отвергается.

При анализе модели следует отметить, что все соображения о направлении и силе влияния факторов можно отнести только для выбранного интервала опытов.

В этом интервале опытов наиболее сильное влияние на относительную удельную силу оказывает коэффициент вытяжки  $\lambda$ , коэффициент трения  $\mu$  и угол наклона матрицы  $\gamma$ .



Рисунок 3.24 – Детали штампа для закрытого выдавливания

В натуральном масштабе уравнение (3.48) можно записать в виде:

$$q = 0,0176 + 0,434 \lambda + 3,7 \mu + 0,237 \gamma \quad . \quad (3.49)$$

Угол  $\gamma$  задается в радианах.

На рисунках (3.25–3.27) приведены графики зависимости относительной удельной силы при выдавливании от коэффициента вытяжки, коэффициента трения и угла наклона матрицы.

Точками показаны значения относительной удельной силы, полученные по результатам компьютерного моделирования. Как видно из рисунков, результаты моделирования близко совпадают с экспериментальными данными.

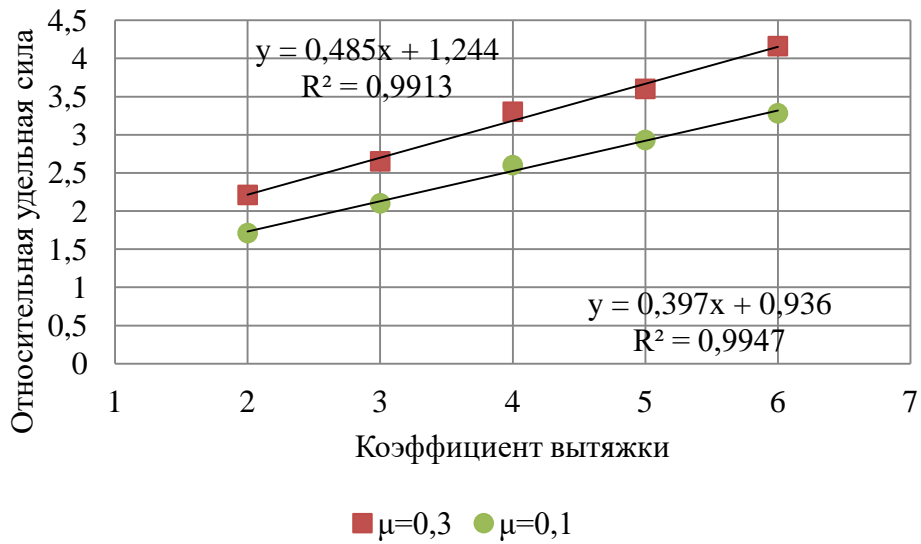


Рисунок 3.25 – Влияние коэффициента вытяжки на относительную удельную силу при  $\gamma = 60^\circ$

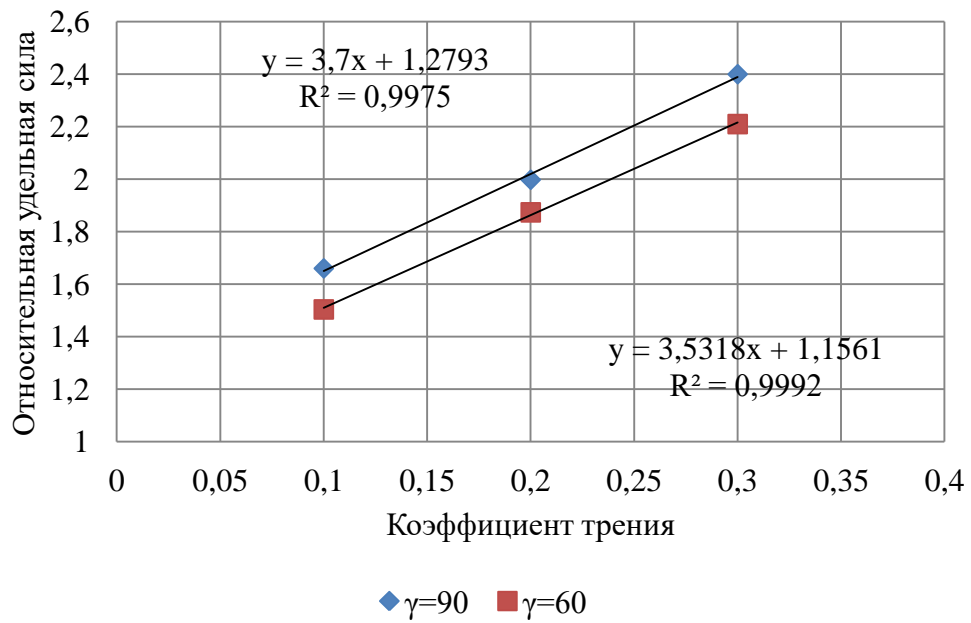


Рисунок 3.26 – Влияние коэффициента трения на относительную удельную силу при  $\lambda = 2$

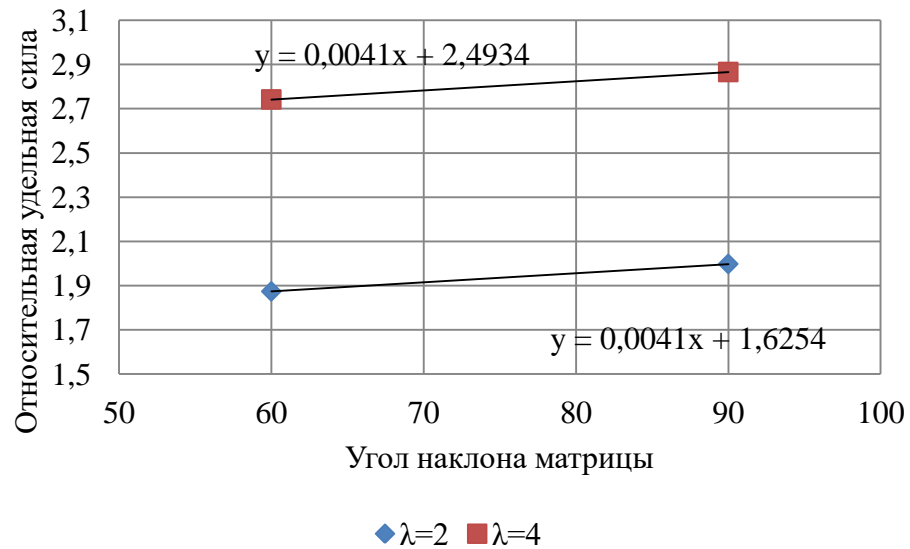


Рисунок 3.27 – Влияние угла наклона матрицы на относительную удельную силу при  $\mu = 0,2$

Также исследовали заполнение металлом торцевой части поковки стержня диаметром 9,6 мм. Торцевая часть стержня поковки была выполненной в виде цилиндра, конуса и специальной формы.

В таблице 3.10 приведены данные компьютерного моделирования и экспериментальных исследований по определению коэффициента формы торцевой части поковки, рассчитанных по формуле (2.24).

Таблица 3.10 – Значение коэффициента формы торца стержня  $K_f$

| Вид торца     | Цилиндр | Конус | Специальная форма |
|---------------|---------|-------|-------------------|
| Моделирование | 3,14    | 2,9   | 2,8               |
| Эксперимент   | 3,31    | 3,06  | 2,94              |

Как видно из таблицы 3.10, данные компьютерного моделирования близко совпадают с данными, полученными экспериментальным путем, максимальная погрешность не превышает 5 %.

### Выводы по главе 3

1. Разработан научно обоснованный план проведения экспериментов и проведены промышленные исследования стана поперечно-винтовой прокатки, по результатам которых отмечено, что диаграмма усилий прокатки имеет пилообразный вид. Установлено, что с увеличением скорости деформации и понижением температуры усилие прокатки возрастает. Сравнивая экспериментальные значения усилия прокатки с величиной максимально допустимых усилий (690кН), можно отметить, что прокатка шара диаметром 93 мм возможна при всех скоростях работы стана. Таким образом, на существующем шаропркатном стане 40-80 при скоростях прокатки от 30 до 80 об/мин без перегрузки по усилиям можно прокатывать шары диаметром 93 мм.

2. Проведены комплексные исследования влияния температуры на сопротивление металла деформации, пластические свойства и угар при нагреве сталей марок Ст3сп, 20, 20ХН, 40, 40Х, 40ХН, 65Г, 35ХГСА, 18ХГТ, 18Х2Н4МА.

Так, для стали 18Х2Н4МА при ее нагреве от температуры 600 °С до температуры 1000 °С сопротивление металла деформации уменьшается в 2,25 раза, пластические свойства увеличиваются в 8,3 раза, и поверхностный угар возрастает в 8 раз.

3. Проведены экспериментальные исследования деформированного состояния при штамповке поковок круглых в плане методом определения напряжений в пластической области по распределению твердости. Исследования по определению силы штамповки показали, что при штамповке в закрытых штампах величина силы штамповки с погрешностью 9–11 % совпадает со значениями, которые получены при помощи компьютерного моделирования. Анализ результатов экспериментальных исследований показал хорошее совпадение неравномерности деформаций и силовых параметров штамповки в закрытых штампах с результатом компьютерного моделирования.

4. Разработана методика, составлен план проведения экспериментов и проведен эксперимент по исследования формоизменения металла и силы при полугорячем выдавливании металла в закрытом штампе. Установлена зависимость силы выдавливания от угла наклона матрицы, коэффициента трения и коэффициента вытяжки. При заполнении металлом торцевой части поковки сила выдавливания может увеличиться в 3,0 раза.

## **4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ**

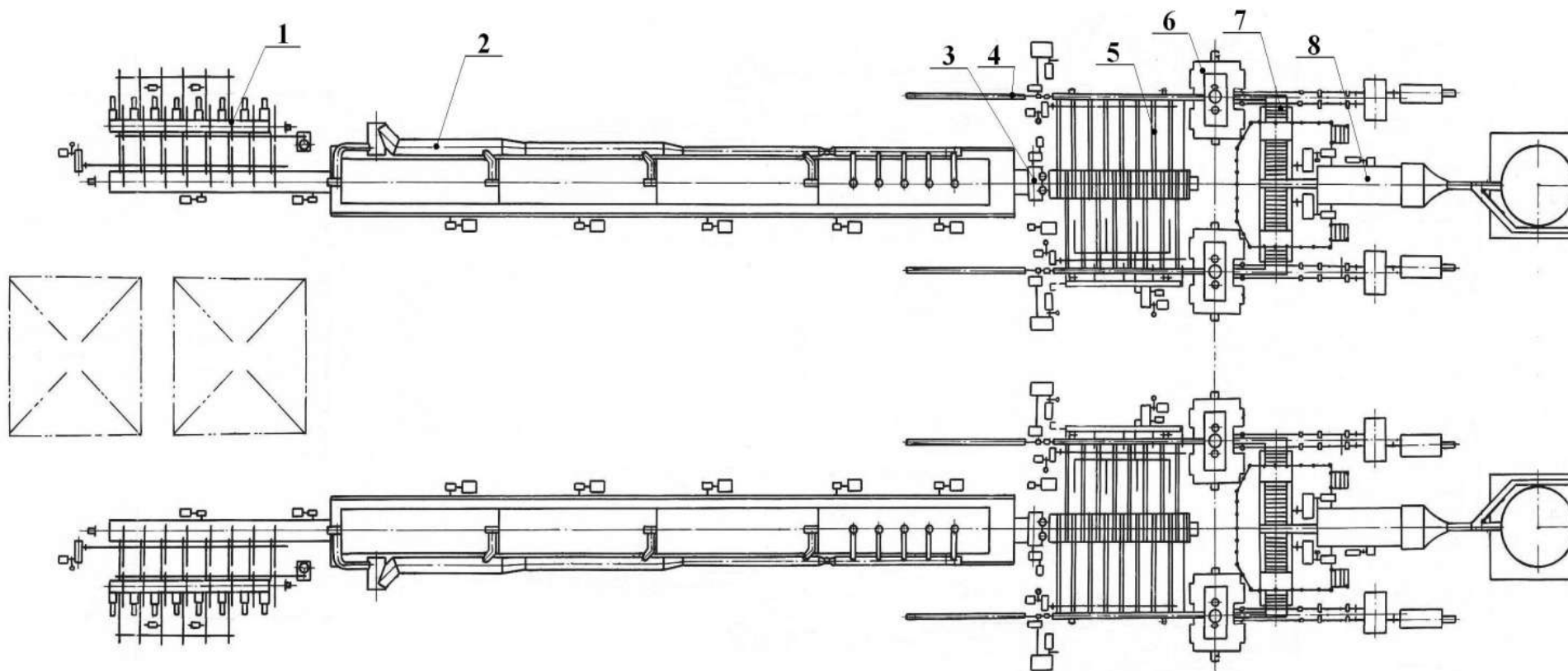
### **4.1 Прокатка шаровых заготовок большого диаметра**

Приведенные в разделе 3 исследования показали возможность производства на существующем оборудовании, предназначенном для прокатки шаров диаметром от 40 до 80 мм, шаровых заготовок номинальным диаметром 90 мм без изменения конструкции прокатных валков.

Для расширения номенклатуры поковок, произведенных по разработанной технологии полугорячей безоблойной штамповки из шаровых заготовок, необходимо расширение сортамента шаропрокатного стана в сторону увеличения диаметра прокатываемых шаровых заготовок. Для этого необходимо провести модернизацию основного оборудования, разработать новую калибровку валков, исследовать процессы формоизменения металла в калибрах, оценить качество выпускаемой продукции и разработать новую технологию прокатки шаровых заготовок большого диаметра [287; 319; 322–325].

#### **4.1.1 Оборудование и технология прокатки шаров**

Шаропрокатный цех металлургического предприятия оборудован двумя одинаковыми шаропрокатными комплексами ШПК 40-80 и термическим отделением. Расположение оборудования комплексов приведены на рисунке 4.1 [320].



1 – механизм загрузки печи, 2 – проходная нагревательная методическая печь, 3 – механизм выгрузки печи, 4 – вталкиватель, 5 – приемный стол, 6 – рабочая клеть, 7 – ковшевой конвейер, 8 – закалочное устройство

Рисунок 4.1 — Схема расположения оборудования в шаропрокатном цехе

Процесс прокатки шаров происходит следующим образом. Заготовка для шаров, горячекатаные прутки круглого сечения длиной 4 м, подается на стол загрузочного устройства и при помощи дозатора, выравнивающего рольганга, раскатывается в один ряд, затем пакетами по 5–18 штанг (в зависимости от диаметра заготовки) одновременно подается на печной рольганг.

Нагрев заготовок производится в двух одинаковых по конструкции проходных нагревательных печах с роликовым подом. Заготовки передвигаются в печи двумя параллельными рядами. Тепловой режим работы печи по зонам устанавливается с таким расчетом, чтобы температура металла перед прокаткой находилась в пределах от 950 до 1100 °С. Температура нагрева металла зависит от диаметра прокатываемых шаров. С увеличением диаметра шара возрастает температура нагрева металла.

Нагретые заготовки выдаются из печи поочередно с помощью тянущего устройства (трайб-аппарата), состоящего из ведущего и двух прижимных роликов, передаются к клети шлепперами переднего стола и скатываются в приемный желоб стола при открытой крышке желоба. Затем крышка желоба закрывается, и заготовка фрикционным вталкивателем подается к рабочей клети.

Рабочая клеть предназначена для прокатки шаров методом поперечно-винтовой прокатки. Прокатка осуществляется с помощью двух валков, вращающихся в одинаковом направлении. Валки, изготовленные из износостойкой стали, имеют однозаходные или многозаходные винтовые калибры. В зависимости от калибровки за каждый оборот прокатывается количество шаров, равное числу заходов винта. Характеристики и размеры валков зависят от диаметра прокатываемых шаров и указаны в таблице 3.1 раздела 3.

Горячие шары после прокатки на стане по наклонным решеткам скатываются в ковшевой конвейер закалочного устройства [320].

Предварительные исследования возможности прокатки шаровых заготовок большого диаметра на существующем оборудовании показали, что главная линия прокатного стане нуждается в реконструкции. В ходе реконструкции увеличена

длина бочки прокатных валков, увеличена мощность электродвигателя, повышена температура нагрева металла при прокатке.

#### 4.1.2 Новая калибровка валков для прокатки шаровых заготовок диаметром 120 мм

Расчет калибровки валков для прокатки шаровой заготовки с условным диаметром 120 мм (фактический диаметр составляет 125 мм) представлен в приложении Д [319; 322–325]. Диаметр валков 440–460 мм. Расчет калибровки выполняется для левого валка, калибровка правого валка аналогична. Единственное отличие в том, что после нарезки реборды правого валка она подрезается по высоте на определенную величину. Исходными данными для калибровки являются техническая характеристика прокатного стана (таблица 3.1, раздел 3), размеры прокатных валков, диаметр получаемого шара.

По расчетным данным строим график изменения высоты реборды, рисунок 4.2 [319; 323].

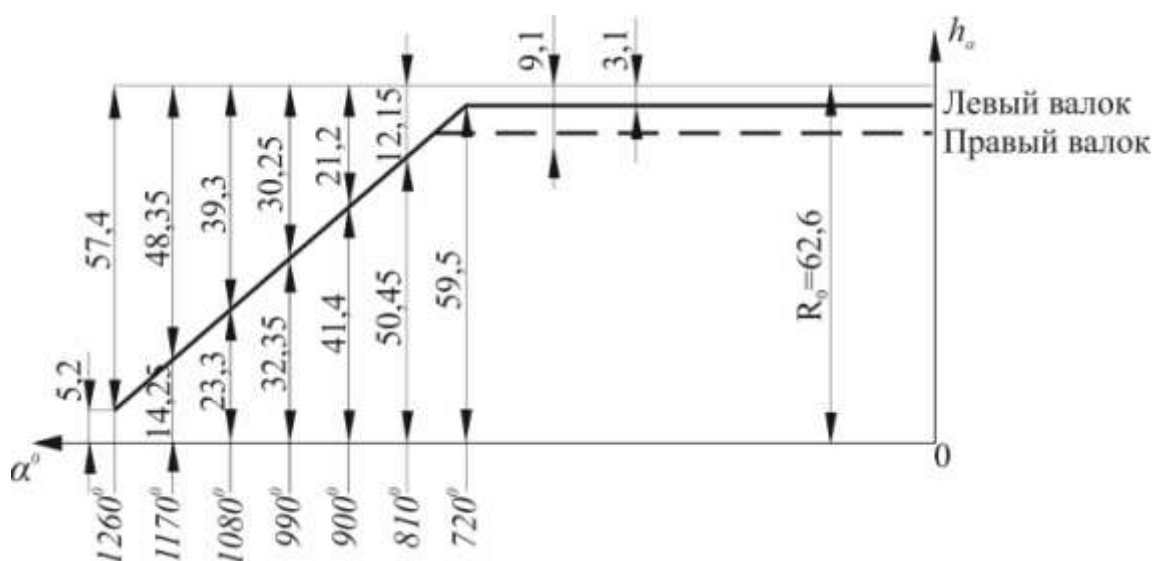


Рисунок 4.2 – График изменения высоты реборды

Из рисунка 4.2 видно, что шар диаметром 125 мм прокатывается за 3,5 оборота ( $1260^{\circ}$ ), из них 1,5 оборота ( $540^{\circ}$ ) составляет формовочный участок, и 2 оборота ( $720^{\circ}$ ) – отделочный участок.

График подрезки реборды приведен на рисунке 4.3.

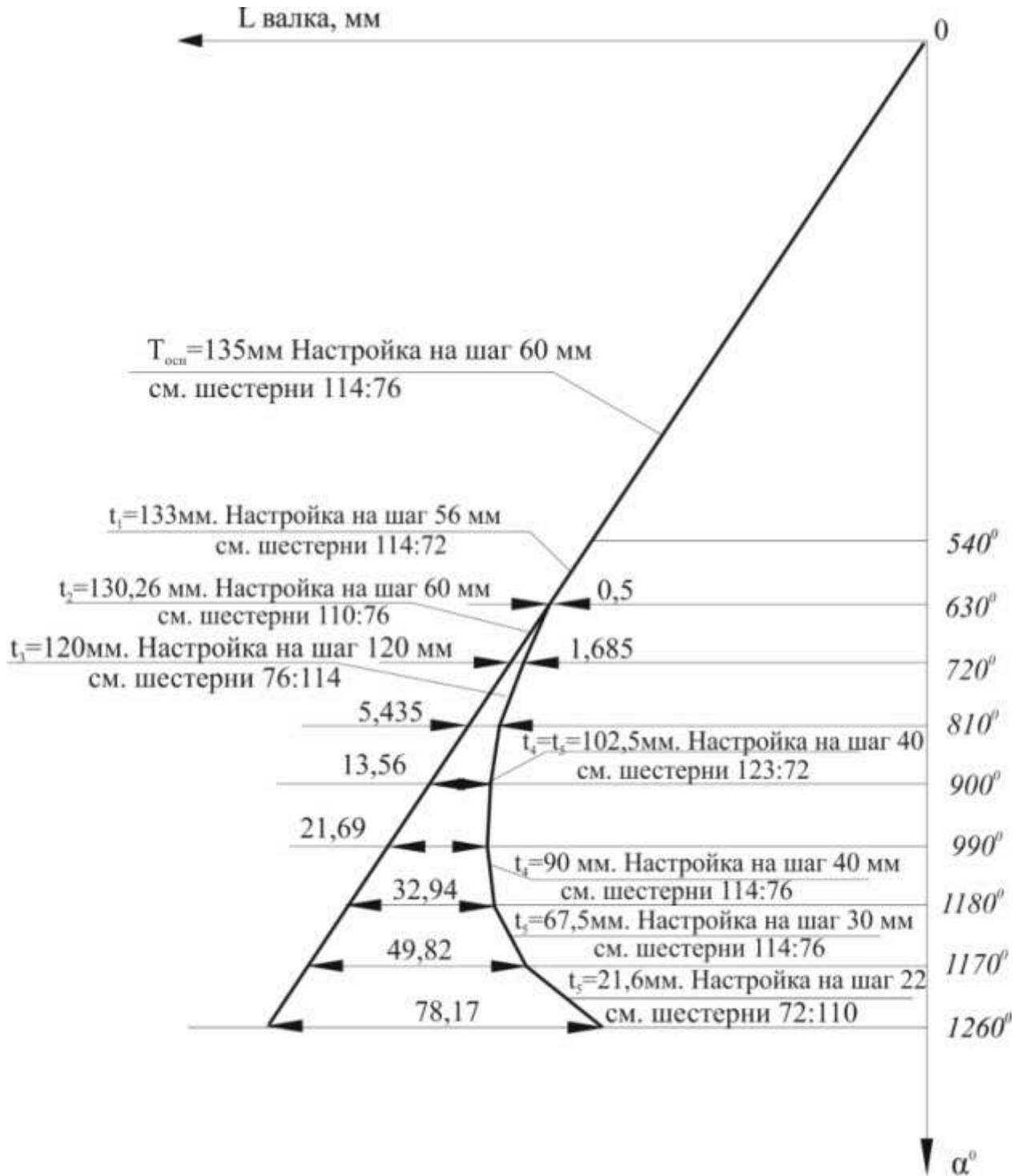
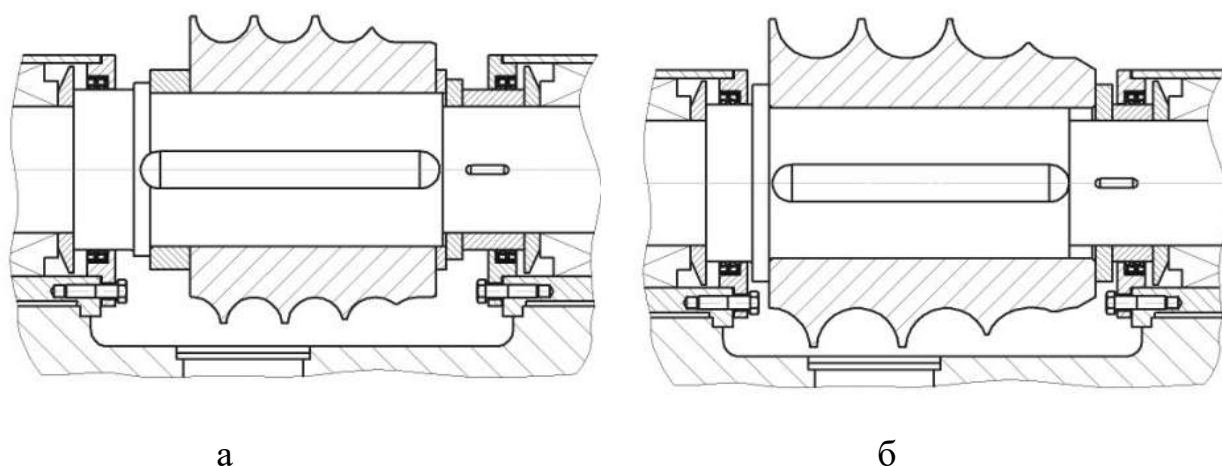


Рисунок 4.3 – График подрезки реборды

Рассчитанная калибровка валков предусматривает увеличение длины и диаметра бочки прокатного валка с минимально возможными зазорами между валком и кассетой для увеличения протяженности винтовой линии калибра и повышения прочности валков. Увеличение размеров бочки валка потребовало изменения в размерах прокатного валка и схемы сборки валка. Схемы сборки валков показаны на рисунке 4.4.



а – для шара  $\varnothing 80$ , б – для шара  $\varnothing 120$

Рисунок 4.4 – Схема сборки прокатных валков

По обобщенным результатам нагрузок, полученным методом компьютерного моделирования, был произведен расчет основных элементов оборудования на прочность. Коэффициент запаса прочности шпинделя главного привода составил 2,9, вала валка – 5,41, что подтвердило возможность прокатки шара условным диаметром 120 мм на шаропркатном стане 40–80. Для снижения нагрузок на оборудование при опытной прокатке шара было принято решение увеличить температуру нагрева заготовок до  $1150^{\circ}\text{C}$ .

Результаты расчета калибровки для прокатки шара номинальным диаметром 120 мм внедрены в производство на ОАО «Гурьевский металлургический завод», приложение Е.

### 4.1.3 Исследования качества прокатанных шаровых заготовок

В работе исследовали качество шаровых заготовок номинальным диаметром 120, 90, 80, 60 и 50 мм, полученных поперечно-винтовой прокаткой на шаропрокатном стане 40-80 [291; 294–296; 303; 336–337]. В связи с неоднородностью материала и отклонениями в режимах технологии производства масса прокатанных шаровых заготовок может принимать различные значения. Величина возможной ошибки зависит от объема испытаний (количество образцов). При определении минимально необходимого объема испытаний  $n$  следует исходить из цели предстоящих испытаний. Если испытания проводят с целью оценки математического ожидания характеристик механических свойств или массы изделия (заготовки), то объем испытаний в предположении нормального распределения определяется по формуле [338].

$$n = \frac{\gamma^2}{\Delta_m^2} x_{1-\alpha/2}^2, \quad (4.1)$$

или

$$n = \frac{z_{1-\frac{\alpha}{2}}^2}{\delta_m^2}, \quad (4.2)$$

где  $\gamma$  – коэффициент вариации определяемой характеристики;

$\Delta_m$  – максимальная относительная ошибка при оценке среднего значения в долях среднего значения определяемой характеристики;

$z_{1-\alpha/2}$  – квантиль уровня  $P = 1 - \frac{\alpha}{2}$  ( $P$  – статистическая надежность) [338];

$\delta_m$  – максимальная относительная ошибка при оценке среднего значения в долях среднего квадратического отклонения изучаемой характеристики.

Как правило, генеральный коэффициент вариации  $\gamma$  является неизвестной величиной, и его значение уточняется в процессе эксперимента. Величину максимальных ошибок  $\Delta_m$  и  $\delta_m$  следует выбирать в зависимости от точности

оценки среднего значения исследуемых характеристик. При низкой точности величину  $\Delta_m$  принимают равной коэффициенту вариации определяемой характеристики, в этом случае  $\delta_m = 1$ . При средней точности принимают  $\Delta_m = (0,4 \div 0,5)\gamma$  и  $\delta_m = 0,4 \div 0,5$ , при высокой точности  $\Delta_m = (0,2 \div 0,3)\gamma$  и  $\delta_m = 0,2 \div 0,3$ .

Принимаем среднюю точность максимальной относительной ошибки. В этом случае  $\delta_m = 0,4$ . Задаемся статистической надежностью  $P = 0,95$  и по таблице «Значение квантилей нормированного нормального распределения» находим значения квантили нормального распределения  $z = 1,645$  [338]. Откуда получим  $n = \frac{1,645^2}{0,4^2} \approx 30$ .

Таким образом, минимально необходимый объем испытаний образцов с целью оценки среднего значения массы прокатанных шаровых заготовок составляет 30 испытаний.

Для исследования отклонения массы полученных шаровых заготовок от номинального развеса были отобраны две партии шаровых заготовок диаметром 90 мм по 30 штук в каждой партии. Взвешивание каждого шара проводили на лабораторных прецизионных весах ВМ 12001, второго класса точности. Отбор проб проводили сразу после прокатки на стане. Шары выбирали только заполненные, без видимых дефектов формы (фактический диаметр шаровой заготовки составлял 93 мм).

Проведя статистическую обработку экспериментальных данных по взвешиванию шаровой заготовки, получили следующие данные.

При прокатке на новых валках:

- выборочное среднее значение  $m_1 = 3307,7$  г;
- выборочная дисперсия  $S_1^2 = 2776,7$ ;
- среднее квадратическое отклонение  $S_1 = 52,69$ .

При прокатке на изношенных валках перед перевалкой:

- выборочное среднее значение  $m_2 = 3329,3$  г,
- выборочная дисперсия  $S_2^2 = 3269,8$ ;

– среднее квадратическое отклонение  $S_2 = 57,18$ .

Ширину доверительного интервала  $\Delta m$  для математического ожидания можно найти по зависимости:

$$\Delta m = \frac{S}{\sqrt{n}} \cdot t, \quad (4.3)$$

где  $t$  – коэффициент Стьюдента.

При числе опытов  $n = 30$  и надежности  $P = 0,95$  коэффициент Стьюдента равен 2,04, тогда величина доверительного интервала  $\Delta m$  для первой серии опытов составляет 19,63 г, для второй серии – 21,30 г.

Таким образом, средняя масса шара диаметром 93 мм составляет для первой серии опытов  $3307 \pm 19,63$  г, для второй серии опытов –  $3336 \pm 21,30$  г и максимальная относительная ошибка по каждой серии  $\approx \pm 0,63$  %.

В дальнейшем проверяли гипотезу о том, что указанные выборки принадлежат одной генеральной совокупности. С этой целью использовали двухсторонний критерий Фишера (F-критерий). Для этого находили опытное значение критерия Фишера [338].

$$F = \frac{S_2^2}{S_1^2} \quad \text{при } S_2^2 \triangleright S_1^2, \quad (4.4)$$

или

$$F = \frac{3269,8}{2776,7} = 1,18.$$

Табличный критерий Фишера, при надежности 0,95;  $F_{29;29;0;95} = 1,84$ .

Так как расчетная величина критерия Фишера меньше табличной, то можно считать, что результаты проведенных двух серий опытов принадлежат одной генеральной совокупности.

Сравнивая результаты первой и второй серии опытов, можно отметить, что по мере износа валков увеличивается величина выборочного среднего значения и несколько вырастает выборочная дисперсия, однако максимальная относительная

ошибка и на изношенных валках не превышает  $\pm 0,63$  %. Таким образом, шаровая заготовка обладает стабильной массой.

Для сравнения по такой же методике провели статистическую обработку по взвешиванию шаров диаметром 50 мм и диаметром 120 мм, прокатанных на новых валках и валках перед их заменой. Результаты приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты статистической обработки

| Диаметр шара, мм |             | Выборочное среднее значение $\bar{m}$ , г | Выборочная дисперсия $S^2$ | Среднее квадратическое отклонение $S$ | $\Delta m$ , г                | Погрешность, % |
|------------------|-------------|---|----------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|----------------|
| Расчетный        | Фактический |   |                            |                                       |                               |                |
| 120              | 125         | $\frac{7978,7}{8297,3}$                   | $\frac{27818,8}{29721,9}$  | $\frac{166,8}{172,4}$                 | $\frac{\pm 62,1}{\pm 64,2}$   | $\pm 0,8$      |
|                  |             | $\frac{3308}{3329}$                       | $\frac{2776,7}{3269,8}$    | $\frac{52,69}{57,18}$                 | $\frac{\pm 19,60}{\pm 21,30}$ |                |
| 90               | 93          | $\frac{567}{570}$                         | $\frac{82,06}{83,60}$      | $\frac{9,059}{9,143}$                 | $\frac{\pm 3,374}{\pm 3,405}$ | $\pm 0,6$      |
|                  |             |   |                            |                                       |                               |                |

Числитель – новые валки;

Знаменатель – изношенные валки.

Данные таблицы показывают стабильность массы шаровой заготовки и для других исследованных диаметров. При анализе таблицы можно отметить, что по мере увеличения диаметра шаровой заготовки точность прокатанных шаровых заготовок уменьшается. По мере износа валков размеры шаровой заготовки увеличиваются.

Одним из основных факторов процесса прокатки шаров в винтовых калибрах является определение режимов деформации, при которых отсутствует разрыхление металла и вскрытие полости в осевой зоне изделия.

Склонность к разрыхлению металла в сердцевине заготовки при поперечно-винтовой прокатке отмечена в работе [59]. Установлено, что склонность металла к разрыхлению в осевой зоне увеличивается при уменьшении величины обжатия в перемычке за половину оборота заготовки, увеличении ширины реборды калибра, снижении температуры прокатки заготовки. В работе [65] отмечается, что с уменьшением ширины реборды калибра склонность к разрыхлению металла в

осевой зоне заготовки уменьшается, и при отношении ширины реборды ( $a$ ) к диаметру ( $d$ ) перемычки  $a / d \leq 1$  можно избежать разрыхления металла при весьма высоких обжатах [294, 295].

Проводили исследования прокатанных шаров из углеродистых и низколегированных марок сталей. Химический состав исследованных сталей приведен в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Химический состав исследованных сталей

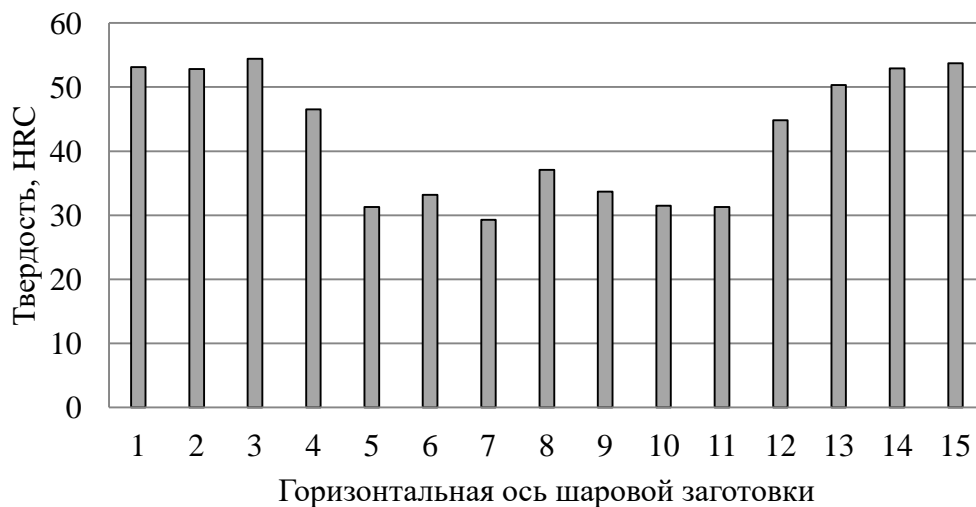
| Сталь                    | Химический состав, % |      |      |       |       |      |      |      |
|--------------------------|----------------------|------|------|-------|-------|------|------|------|
|                          | C                    | Si   | Mn   | P     | S     | Ni   | Cr   | Cu   |
| Углеродистая<br>40       | 0,43                 | 0,28 | 0,72 | 0,015 | 0,03  | 0,22 | 0,21 | 0,19 |
| Низколегированная<br>40X | 0,39                 | 0,27 | 0,64 | 0,007 | 0,026 | 0,22 | 0,93 | 0,20 |

Осмотр показал, что прокатанные шаровые заготовки имеют правильную геометрическую форму, и на поверхности отсутствуют дефекты.

Для проверки качества металла внутренних слоев шаровые заготовки после операций термообработки разрезали по диаметральному сечению, проходящему через полюса (место отрыва перемычек) шара. После шлифовки темплета и удаления поверхностного наклепанного слоя проводили визуальный осмотр поверхности при 5-кратном увеличении. При осмотре на поверхности разреза дефектов в виде пористости или микротрещин обнаружено не было. Далее проводили замеры твердости по всему сечению шара. Замеры проводили в узлах сетки размером  $5 \times 5$  мм.

На рисунках 4.5–4.8 приведены экспериментальные данные по замеру твердости шаровых заготовок после термообработки по вертикальной и горизонтальной (место отрыва перемычек) осям.

На рисунке 4.5 приведены гистограммы распределения твердости по осям шаровой заготовки номинальным диаметром 80 мм из углеродистой стали.



а



б

а – вертикальная ось; б – горизонтальная ось

Рисунок 4.5 – Распределение твердости по осям шаровой заготовки  $\varnothing$  80 мм

При анализе рисунка 4.5а можно отметить наличие двух зон с разной величиной твердости. Подповерхностные слои толщиной 20 мм, имеющие повышенную твердость 50–58HRC (среднее значение 54,1), и центральные слои металла диаметром 40 мм, которые имеют более низкую твердость 30–37HRC

(среднее значение 32,5). Провалов твердости в центральной зоне шаровой заготовки не обнаружено, что говорит об отсутствии внутренних дефектов и хорошем качестве металла внутренних слоев [294; 303].

Распределения твердости по вертикальной оси шаровой заготовки номинальным диаметром 80 мм приведены на рисунке 4.5б. При анализе рисунка можно также отметить наличие двух зон с разной величиной твердости. Подповерхностные слои толщиной 20 мм, имеющие повышенную твердость 50–58HRC (среднее значение 52,6), и центральные слои металла диаметром 40 мм, которые имеют более низкую твердость 30–37HRC (среднее значение 34,3). Провалов твердости в центральной зоне шара не обнаружено, что говорит об отсутствии внутренних дефектов и хорошем качестве металла внутренних слоев.

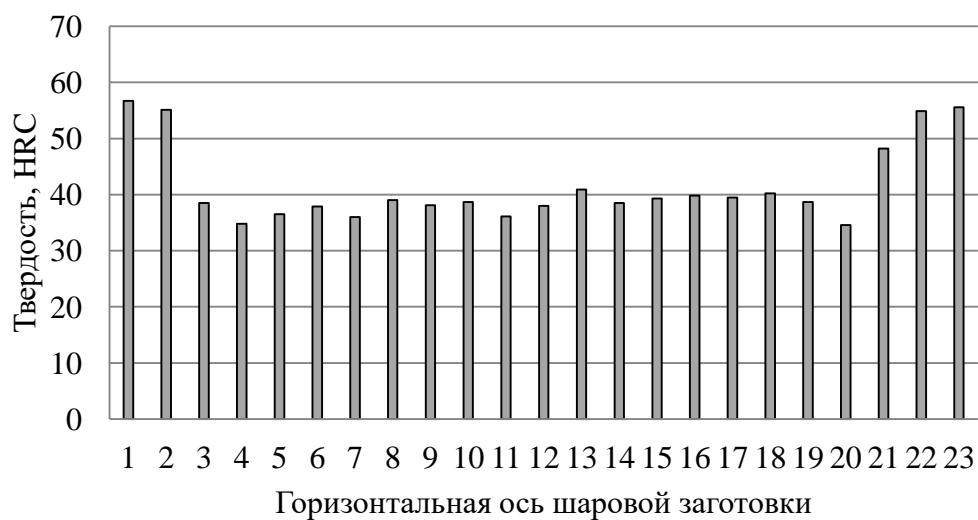
Таким образом, технология прокатки шаровой заготовки номинальным диаметром 80 мм обеспечивает получение изделия без разрыхления металла в сердцевине заготовки.

Аналогичные замеры твердости по горизонтальной и вертикальной осям шаровой заготовки номинальным диаметром 120 мм из углеродистой стали приведены на рисунке 4.6.

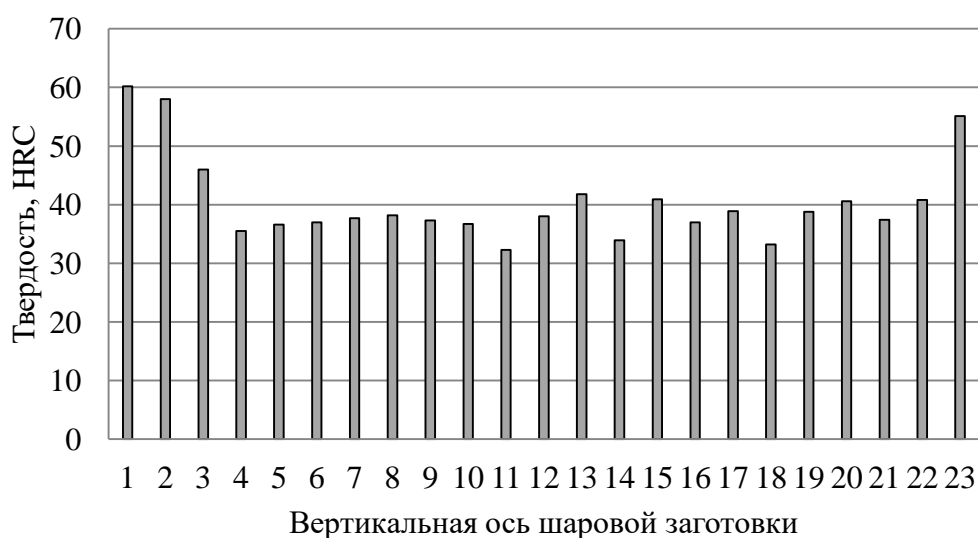
На рисунке 4.6а представлены гистограммы распределения твердости по горизонтальному сечению шаровой заготовки стали номинальным диаметром 120 мм. Также наблюдается наличие двух зон с разной величиной твердости. Подповерхностные слои толщиной 20 мм, имеющие повышенную твердость 55–58HRC (среднее значение 55,6), и центральные слои металла диаметром 90 мм, которые имеют твердость 35–42HRC (среднее значение 38,5). Провалов твердости в центральной зоне шара не обнаружено, что говорит об отсутствии внутренних дефектов и хорошем качестве металла внутренних слоев.

Исследования замеров твердости по вертикальной оси шаровой заготовки (рисунок 4.6б) показали, что поверхностная зона шара имеет твердость 55–60HRC (среднее значение 57,1), и центральная зона шара имеет твердость 32–42HRC (среднее значение 37,8). Провалов твердости во внутренних слоях шара не

обнаружено, что говорит о хорошем качестве металла сердцевинной зоны шаровой заготовки [294; 303].



а



б

а – вертикальная ось; б – горизонтальная ось

Рисунок 4.6 – Распределение твердости по осям шаровой заготовки  $\varnothing$  120 мм

Замеры твердости в диаметральной плоскости шаровой заготовки номинальным диаметром 90 мм из низколегированной стали после термической обработки приведены на рисунке 4.7.



а



б

а – вертикальная ось; б – горизонтальная ось

Рисунок 4.7 – Распределение твердости по осям шаровой заготовки  $\varnothing 90$  мм

Исследования замеров твердости по горизонтальной и вертикальной оси шара (рисунок 4.7) показали, что шар имеет одинаковую твердость 55–60HRC (среднее значение 57,1). Провалов твердости во внутренних слоях также не обнаружено, что говорит о хорошем качестве металла сердцевинной зоны шаровой заготовки.

Аналогичные результаты получены и на шаровых заготовках диаметром 60 мм (рисунок 4.8), которые имеет одинаковую по всему сечению шара твердость, равную 55–59HRC (среднее значение 57,2). Провалы твердости в диаметральных сечениях шаровой заготовки также отсутствуют.



а



б

а – вертикальная ось; б – горизонтальная ось

Рисунок 4.8 – Распределение твердости по осям шаровой заготовки  $\varnothing$  60 мм

## 4.2 Совершенствование режимов нагрева заготовок для полугорячей штамповки

Для повышения пластических свойств, понижения сопротивлению деформации и уменьшения силы деформирования металл перед деформацией подвергают нагреву. В настоящее время наиболее распространенными способами нагрева является нагрев металла в нагревательных печах и нагрев токами высокой (промышленной) частоты (ТВЧ).

### 4.2.1 Определение оптимальных температур нагрева заготовок

Оптимальная температура нагрева металла для его обработки давлением в общем случае зависит от материала заготовки, вида нагревательного устройства и технологического процесса штамповки. При точной штамповке необходимо получить поковку с высоким качеством поверхности для минимальной механической обработки. Для конкретной марки стали оптимальная температура нагрева зависит от ее сопротивления деформации, пластических свойств и количества окалины при нагреве.

Обобщенная функция желательности  $D$  была использована для определения оптимальной температуры нагрева заготовок для точной объемной штамповки поволоков «шестерня» и «фланец» и выдавливания «корпуса распылителя» [29; 303; 339–342].

В качестве откликов были использованы:

$y_1$  – сопротивление металла деформации, МПа;

$y_2$  – пластические свойства металла, степень деформации сдвига до разрушения;

$y_3$  – поверхностный угар при нагреве,  $\text{кг}/\text{м}^2$ .

Для определения частных функций желательности необходимо сначала установить преобразование измеряемых свойств  $y_i$  в соответствующее ему значением частной функции желательности  $d_i$ .

Построение шкалы желательности, которая устанавливает соотношение между значением свойств  $y$  и соответствующее ему значением частной функции желательности  $d$ , является в своей основе субъективным, отражающим отношение исследователя к отдельным откликам.

В качестве примера приведен расчет оптимальной температуры нагрева для стали 18Х2Н4МА [298; 341]. Принимаем, что при высоком сопротивлении деформации возможно смятие инструмента и получение поковок низкого качества. Поэтому из технологических соображений определяем предельно допустимый базовый уровень сопротивления деформации  $y_{11} = 450$  МПа; будем считать эту величину желательности  $d_{11} = 0,20$ , т. е. получаем поковку низкого качества. При снижении сопротивления деформации до 300 МПа можно существенно уменьшить износ инструмента и получить поковки хорошего качества. Будем считать, что величина частной функции желательности в этом случае равна  $d_{12} = 0,70$ .

Принимаем, что при пластических свойствах металла, которые оцениваются степенью деформации сдвига до разрушения при испытании на кручение, равных  $y_{21} = 1,5$ , на изделии возможно появление трещин при его штамповке. В этом случае будем считать, что поковка имеет недопустимый уровень качества, и принимаем величину частной функции желательности  $d_{21} = 0,20$ . При увеличении пластических свойств до 6,0 получаем поковку хорошего уровня качества. При этом уровне пластических свойств принимаем величину частной функции желательности  $d_{22} = 0,70$ .

Аналогично, при поверхностном угаре  $y_{31} = 0,30$  г/м<sup>2</sup> окалина на заготовке не позволяет получить поковку с высоким качеством поверхности. В этом случае принимаем величину частной функции желательности  $d_{31} = 0,20$ . При снижении температуры величина поверхностного угара уменьшается, и при  $y_{32} = 0,10$  г/м<sup>2</sup>

можно получить поковку с высоким качеством поверхности. Принимаем в этом случае частную функцию желательности  $d_{32} = 0,70$ .

Таким образом, из технологических соображений износа штампового инструмента возможности получения поволок с высоким качеством поверхности из-за наличия окалины были приняты значения  $y_1, y_2, y_3$ , которые соответствовали двум базовым отметкам по шкале желательности.

Базовые значения свойств и соответствующие частные функции желательности при объемной штамповке стали марки 18X2H4MA представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Базовые значения свойств и соответствующие частные функции желательности стали марки 18X2H4MA

| Свойства                | Сопротивление деформации $d_1$ , МПа |          | Пластичность металла $d_2$ , единиц |          | Угар металла $d_3$ , г/м <sup>2</sup> |          |
|-------------------------|--------------------------------------|----------|-------------------------------------|----------|---------------------------------------|----------|
|                         | $y_{11}$                             | $y_{12}$ | $y_{21}$                            | $y_{22}$ | $y_{31}$                              | $y_{32}$ |
| Значение свойств, $y_i$ | 450                                  | 300      | 6,0                                 | 1,50     | 0,10                                  | 0,30     |
| Желательность, $d$      | 0,20                                 | 0,70     | 0,70                                | 0,20     | 0,70                                  | 0,20     |

Преобразование отклика  $y_i$  в частную функцию желательности  $d_i$  имеет вид:

$$d_i(t) = \exp \left[ -\exp \left[ -(b_{0i} + b_{ij} \cdot y_{ij}) \right] \right]. \quad (4.5)$$

Это уравнение можно привести к виду:

$$-(b_{0i} + b_{ij} \cdot y_{ij}) - \ln \left( \ln \left( \frac{l}{d_{ij}} \right) \right) = 0. \quad (4.6)$$

Значения коэффициентов  $b_{0i}$  и  $b_{ij}$  можно определить, если подставить значение двух свойств  $y_{ij}$  и соответствующие им значения желательности  $d_i$  из таблицы 4.3. В результате получаем систему из двух уравнений, которую решаем математическими методами с использованием пакета MathCad.

Из таблицы 4.3 записываем базовые значения двух свойств по сопротивлению металла деформации:  $y_{11} = 450$  и  $y_{12} = 300$ . Соответствующие им

частные функции желательности равны  $d_{11} = 0,2$  и  $d_{12} = 0,7$ . Подставляя в уравнение 4.6 выбранные значения  $y_{ij}$  и  $d_{ij}$ , получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} -(b_{01} + b_{11} \cdot 450) = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{0,2}\right)\right) \\ -(b_{01} + b_{11} \cdot 300) = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{0,7}\right)\right) \end{cases} \quad (4.7)$$

Проводим расчеты для нахождения частных функций желательности:

$$y_{11} := 450 \quad y_{12} := 300 \quad d_{11} := 0.2 \quad d_{12} := 0.7$$

*Given*

$$-(b_{01} + b_{11} \cdot y_{11}) - \ln\left(\ln\left(\frac{1}{d_{11}}\right)\right) = 0,$$

$$-(b_{01} + b_{11} \cdot y_{12}) - \ln\left(\ln\left(\frac{1}{d_{12}}\right)\right) = 0.$$

*Find*( $b_{01}, b_{11}$ ) $\rightarrow$

Получим решение системы уравнений, где  $b_{01} = 4.0446$  и  $b_{11} = -0.1005$ .

Подставляя полученные значения коэффициентов в уравнение (4.5), получаем  $d_1 = \exp(-\exp(-(4,0446 - 0,1005 \cdot y_1)))$ . В свою очередь, величина  $y_1$  зависит от температуры. Значения  $y_1$  для каждой температуры испытания можно найти по графику (рисунок 3.8б, раздел 3). Подставляя значения  $y_1$  для каждой температуры испытания, находим частную функцию желательности для данной температуры. Полученные значения частных функций желательности  $d_1$  для разных температур нагрева представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Частная функция желательности сопротивления металла деформации стали 18X2H4MA

| Температура, С                           | 600   | 700   | 800   | 900   | 1000  |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| Сопротивление деформации, $\sigma$ , МПа | 450   | 350   | 280   | 240   | 200   |
| Частная функция желательности, $d_1$     | 0,199 | 0,554 | 0,747 | 0,822 | 0,877 |

Аналогичным образом рассчитывали частные функции желательности для пластических свойства металла и поверхностного угара при нагреве.

Далее, для каждой температуры нагрева по уравнению (2.16) рассчитывали значения обобщенной функции желательности  $D$ , которые представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Значения частных и обобщенной функции желательности стали 18X2H4MA

| Температура,<br>°С | Частные функции желательности              |   |   | Обобщенная<br>функция<br>желательности $D$ ,<br>единиц |
|--------------------|--|---|---|--|
|                    | сопротивление<br>деформации $d_1$ ,<br>МПа | пластичность<br>металла $d_2$ ,<br>единиц | угар<br>металла<br>$d_3$ , г/м <sup>2</sup> |  |
| 600                | 0,201                                      | 0,242                                     | 0,783                                       | 0,335  |
| 700                | 0,539                                      | 0,544                                     | 0,768                                       | 0,614  |
| 800                | 0,725                                      | 0,825                                     | 0,661                                       | 0,741  |
| 900                | 0,815                                      | 0,941                                     | 0,467                                       | 0,713  |
| 1000               | 0,878                                      | 0,986                                     | 0,033                                       | 0,305  |

По результатам расчета построен график (рисунок 4.9) зависимости обобщенной функции желательности  $D$  от температуры нагрева.

Таким образом, вместо трех изучаемых свойств получен один комплексный показатель качества поковки при полугорячей штамповке. Как видно из рисунка 4.9, обобщенная функция желательности описывается кривой с максимумом. Максимальное значение функции желательности соответствует оптимальной температуре нагрева металла для полугорячей штамповки корпуса распылителя дизельной форсунки из стали 18X2H4MA. Интервал оптимальной температуры нагрева заготовки составляет 830–850 °С.

Аналогичным образом проводим расчет оптимальной температуры нагрева для полугорячей штамповки стали марки 40X. Для этого из технологических

соображений (качество поковки, износ штампового инструмента) принимаем базовые значения свойств и соответствующие им частные функции желательности, которые приведены в таблице 4.6.

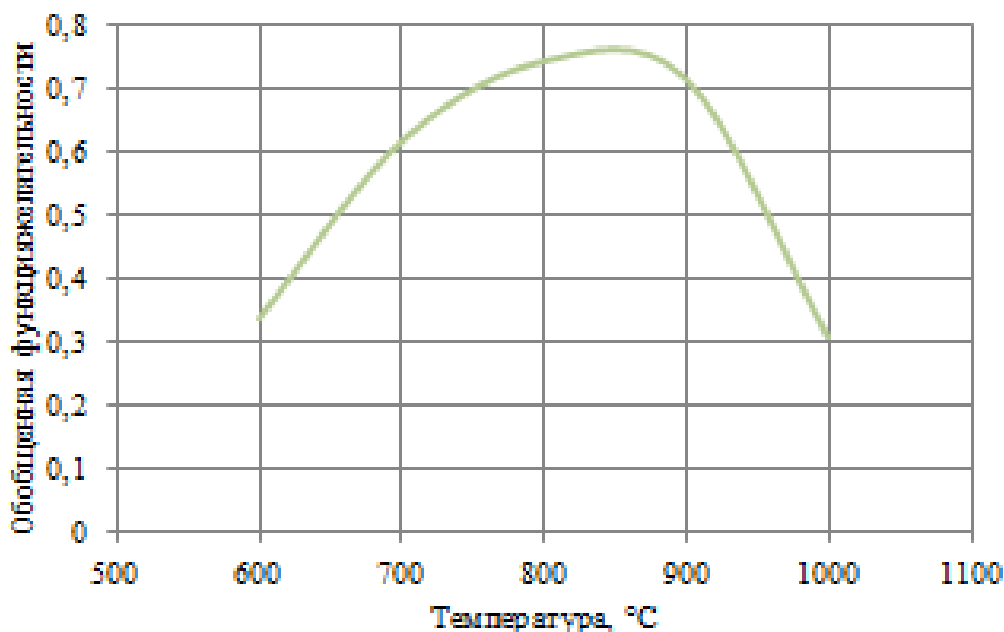


Рисунок 4.9 – Влияние температуры на обобщенную функцию желательности для стали марки 18X2H4MA

Таблица 4.6 – Базовые значения свойств и соответствующие частные функции желательности для стали марки 40X

| Свойства                | Сопротивление деформации, $d_1$ , МПа |          | Пластичность металла, $d_2$ |          | Угар металла, $d_3$ , г/м <sup>2</sup> |          |
|-------------------------|---------------------------------------|----------|-----------------------------|----------|--|----------|
|                         | $y_{11}$                              | $y_{12}$ | $y_{21}$                    | $y_{22}$ | $y_{31}$                               | $y_{32}$ |
| Значение свойств, $y_i$ | 300                                   | 150      | 10                          | 5,5      | 0,09                                   | 0,25     |
| Желательность, $d$      | 0,70                                  | 0,20     | 0,70                        | 0,20     | 0,70                                   | 0,20     |

Далее, определяли уравнение для расчета частной функции желательности для сопротивления металла деформации:

$$d_1 = \exp(-\exp(-(2,5376 + (-0,0101 \cdot y_1))))). \quad (4.8)$$

Полученные значения приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Частная функция желательности сопротивления металла деформации стали марки 40Х

|  |       |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| Температура, °С                          | 600   | 700   | 800   | 900   | 1000  |
| Сопротивление деформации, $\sigma$ , МПа | 387   | 283   | 220   | 171   | 145   |
| Частная функция желательности, $d_1$     | 0,021 | 0,258 | 0,487 | 0,644 | 0,712 |

Для пластических свойств:

$$d_2 = \exp(-\exp(-(-2,3176 + (0,3348 \cdot y_2))))). \quad (4.9)$$

Для поверхностного угара при нагреве:

$$d_3 = \exp(-\exp(-(-1,8775 + (-9,4176 y_3))))). \quad (4.10)$$

Результаты вычисления частных и обобщенной функции желательности приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Значения частных и обобщенной функции желательности для стали марки 40Х

| Температура,<br>°С | Частные функции желательности               |  |  | Обобщенная<br>функция<br>желательности<br>D, единиц |
|--------------------|---|--|--|---|
|                    | сопротивление<br>деформации, $d_1$ ,<br>МПа | пластичность<br>металла, $d_2$ ,<br>единиц | угар<br>металла,<br>$d_3$ , г/м <sup>2</sup> |   |
| 600                | 0,021                                       | 0,129                                      | 0,783  | 0,128   |
| 700                | 0,258                                       | 0,192                                      | 0,700  | 0,326   |
| 800                | 0,487                                       | 0,354                                      | 0,533  | 0,451   |
| 900                | 0,644                                       | 0,639                                      | 0,200  | 0,435   |
| 1000               | 0,712                                       | 0,883                                      | 0,0001                                       | 0,040   |

По результатам расчета построен график (рисунок 4.10) зависимости обобщенной функции желательности  $D$  от температуры нагрева для стали марки 40Х.

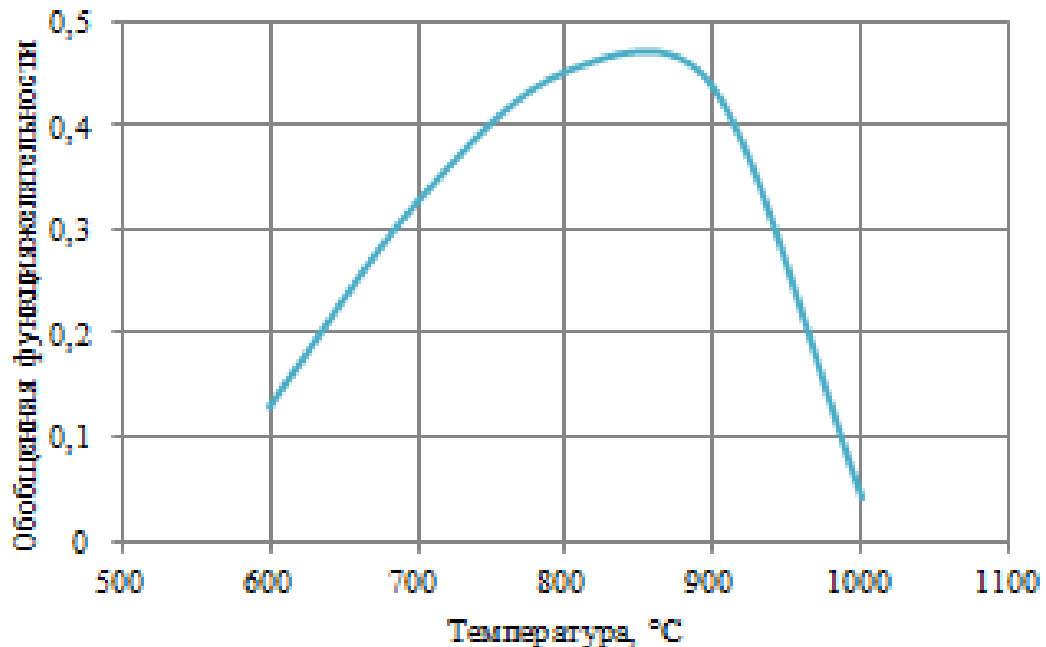


Рисунок 4.10– Влияние температуры на обобщенную функцию желательности для стали марки 40Х

Как видно из рисунка 4.10, обобщенная функция желательности описывается кривой с максимумом. Максимальное значение функции желательности соответствует оптимальной температуре полугорячей штамповки поковок из стали 40Х. Из графика видно, что интервал оптимальной температуры нагрева заготовки с учетом охлаждения при передаче металла от печи к штампу составляет 850–860 °C.

Систематизированные данные по оптимальной температуре нагрева металла перед штамповкой, рассчитанные с использованием обобщенной функции желательности, приведены в таблице 4.9.

Сравнивая результаты температуры нагрева металла с использованием обобщенной функции желательности и справочные данные [343], можно отметить, что расчетные данные, с учетом понижения температуры металла при пластической деформации, находятся в пределах температурного интервала, рекомендованного в справочнике.

Таблица 4.9 – Данные по рациональной температуре нагрева металла перед полугорячей штамповкой

| Марка стали | Расчетная температура нагрева металла, °С | Температура конца деформирования, °С |         |
|-------------|---|--------------------------------------|---------|
|             |   | не выше                              | не ниже |
| Ст. 3 сп    | 750–760                                   | 800                                  | 700     |
| 20          | 820–830                                   | 830                                  | 720     |
| 40          | 840–850                                   | 850                                  | 760     |
| 20ХН        | 830–840                                   | 870                                  | 800     |
| 40Х         | 850–860                                   | 870                                  | 800     |
| 40ХН        | 850–860                                   | 870                                  | 800     |
| 65Г         | 830–840                                   | 850                                  | 760     |
| 35ХГСА      | 830–840                                   | 870                                  | 800     |
| 18ХГТ       | 850–870                                   | 870                                  | 800     |
| 18Х2Н4МА    | 830–850                                   | 850                                  | 750     |

### 4.3 Оптимальные размеры заготовки для штамповки шара 120 мм

Как было сказано ранее, шаропрокатные станы 40-80 предназначены для прокатки шаров максимальным диаметром 80 мм. Проведенные исследования

показали, что путем модернизации оборудования прокатных станов можно прокатывать шары диаметром до 100 мм [297]. Реконструкция линии прокатного стана (замена электродвигателя, изменение длины бочки прокатных валков и подшипников качения, повышение температуры нагрева заготовки и др.) позволяет прокатывать на существующем оборудовании шары номинальным диаметром до 120 мм. Оборудование и технология для прокатки шаров номинальным диаметром больше 120 мм в настоящее время отсутствует.

Шары диаметром 120–200 мм и более получают штамповкой на КГШП (кривошипных горячештамповочных прессах) [344].

Серийное производство шаров диаметром 120 мм штамповкой на КГШП осуществляется из горячекатаных прутков диаметром 85 мм ГОСТ 2590-88. Предварительно, перед резкой прутка на мерные заготовки, металл нагревают в камерной печи с выдвижным подом до температуры 600<sup>0</sup>С с последующей выдержкой в течение 1,5–2 часов.

Резку заготовок под штамповку выполняют на пресс-ножницах ScPK 1800.1 усилием 7,5 МН (750 т). Длина отрезаемой заготовки составляет  $L = 198 \pm 2$  мм. Нагрев заготовок перед штамповкой до температуры 1100–1150<sup>0</sup>С производится в индукционном нагревателе ИК1 750/1 с темпом выдачи 18–20 с. Шары штампуются на кривошипном горячештамповочном прессе АК КБ8544 усилием 25 МН (2500 т). Нагретую заготовку осаживают на плоскопараллельных плитах предварительного ручья штампа до высоты 130 мм. В окончательном ручье штампа формируется шар диаметром 120 мм. После штамповки шара производится операция обрезки облоя на кривошипном прессе усилием 2,5 МН (250 т), далее шары по наклонному желобу поступают в установку для закалки.

В связи с тем, что величина зерна зависит от неравномерности деформированного состояния шара во время его штамповки, была поставлена задача получения шара с более равномерной деформацией по сечению за счет изменения размеров исходной заготовки. Для оценки величины неравномерности деформированного состояния шара использовали результаты компьютерного моделирования [345; 346].

Компьютерное моделирование проводили с использованием пакета программ Deform.

Условия моделирования:

- материал заготовки – сталь марки 40;
- температура нагрева заготовки – 1100 °С;
- коэффициент трения соответствует применению смазки графит + вода – 0,4;
- оборудование для штамповки – кривошипный пресс АККБ 8544.

Размер исходных цилиндрических заготовок варьировался и составлял диаметр 80, 90 и 110 мм, с высотой 224, 176 и 118 мм соответственно [345; 346].

Процесс моделирования штамповки заготовок диаметром 80 и 90 мм осуществлялся согласно технологическому процессу с предварительной осадкой до высоты 130 мм. Заготовку диаметром 110 мм использовали в моделировании штамповки шара без предварительной осадки [344–346].

Распределение интенсивности деформаций по объему шаров по результатам компьютерного моделирования приведено на рисунках 4.11 (а–в) (правая часть рисунка).

Как видно из рисунка 4.11 (а, б), наименее деформированные зоны расположены в области верхнего и нижнего полюсов шара. По направлению к центральным слоям шара интенсивность деформаций возрастает. Максимальная величина интенсивности деформаций наблюдается в области облоя. Величина неравномерности интенсивности деформаций достигает 6–8 при штамповке из заготовки диаметром 80 мм, длиной 224 мм, 4–5 – при штамповке из заготовки диаметром 90 мм, длиной 176 мм, 2–3 – при штамповке из заготовки диаметром 110 мм, длиной 118 мм [345; 346].

Математическое моделирование штамповки шара показало, что наиболее технологичные размеры исходной заготовки составляют в диаметре 110 мм, высотой 118 мм.

Для проверки адекватности компьютерного моделирования были проведены экспериментальные исследования деформированного состояния шара с использованием метода определения деформаций в пластической области по распределению твердости [303; 332].

Алюминиевые цилиндрические заготовки (технический алюминий по ГОСТ Р 55375-2012 с содержанием алюминия 99,7 %) диаметром 80 и 90 мм (высотой 224 и 176 мм) согласно технологическому процессу промышленной штамповки шаров штамповались на кривошипном горячештамповочном прессе АККБ 8544 без предварительного нагрева. В предварительном ручье штампа заготовки осаживались на плоскопараллельных плитах, смазанных солидолом. В окончательном штампе формировался шар. Процесс штамповки шара из заготовки диаметром 110 мм (высотой 118 мм) осуществлялся без предварительной осадки.

Готовые поковки разрезали вдоль вертикальной плоскости симметрии и затем подвергали шлифовке. На шлифованную поверхность при помощи координатно-расточного станка наносилась ортогональная координатная сетка с шагом ячеек 5 мм по обеим осям. В узлах координатной сетки помощи пресса Бринелля ТШ-2 с шариком диаметром 5 мм с постоянной нагрузкой  $F = 2452 \text{ Н}$  (250 кгс) измеряли твердость.

На основании экспериментально установленных значений твердости в узлах координатной сетки при помощи тарировочного графика (рисунок 3.16, раздел 3) были определены значения интенсивности деформаций. Соединяя точки с равными значениями интенсивности деформаций, были построены изолинии равной интенсивности деформаций. На рисунке 4.11 (а–в левая часть) показаны изолинии равной интенсивности деформаций при штамповке шара из цилиндрической заготовки по результатам экспериментальных исследований.

Сравнивая левые и правые части рисунков 4.11 (а–в), можно отметить, что экспериментальные данные по распределению интенсивности деформаций по результатам штамповки шара качественно совпадают с результатами

компьютерного моделирования. Погрешность компьютерного моделирования не превышает 10 %.

По результатам проведенного исследования была разработана технология штамповки шара из цилиндрической заготовки диаметром 110 мм и длиной 118 мм. За счет сокращения одной операции (предварительная осадка заготовки) темп штамповки сокращен с 18–20 с до 10–12 с. Производительность прессы при штамповке шаров возросла почти в два раза.

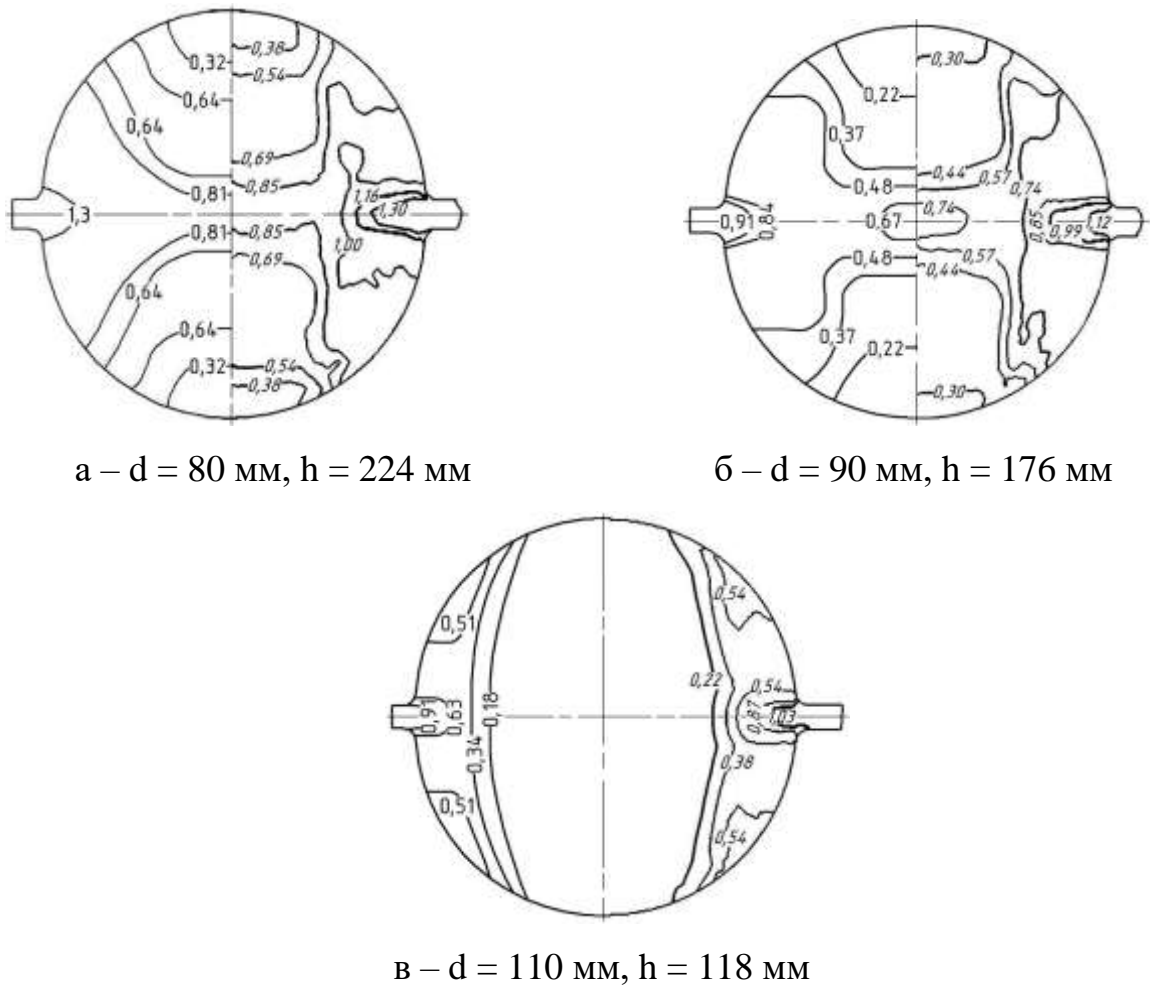


Рисунок 4.11 – Распределение интенсивности деформаций в осевой плоскости сечения шара, полученных путем математического моделирования (правая половина) и промышленной штамповкой (левая половина) из цилиндрической заготовки

## Выводы по главе 4

1. На основе результатов теоретических и промышленных исследований проведена реконструкция шаропрокатного стана 40-80 с целью расширения сортамента. Разработана новая калибровка валков для прокатки шаровых заготовок номинальным диаметром 120 мм. Новая ресурсосберегающая технология прокатки шаров большого диаметра внедрена в производство.

2. Проведено исследование качества шаровых заготовок, прокатанных согласно разработанной калибровке. Результаты показали отсутствие пустот и рыхлостей в центральных слоях шаровых заготовок. Шары имеют стабильную массу для всех исследованных диаметров. Отклонение массы от номинала не превышает 8 %. По мере увеличения диаметра шара и износа валков размеры шара увеличиваются.

3. С применением обобщенной функции желательности на основе экспериментальных данных проведены расчеты оптимальной температуры нагрева металла для полугорячей штамповки в зависимости от сопротивления деформации, пластических свойств и количества окалина при нагреве.

Для исследованных марок стали: ст3сп, 20, 20ХН, 40, 40Х, 40ХН, 65Г, 35ХГСА, 18ХГТ, 18Х2Н4МА оптимальная температура нагрева под полугорячую штамповку составляет 830–870<sup>0</sup> С.

4. С использованием компьютерного моделирования и экспериментальных исследований с применением метода распределения твердости на поверхности образца определены оптимальные размеры исходной цилиндрической заготовки и разработана новая технология штамповки шаровых заготовок диаметром более 120 мм. За счет сокращения одной операции (предварительная осадка заготовки) темп штамповки сокращен с 18–20 с. до 10–12 с. Производительность прессы при штамповке шаров возросла почти в два раза.

## **5 ВНЕДРЕНИЕ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУГОРЯЧЕЙ БЕЗОБЛОЙНОЙ ШТАМПОВКИ**

Как было отмечено в литературном обзоре, применяемые в кузнечных цехах машиностроительных заводов технологические процессы полугорячей и горячей объемной штамповки осесимметричных поковок из цилиндрической заготовки не являются оптимальными [293]. Значительный экономический эффект за счет энерго- и ресурсосбережения можно получить, используя шаровую заготовку в качестве исходной [73; 76; 82; 290; 291]. Шаровая заготовка, по сравнению с цилиндрической, обладает следующими преимуществами:

- шаровая заготовка имеет высокую точность по массе;
- при нагреве шаровой заготовки наблюдается меньший перепад температуры по сечению;
- шаровая заготовка имеет меньшую площадь поверхности и, следовательно, меньше окалины;
- меньшее количество окалины позволяет повысить работоспособность штампового инструмента;
- при штамповке из шаровой заготовки не требуется ориентация заготовки при подаче в штамп.

На основе результатов проведенных исследований разработаны и внедрены новые технологии получения деталей с применением комплексной технологии полугорячей безоблойной штамповки, представленные в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Практическая реализация результатов работы

| Технические предложения  | Предприятие  | Технологический эффект  | Экономический эффект (руб.)            |
|--|--|---|--|
| Калибровка валков и технология прокатки шара 120 мм                        | ОАО «Гурьевский металлургический завод»<br>Кемеровская обл.,<br>г. Гурьевск        | Реализация нового вида продукции  | 3,54 млн<br>Долевой<br>1,56 млн        |
| Методика расчета калибровки валков для прокатки шара и технология прокатки | АО «ЕВРАЗ ЗСМК»<br>Кемеровская обл.<br>г. Новокузнецк                              | Реализация нового вида продукции  | 3 млн<br>Долевой 20 %                  |
| Штамповка двух поковок из шаровой заготовки                                | ООО «Тонар АГРО»<br>Алтайский край,<br>г. Барнаул                                  | Экономия металла 21 %,<br>электроэнергии 23 %. Рост<br>производительности<br>труда 10 % | 2 млн<br>Долевой 2 млн                 |
| Новая технология штамповки детали «корпус распылителя»                     | ООО «ТехнОмаш»<br>Алтайский край,<br>г. Барнаул                                    | Экономия<br>металла   | 1 млн 458 тыс.<br>Долевой 354,5 тыс.   |
| Технология штамповки детали «шестерня»                                     | ОАО «Новокузнецкий вагоностроительный завод»<br>Кемеровская обл.<br>г. Новокузнецк | Экономия<br>металла   | 2 млн 991,3 тыс.<br>Долевой 774,8 тыс. |

### 5.1 Применение комплексной технологии полугорячей безоблойной штамповки для производства шестерни 12.37.118

Шестерня 12.37.118 относится к категории серийной продукции кузнечных цехов. Чертеж шестерни представлен на рисунке 5.1.

Согласно технологической инструкции шестерню 12.37.118 в условиях кузнечного цеха штампуют в горячем состоянии (температура 1100 °С) в открытом штампе [76; 307; 347; 348].

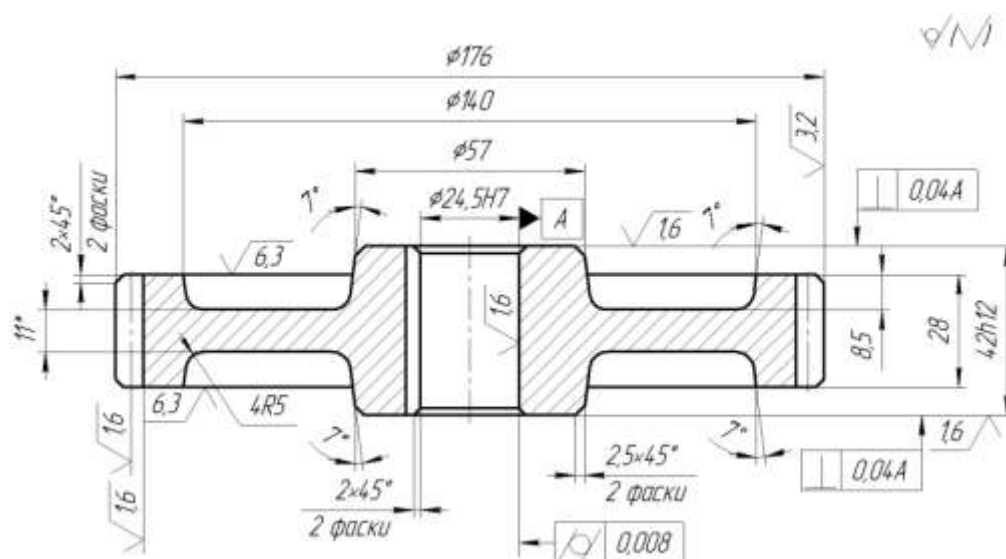


Рисунок 5.1 – Чертеж шестерни 12.37.118

Исходную заготовку, горячекатаный пруток диаметром 95 мм (ГОСТ 2590-88), при помощи пресс-ножниц ScPK 1800.1 усилием 7,5МН разрезают на мерные цилиндрические заготовки длиной 97 мм. Далее заготовки нагревают до температуры 1100–1150 °С в индукционном нагревателе ИК1 750/1. Штамповка шестерни осуществляется на кривошипном горячештамповочном прессе АК КБ 8544 усилием 25 МН за два перехода. Осадка заготовки в торец до высоты 61 мм производится в предварительном ручье штампа. Готовую поковку штампуют с образованием обля в окончательном открытом ручье.

Для последующей обрезки обля поковка по цепному транспортеру К04.074.8.2-51-001 передается на обрезной кривошипный пресс КБ9534 усилием 2,5МН. Готовые поковки складировуются в контейнер.

Чертеж готовой поковки шестерни после обрезки обля приведен на рисунке 5.2.

Согласно технологическому процессу штамповки шестерни 12.37.118 масса заготовки составляет 5,4 кг, масса поковки – 4,75 кг, и масса обля – 0,65 кг.

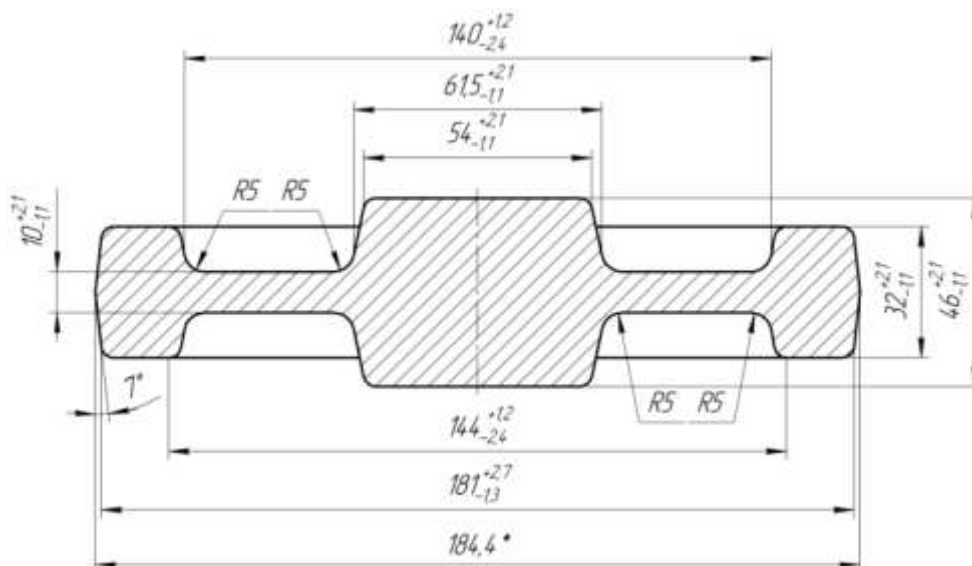


Рисунок 5.2 – Чертеж поковки шестерни 12.37.118

С целью снижения расхода металла и улучшения механических свойств готового изделия была предложена новая технология полугорячей штамповки шестерни 12.37.118 в закрытом штампе из шаровой заготовки диаметром 105 мм [348].

На первом этапе было проведено компьютерное моделирование процесса штамповки шестерни в программном комплексе Deform-3D. Условия моделирования:

- исходная заготовка – шаровая заготовка диаметром 105 мм из стали марки 18ХГТ. Механические свойства стали с учетом температуры, скорости деформации и степени деформации выбирали из базы данных:

- температура нагрева заготовки  $850^{\circ}\text{C}$ ;
- штамп изготовлен из штамповой стали 5ХНФ;
- температура штампа  $200^{\circ}\text{C}$ ;
- смазка графитовая, коэффициент трения 0,4;
- деформация заготовки производится на кривошипном прессе АККБ 8544 усилием 25 МН.

Результаты компьютерного моделирования штамповки шестерни из шаровой заготовки показали, что в процессе заполнения полости штампа

металлом зажимы и трещины не образуются. Штамп полностью заполняется металлом, незаполненные углы отсутствуют.

Высокие механические свойства изделия определяются мелкозернистой структурой поковки, которая зависит от температуры, скорости и величины деформации заготовки на последнем этапе штамповки. При постоянной температуре нагрева и постоянной скорости оборудования структура поковки определяется величиной интенсивности деформаций и неравномерности деформаций по сечению поковки.

По результатам компьютерного моделирования было исследовано распределение интенсивности деформаций по объему готовой поковки, рисунок 5.3.

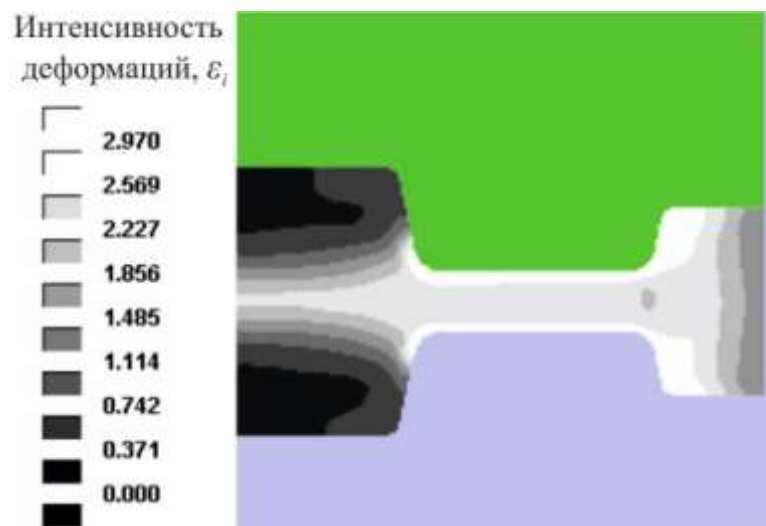


Рисунок 5.3 – Распределение величины интенсивности деформаций  $\epsilon_i$ , в готовой поковке шестерни 12.37.118

Для сравнительного анализа было проведено компьютерное моделирование облойной штамповки шестерни 12.37.118 из цилиндрической заготовки диаметром 95 мм, высотой 97 мм по заводской технологии, описанной ранее.

В таблице 5.2 приведены данные величины неравномерности деформаций, рассчитанные по уравнению (3.45) по результатам моделирования штамповки шестерни 12.37.118 из шаровой и цилиндрической заготовок.

Как видно из таблицы 5.2, при безоблойной штамповке шестерни из шаровой заготовки неравномерность деформаций во всех исследованных сечениях ниже, чем при облойной штамповке из цилиндрической заготовки.

Таблица 5.2 – Показатели неравномерности деформации при моделировании штамповки шестерни 12.37.118

| Неравномерность деформаций $Q$ по сечениям шестерни |                   |                                 |                 |
|---|-------------------|---------------------------------|-----------------|
| Способ штамповки                                    | По высоте ступицы | По горизонтальной оси симметрии | По высоте венца |
| Облойная из цилиндрической заготовки                | 2,2               | 3,28                            | 3,31            |
| Безоблойная из шаровой заготовки                    | 1,93              | 2,33                            | 2,33            |

На рисунке 5.4 представлен график изменения силы полугорячей штамповки шестерни 12.37.118 из шаровой заготовки диаметром 105 мм в закрытом штампе, полученный при компьютерном моделировании.



Рисунок 5.4 – График изменения силы полугорячей штамповки шестерни

Из графика видно, что максимальное значение силы – 10,87 МН, возникающее при штамповке шестерни ниже допустимого усилия прессы. Таким образом, на существующем заводском оборудовании возможно производство шестерни 12.37.118 с применением комплексной технологии полугорячей безоблойной штамповки.

На втором этапе были проведены промышленные эксперименты по производству полугорячей безоблойной штамповкой шестерни 12.37.118 из шаровой заготовки диаметром 105 мм.

В качестве исходной заготовки использованы шаровые заготовки, произведенные на АО «Гурьевский металлургический завод» по разработанной калибровке. Штамповка шестерни проводилась в условиях кузнечного цеха ОАО «Новокузнецкий вагоностроительный завод».

Шаровые заготовки нагревали до температуры 850 °С в индукционном нагревателе ИК1 750/1. Темп выдачи заготовок соответствует установленным технологическим процессам для цилиндрических заготовок. Контроль температуры нагрева поверхности шаровой заготовки осуществляли при помощи оптического пирометра ГОСТ 28243-96.

По направляющим трубкам индуктора шаровая заготовка перемещалась качением. Контроль температуры поверхности шара показал, что нагрев осуществляется равномерно. Снижение температуры нагрева заготовки перед штамповкой исключает возможность сваривания заготовок, а перемещение шаров качением при нагреве снижает износ направляющих трубок индуктора.

После нагрева шаровые заготовки устанавливали в штамп кривошипного горячештамповочного прессы АК КБ8544 и штамповали за один переход в чистовом ручье, без предварительной осадки.

Исключение операции осадки обусловлено формой исходной заготовки и снижением температуры нагрева заготовки перед штамповкой. В заводском технологическом процессе операция осадки применяется для сбива окалины с поверхности заготовки и выравнивания непараллельных торцов цилиндрической заготовки для последующей фиксации в чистовом ручье штампа. Согласно

проведенным в разделе 3 исследованиям по влиянию температуры нагрева на величину угара для стали 18ХГТ было выявлено, что при снижении температуры нагрева заготовки с 1100 °С до 850 °С угар металла уменьшился на 95 %, т. е. удаления окалины с поверхности заготовки не требуется. Изменение конструкции чистового ручья штампа путем формирования сферической полости в центральной части нижнего штампа позволяет центрировать шаровую заготовку в штампе.

На рисунке 5.5 показана последовательность операций изготовления шестерни 12.37.118 по заводской технологии (горячая штамповка в открытом штампе из цилиндрической заготовки) и по разработанной технологии полугорячей безоблойной штамповки из шаровой заготовки.

Как видно из рисунка 5.5, по заводской технологии отрезанная цилиндрическая заготовка после нагрева в индукторе осаживается, затем штампуется в чистовом ручье штампа, после чего происходит обрезка облоя.

По разработанной технологии при штамповке из шаровой заготовки количество операций уменьшается на два перехода, производительность прессы увеличивается. Отсутствие облоя на готовой поковке высвобождает одну единицу оборудования – пресс для обрезки облоя усилием 2,5 МН.

Расчеты показали, что при производстве шестерни 12.37.118 безоблойной штамповкой из шаровой заготовки экономия металла на одной поковке составляет 0,65 кг по сравнению с получением этой же поковки горячей объемной штамповкой с обломом. При объеме годового производства поковок 100 тыс. штук экономия металла составит 65 тонн. Снижение температуры нагрева исходной заготовки позволяет снизить расход электроэнергии на 22 %. Акт внедрения результатов исследования приведен в приложении Ж.

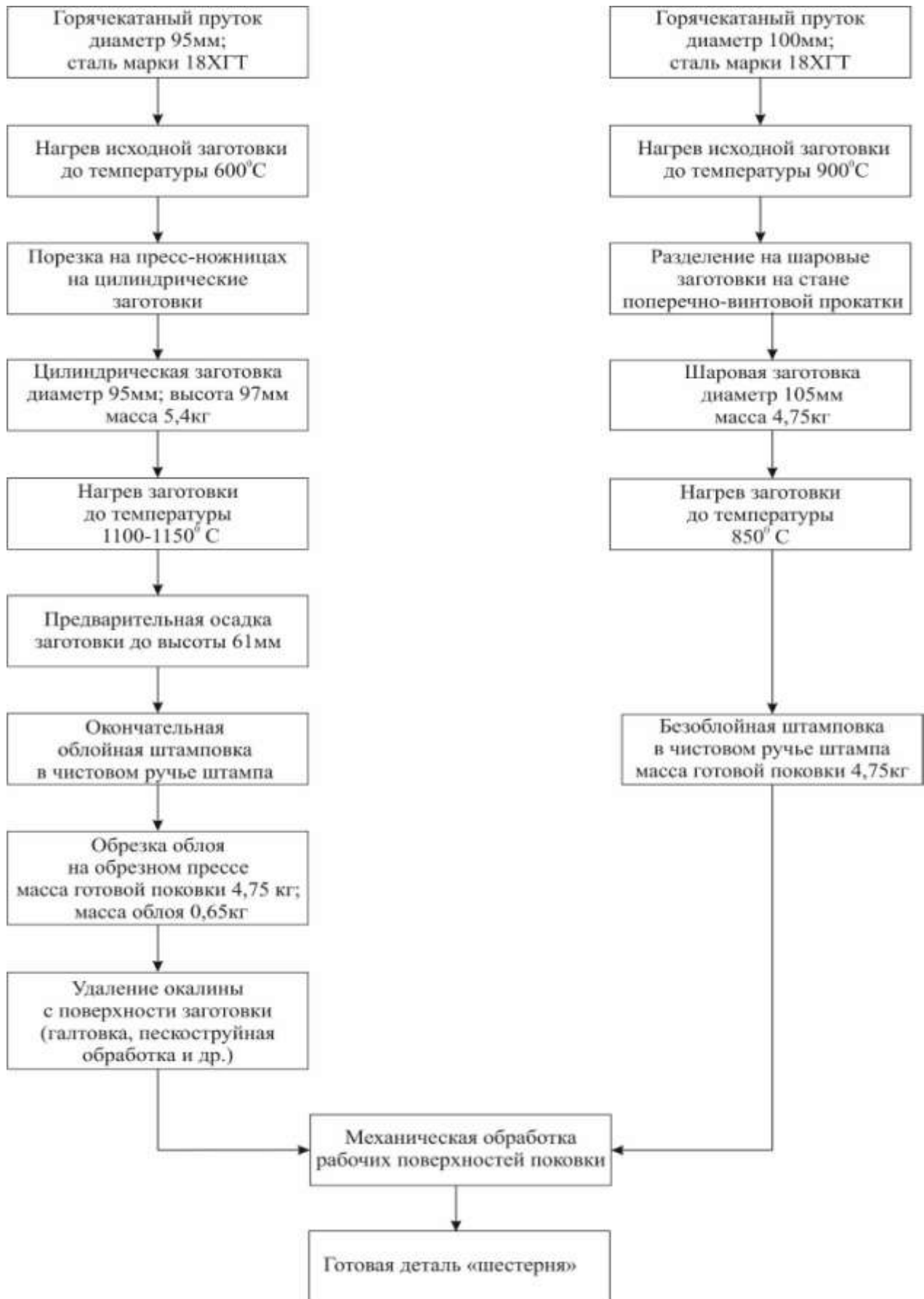
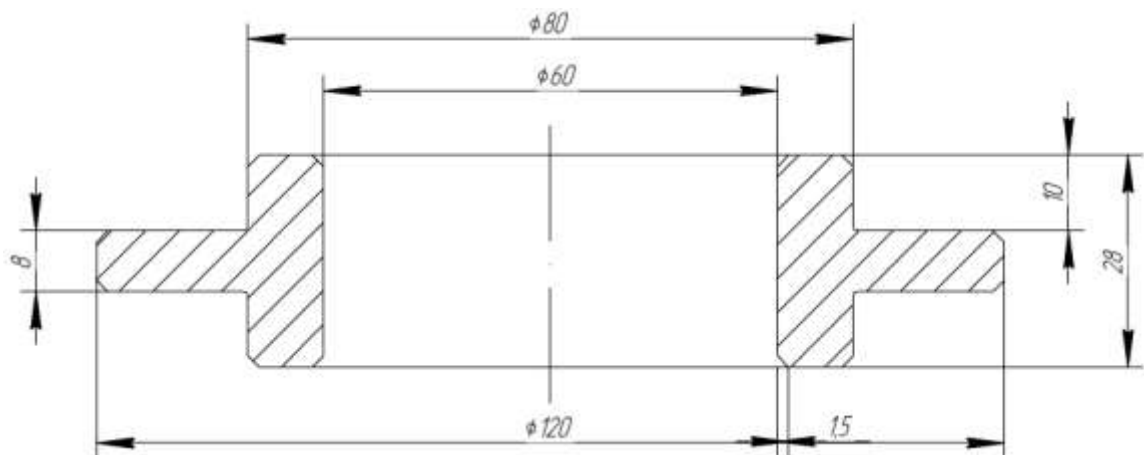


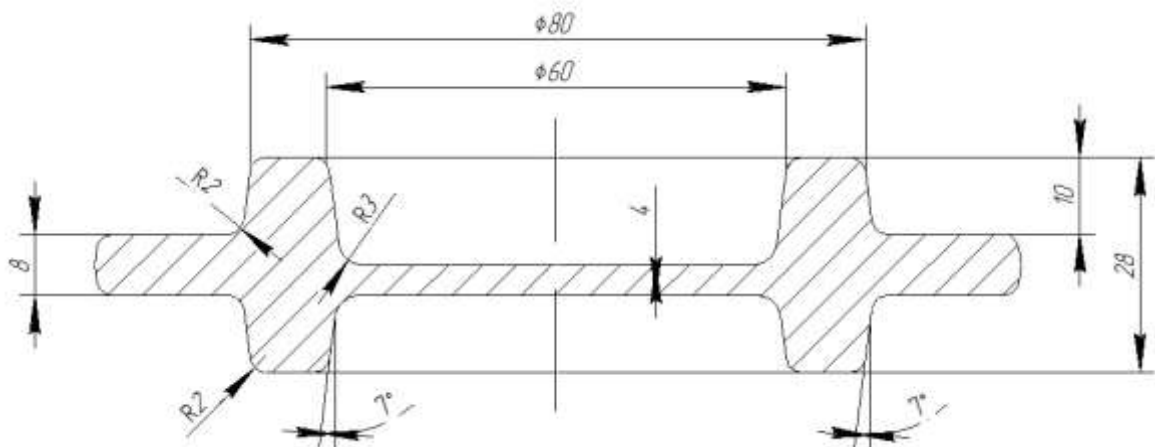
Рисунок 5.5 – Последовательность технологических операций производства шестерни 12.37.118

## 5.2 Применение комплексной технологии полугорячей безоблойной штамповки для производства шайбы упорной

Эскизы готовой детали и поковки «шайба упорная» приведены на рисунке 5.6.



а – готовая деталь



б – поковка

Рисунок 5.6 – Эскизы готовой детали и поковки «шайба упорная»

Согласно заводской технологии исходной заготовкой для штамповки шайбы упорной является цилиндрическая заготовка из стали марки 40Х диаметром 48 мм

высотой 90 мм, которую получают резкой на пресс-ножницах с предварительным нагревом прокатанной штанги до температуры 400–600 °С.

Порезанную цилиндрическую заготовку из бункера штамповочной линии подают по одной в индукционный нагреватель КИН 750/2,4. Температура нагрева заготовки составляет 1200 °С. Темп выдачи нагретых заготовок из индуктора – 16–18 с. Контроль температуры нагрева осуществляют оптическим пирометром.

Нагретую цилиндрическую заготовку для удаления окалины предварительно осаживают на плоских плитах до высоты 33 мм, затем штампуют в открытом штампе. После операции штамповки на отдельном обрезном прессе производится обрезка облоя и прошивка отверстия. Далее готовая поковка поступает в тару для охлаждения на воздухе.

Масса готовой поковки шайбы упорной – 980 г, масса облоя – 285 г, масса угара – 13 г и выдры – 100 г. Масса цилиндрической заготовки из стали марки 40Х диаметром 45 мм и высотой 90 мм составляет 1,27 кг.

Расчеты показали, что потери металла за счет обрезки облоя и удаления окалины составляют 21,6 %.

С целью снижения потери металла и улучшения качества поковок была предложена новая технология безоблойной полугорячей штамповки шайбы упорной из шаровой заготовки диаметром 62 мм.

Предварительно было проведено компьютерное моделирование штамповки шайбы упорной.

Условия моделирования:

– исходная заготовка – шаровая заготовка диаметром 62 мм из стали марки 40Х. Механические свойства стали с учетом температуры, скорости деформации и степени деформации выбирали из базы данных:

- температура нагрева заготовки 850 °С;
- штамп изготовлен из штамповой стали 5ХНФ;
- температура штампа 200 °С;
- смазка графитовая, коэффициент трения 0,4;

– деформация заготовки производится на кривошипном прессе, КБ 8542А усилием 16 МН.

По результатам компьютерного моделирования штамповки шайбы упорной из шаровой заготовки течение металла при заполнении штампа происходит без образования зажимов и трещин. Штамп полностью заполняется металлом, незаполненных углов не обнаружено.

Далее были проведены промышленные эксперименты по производству полугорячей безоблойной штамповкой шайбы упорной из шаровой заготовки диаметром 62 мм.

В качестве исходной заготовки использованы шаровые заготовки, произведенные на АО «Гурьевский металлургический завод» по разработанной калибровке. Штамповка поковки «шайба упорная» проводилась в кузнечном цехе завода ООО «Тонар-АГРО» г. Барнаула.

При проведении промышленного эксперимента полугорячей штамповки поковки «шайба упорная» было задействовано то же оборудование, что и при штамповке из цилиндрической заготовки.

При проведении промышленных экспериментов были поставлены следующие задачи:

- оценить возможности нагрева шаровых заготовок в серийных индукторах, предназначенных для нагрева цилиндрической заготовки;
- исследовать возможность получения готовой поковки шайбы упорной из шаровой заготовки за один штамповочный переход на существующем оборудовании;
- выработать рекомендации по внедрению технологии штамповки шайбы упорной из шаровой заготовки.

Шаровые заготовки диаметром 62 мм нагревали до температуры 850 °С в индукционном нагревателе КИН 750/2,4. Темп выдачи заготовок соответствует установленным технологическим процессам для цилиндрических заготовок.

Контроль температуры нагрева поверхности шаровой заготовки осуществляли при помощи оптического пирометра.

В процессе нагрева шаровая заготовка перемещалась качением по направляющим трубкам индуктора, застревания и сваривания заготовок не выявлено. Контроль температуры поверхности шара показал, что нагрев осуществляется равномерно.

Нагретые шаровые заготовки подавали на кривошипный горячештамповочный пресс АК КБ8544 и штамповали в одном чистовом ручье без предварительной осадки.

Процесс безоблойной штамповки шайбы упорной показал, что штамп заполняется металлом полностью, вытеснение металла в заусенец не происходит, зажимы разрушения и другие дефекты отсутствуют.

На рисунке 5.7 показана последовательность операций изготовления поковки шайбы упорной по заводской технологии (горячая штамповка в открытом штампе из цилиндрической заготовки) и по разработанной технологии, основанной на комплексной технологии полугорячей безоблойной штамповки из шаровой заготовки.

Как видно из рисунка 5.7, согласно новой технологии производства шайбы упорной количество штамповочных операций сокращается на два перехода. Пресс для обрезки облоя не задействован.

Расчеты показали, что при производстве шайбы упорной безоблойной штамповкой из шаровой заготовки экономия металла на одной поковке составляет 0,3 кг по сравнению с получением этой же поковки облойной штамповкой. Акт внедрения результатов исследования приведен в приложении 3.

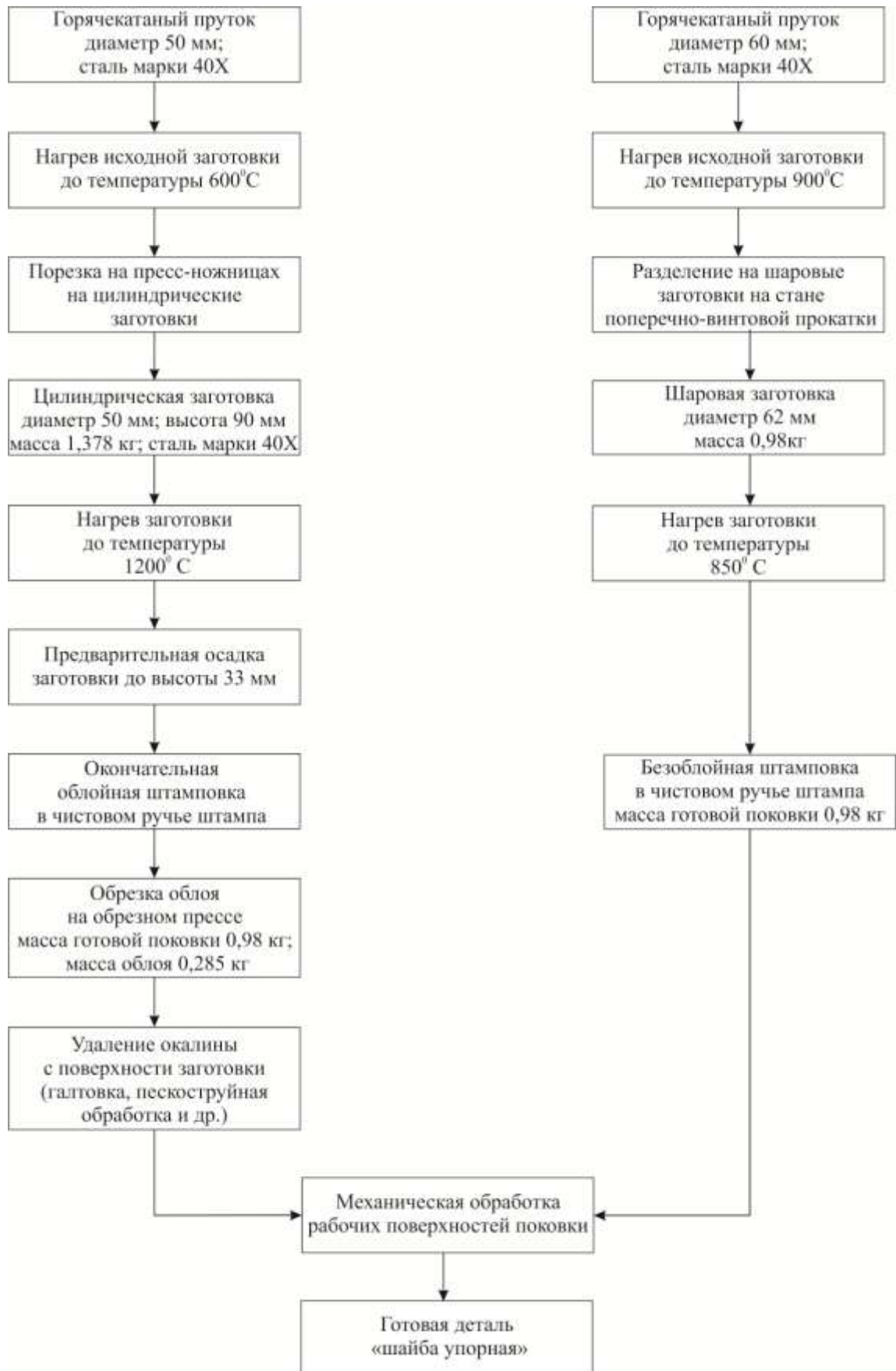


Рисунок 5.7 – Последовательность технологических операций производства шайбы упорной

### 5.3 Применение комплексной технологии полугорячей безоблойной штамповки для производства фланца

Поковка «фланец» является серийной продукцией кузнечных цехов. Чертеж поковки фланца приведен на рисунке 5.8.

Исходной заготовкой при производстве фланца в условиях кузнечного цеха является цилиндрическая заготовка из стали марки 40 диаметром 50 мм, высотой 70 мм. Резку горячекатанного прутка диаметром 50 мм (ГОСТ2590-2006) на мерные заготовки осуществляют на пресс-ножницах в холодном состоянии.

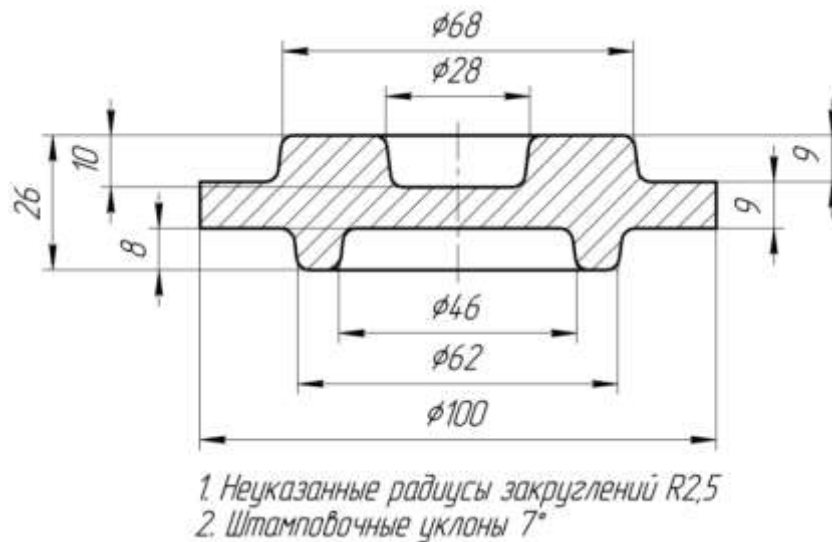


Рисунок 5.8 – Чертеж поковки «фланец»

Цилиндрические заготовки из бункера штамповочной линии подают по одной в индукционный нагреватель КИН 750/2,4. Температуры нагрева заготовки составляет 1150–1200 °С. Темп выдачи нагретых заготовок из индуктора 12–14 с. Контроль температуры нагрева поверхности заготовок осуществляют оптическим пирометром.

Штамповка фланца осуществляется на кривошипном горячештамповочном прессе усилием 6,3 МН за два перехода: в предварительном ручье штампа производится осадка заготовки в торец до высоты 35 мм, в чистовом ручье

штампа происходит окончательное формирование поковки, при этом излишек металла вытесняется в облойную канавку. Удаление облоя производят на отдельном обрезном прессе. После обрезки облоя готовая поковка поступает в тару для охлаждения на воздухе [349].

Масса готовой поковки фланца – 890 г, масса облоя – 233 г, масса угара – 13 г. Масса цилиндрической заготовки из стали 40 диаметром 48 мм и высотой 80 мм составляет 1136 г.

Таким образом, потери металла при штамповке только одной поковки составляют до 246 г, или 21,7 % от массы поковки. К недостаткам существующей технологии можно отнести большое количество окалины при нагреве заготовки, трудности центрирования осаженной заготовки в окончательном ручье и значительные потери металла с облоем [349].

Применение технологии полугорячей безоблойной штамповки фланца из шаровой заготовки диаметром 60 мм взамен существующей позволило повысить коэффициент использования металла и улучшить качество готовой поковки за счет более равномерного распределения интенсивности деформаций по объему поковки.

На первом этапе было проведено компьютерное моделирование полугорячей штамповки фланца из шаровой заготовки за один переход с использованием пакета программ QForm.

Результаты компьютерного моделирования приведены в разделе 2.

Далее проводили промышленные эксперименты по производству полугорячей безоблойной штамповкой фланца из шаровой заготовки диаметром 60 мм.

В качестве исходной заготовки использованы шаровые заготовки, произведенные на АО «Гурьевский металлургический завод» по разработанной калибровке. Штамповка поковки «шайба упорная» проводилась в кузнечном цехе завода ООО «Тонар-АГРО».

При проведении промышленного эксперимента полугорячей штамповки поковки «фланец» было задействовано то же оборудование, что и при штамповке из цилиндрической заготовки.

Шаровые заготовки диаметром 60 мм нагревали до температуры 850 °С в индукционном нагревателе КИН 750/2,4 Темп выдачи заготовок соответствует установленным технологическим процессам для цилиндрических заготовок. Контроль температуры нагрева поверхности шаровой заготовки осуществляли при помощи оптического пирометра.

В процессе нагрева шаровая заготовка перемещалась качением по направляющим трубкам индуктора, застревания и сваривания заготовок не выявлено. Контроль температуры поверхности шара показал, что нагрев осуществляется равномерно.

Нагретые шаровые заготовки подавали на кривошипный горячештамповочный пресс КБ8542А и штамповали в одном чистовом ручье без предварительной осадки.

На рисунке 5.9 показана последовательность операций изготовления поковки «фланец» по заводской технологии (горячая штамповка в открытом штампе из цилиндрической заготовки) и по разработанной технологии, основанной на комплексной технологии полугорячей безоблойной штамповки из шаровой заготовки.

Как видно из рисунка 5.9, согласно новой технологии производства фланца количество штамповочных операций сокращается на два перехода. Пресс для обрезки облоя не задействован.

Расчеты показали, что при производстве фланца безоблойной штамповкой из шаровой заготовки экономия металла на одной поковке составляет до 22 % по сравнению с получением этой же поковки облойной штамповкой. Акт внедрения результатов исследования приведен в приложении 3.

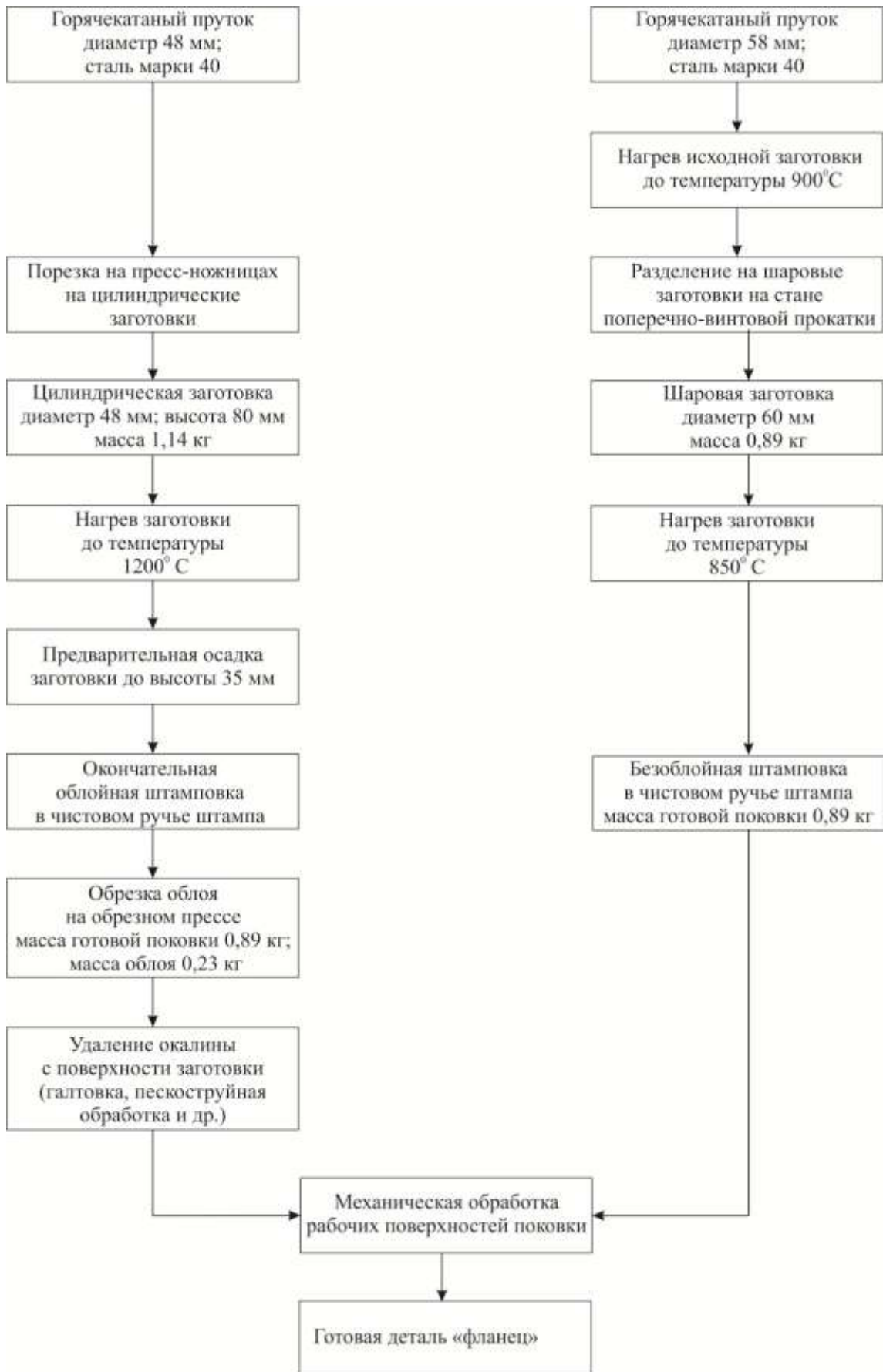


Рисунок 5.9 – Последовательность технологических операций производства фланца

#### 5.4 Разработка технологического процесса полугорячего выдавливания поковки «корпус распылителя»

На основании проведенных теоретических и лабораторных исследований прямого выдавливания разработан алгоритм выбора технологического процесса штамповки выдавливанием, рисунок 5.10 [316; 317]

Алгоритм состоит из блока ввода исходной информации, блоков расчета объема и массы заданной детали. Оператор условия характеризует возможности штамповки заготовки в холодном состоянии. Если твердость стали не превышает 170НВ, то рекомендуется использовать холодную штамповку выдавливанием для получения данной детали. В противном случае для снижения сопротивления металла деформации необходимо производить нагрев заготовки.

Второй условный оператор определяет возможность использования технологии штамповки с нагревом заготовки. Если при нагреве допускается возможность штамповки с поверхностным угаром  $U > 0,25 \text{ кг/м}^2$ , то следует применять технологию горячей штамповки. В противном случае необходимо снизить температуру нагрева, чтобы уменьшить величину поверхностного угара.

Технология полугорячей штамповки выдавливанием в закрытом штампе рекомендуется при величине поверхностного угара менее  $0,25 \text{ кг/м}^2$ .

Штамповку выдавливанием можно осуществить по разным технологиям, которые зависят от коэффициента использования металла (КИМ) при штамповке. Величину КИМ выбирает технолог в зависимости от имеющегося кузнечного и металлорежущего оборудования, способов нагрева и квалификации персонала.

При  $\text{КИМ} \leq 0,8$  рекомендуется применять технологию выдавливания в открытом штампе со свободным течением металла в стержневую часть детали. При КИМ больше 0,8 и меньше 0,95 рекомендуется технология штамповки с внешним кольцевым компенсатором, который удаляется в отдельном переходе или на металлорежущих станках. При  $\text{КИМ} > 0,95$  рекомендуется технология штамповки с внутренним компенсатором, где окончательные размеры детали получают на металлорежущих станках.

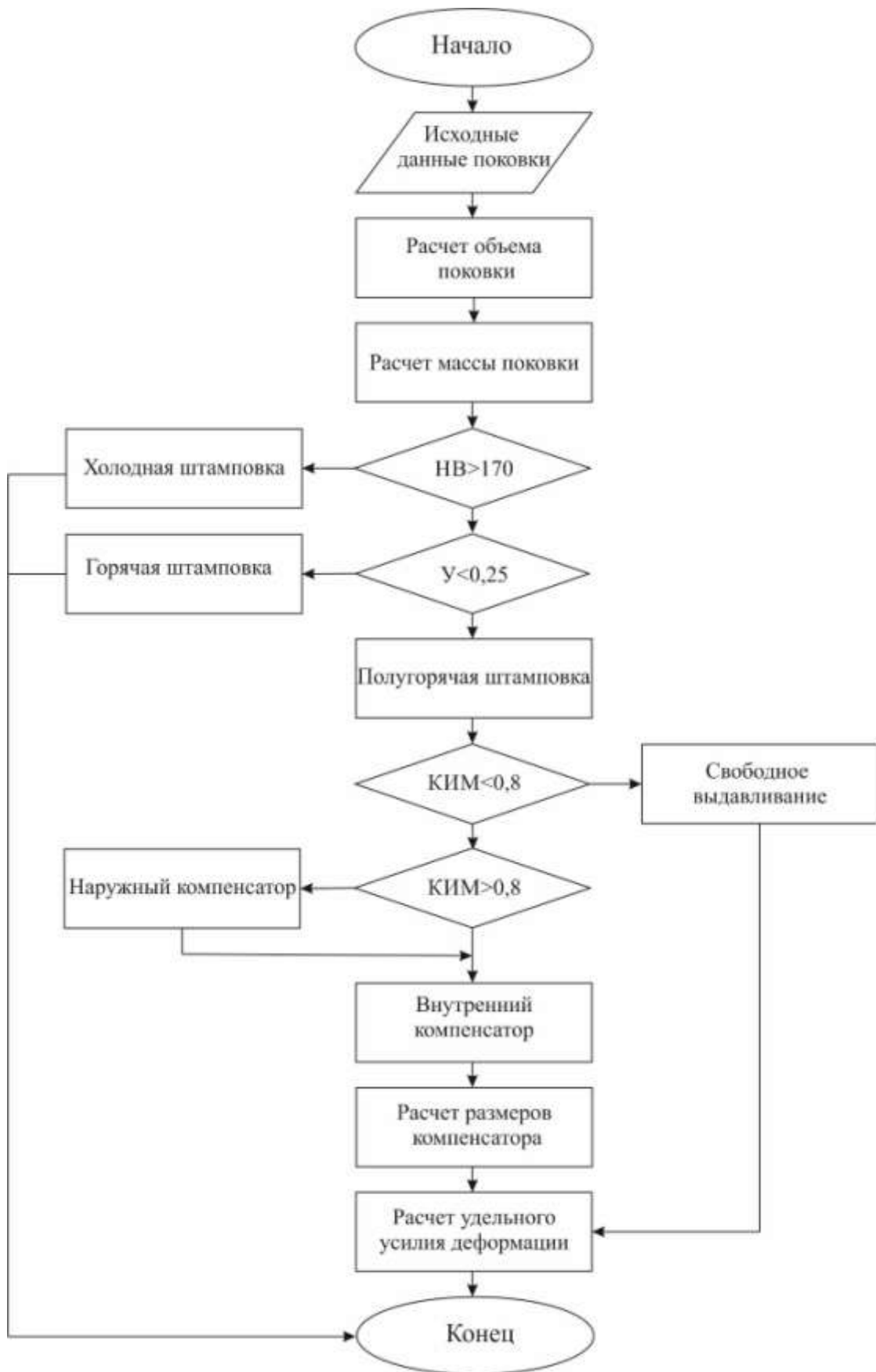


Рисунок 5.10 – Алгоритм выбора технологического процесса штамповки выдавливанием

Разработанные методы определения основных технологических параметров, а также определения оптимальной температуры нагрева были использованы для создания технологии изготовления детали «корпус распылителя» [187–189; 314–317].

Эскиз поковки детали «корпус распылителя» приведен на рисунке 5.11. Материал детали – сталь марки 18Х2Н4МА.

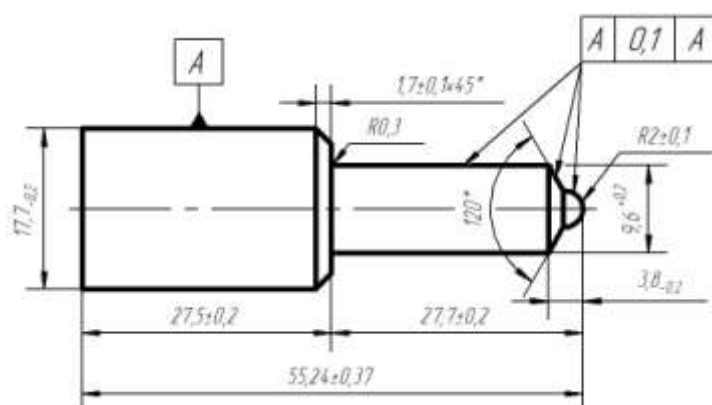


Рисунок 5.11 – Эскиз поковки «корпус распылителя»

Можно отметить, что наружный контур детали состоит из головки большего диаметра и стержня меньшего диаметра. В нижней части стержня формируется носик распылителя. Деталь является типовой для изготовления штамповкой выдавливанием.

Для выбора технологического процесса детали воспользуемся алгоритмом, рисунок 5.10. Сталь 18Х2Н4МА после отжига имеет твердость 200–240 НВ и не рекомендуется для холодной штамповки выдавливанием. Учитывая высокую точность изготовления заготовки после выдавливания, принимаем величину поверхностного угара  $У < 0,25 \text{ кг/м}^2$ .

Согласно алгоритму, такие условия обеспечивает полугорячая штамповка выдавливанием. Принимая во внимание высокие требования к точности изготовления детали, принимаем величину КИМ  $> 0,8$ .

Этим условиям соответствует точная полугорячая штамповка выдавливанием в закрытых штампах.

Таким образом, выбираем технологию точной полугорячей штамповки выдавливанием в закрытых штампах с нагревом металла токами высокой частоты.

Разработано два варианта технологического процесса – штамповка с внешним компенсатором и штамповка с внутренним компенсатором, рисунок 5.12.



Рисунок 5.12 – Последовательность технологических операций при штамповке детали «корпус распылителя»

При штамповке с внешним компенсатором заготовку диаметром 16,5 мм и длиной 38,5 мм из стали 18Х2Н4МА нагревают в индукторе токами высокой частоты (1000 Гц) до температуры 830 – 850 °С и штампуют за один переход на кривошипном прессе усилием 1600 кН. Избыток металла заполняет полость компенсатора и удаляется затем путем механической обработки резанием.

При штамповке с внутренним компенсатором заготовку размерами  $D \times H = 16,5 \times 38,5$  мм после нагрева в индукторе токами высокой частоты до температуры 830–850 °С штампуют за два перехода на кривошипном прессе усилием 1600 кН. На первом переходе происходит свободное выдавливание металла и оформление компенсационной полости. На втором переходе происходит заполнение носика распылителя и вытеснение избытков металла в полость компенсатора, которая уменьшает свои размеры. Дополнительная операция по удалению заусенца отсутствует, и деталь подвергается только операции шлифовки.

Для изготовления детали корпуса распылителя дизельной форсунки была спроектирована и запущена в работу технологическая линия штамповки выдавливанием, приведенная на рисунке 5.13 [350].

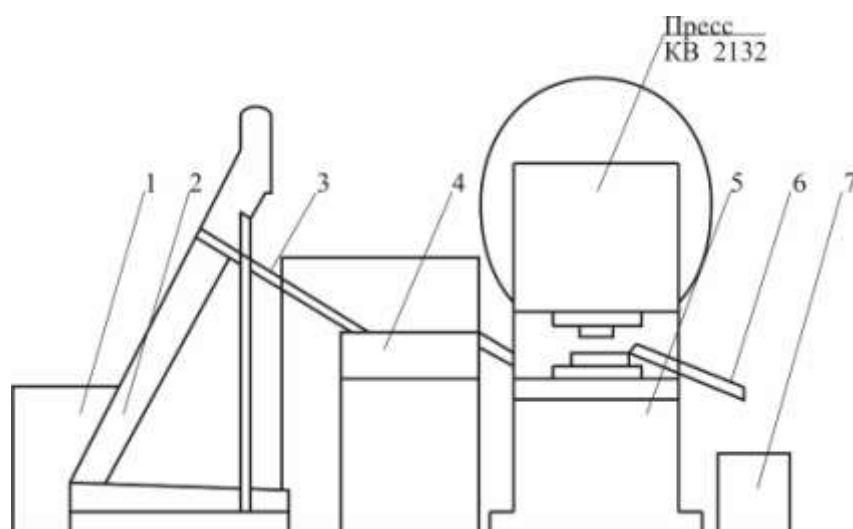


Рисунок 5.13 – Участок автоматической линии штамповки корпуса форсунки

Технологический процесс включает: прокатку на шаропркатном стане цилиндрической заготовки, нанесение графитовой смазки на заготовку, нагрев заготовки токами высокой частоты и выдавливание поковки в закрытом штампе за один переход.

Технологическая линия (автоматизированный комплекс) состоит из двух участков и работает следующим образом. На участке получения мерной заготовки связка прутков стали 18Х2Н4МА подается в накопитель автоматизированного стеллажа, откуда по наклонным склизам поштучно выдается на транспортирующие ролики. Пруток со стеллажа задается в проходной индукционный нагреватель, подогревается до температуры  $750^{\circ}\text{C}$  и задается в валки стана поперечно-винтовой прокатки. В прокатном стане происходит разделение прутка на мерные цилиндрические заготовки, которые после прокатки по лотку скатываются в отбраковыватель. В отбраковывателе удаляется концевая обрезь и возможные маломерные заготовки. Пройдя отбраковыватель, мерные заготовки по лотку поступают в тару для охлаждения.

Далее заготовка поступает в бункер-накопитель участка штамповки. В бункер-накопитель 1 подается графитовая смазка, которая равномерно распределяется по поверхности заготовок при их перемешивании в бункере. Траковым транспортером 2 смазанная заготовка переносится наверх, откуда она попадает в лоток 3, из которого поштучно задается в индукционный нагреватель блока ТВ4-11-4. Во время прохождения заготовки через индуктор управление процессом нагрева передается на устройство активного контроля температуры, которое поддерживает температуру нагрева в пределах  $850 \pm 10^{\circ}\text{C}$ . Нагретая заготовка выталкивается из индуктора и попадает в штамп кривошипного пресса 5. Для полугорячей штамповки выдавливанием в закрытом штампе используем пресс КВ2132 усилием 1600 кН.

После штамповки выдавливанием в закрытом штампе готовая деталь по наклонному лотку 6 поступает в тару 7. Твердость изделия после штамповки составляет 350–400 НВ и после отжига 200–240 НВ.

По расчетам Алтайского научно-исследовательского института технологии машиностроения (АНИТИМ), г. Барнаул, внедрение одного автоматизированного комплекса штамповки корпуса распылителя позволяет получить годовой экономический эффект 9,5 млн рублей, экономить 30 тонн стали 18Х2Н4МА, высвободить 13 единиц металлорежущего оборудования и перевести на другие работы 5 человек производственного персонала, приложение И.

### **Выводы по главе 5**

1. На основе проведенных исследований разработаны и внедрены в производство энерго- и ресурсосберегающие комплексные технологии полугорячей штамповки из заготовки, полученной разделением на стане поперечно-винтовой прокатки.

2. При разработке новых прогрессивных технологий, обеспечивающих экономию материальных и энергетических ресурсов, предложены новые инженерные решения, обеспечивающие снижение силы деформирования и получение поковок хорошего качества.

3. Применение предложенных новых способов и инструмента позволило повысить экономическую эффективность производства изделий за счет снижения температур нагрева заготовки перед штамповкой, уменьшения количества переходов штамповки, приближения формы готовой поковки к форме готового изделия, увеличения коэффициента использования металла и уменьшения последующей механической обработки резанием.

4. Внедрение результатов исследований на промышленных предприятиях позволило получить значительный экономический эффект.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Реализация комплексной технологии полугорячей безоблойной штамповки круглых в плане поковок точных по массе из шаровой заготовки на примерах штамповки шестерни, фланца, шайбы упорной и других поковок показала ее эффективность и перспективность. Возможность повышения энерго- и ресурсосбережения в процессах обработки металлов давлением за счет получения точной по массе заготовки, полугорячего малоокислительного нагрева и применения технологии безоблойной штамповки является мощным стимулом дальнейших исследований в этой области. Перспективным направлением является разработка полностью автоматизированного технологического комплекса полугорячей штамповки из шаровой заготовки, состоящего из нагревательной печи, стана поперечно-винтовой прокатки, индукционного нагревателя и горячештамповочного прессы. Шаровая форма позволяет заготовке перемещаться по наклонным желобам штамповочной линии, нагрев до температур полугорячей штамповки исключает сваривание заготовок при перемещении.

Основные выводы:

1. Разработаны и научно обоснованы концептуальные основы комплексной ресурсосберегающей технологии полугорячей безоблойной штамповки стальных изделий ответственного назначения, включающих: получение точных по массе заготовок путем разделения металла на станах поперечно-винтовой прокатки; нагрев заготовок до температур полугорячей штамповки; полугорячую безоблойную штамповку в закрытых штампах.

2. Разработана новая методика расчета калибровки валков стана поперечно-винтовой прокатки для разделения металла на геометрически точные шаровые заготовки для безоблойной штамповки в закрытых штампах. На основании разработанной методики рассчитаны новые дискретные однозаходные калибровки валков стана поперечно-винтовой прокатки с изменяющимся шагом подрезки реборды через каждые  $90^0$ . Исследование качества прокатанных стальных шаровых

заготовок показало, что шары имеют одинаковую плотность по диаметральному сечению. Пустоты и рыхлости в центральных слоях отсутствуют. Шаровые заготовки имеют стабильную массу для всех исследованных диаметров в интервале 50–120 мм. Отклонение массы шаров от номинала не превышает 2 %. По мере увеличения диаметра шара и износа валков отклонение массы шаров увеличиваются незначительно и не превышают 8 %.

3. Разработана методика и проведены комплексные экспериментальные исследования разделения прутка на шаровые заготовки номинальным диаметром 90 мм на промышленном стане поперечно-винтовой прокатки 40-80. В результате проведенных исследований энергосиловых параметров прокатки, расчета прочностных характеристик и использования разработанных технических решений расширен сортамент (до шаровых заготовок диам. 100 мм) и повышена производительность стана поперечно-винтовой прокатки 40-80 ЭЗТМ за счет прокатки тяжелого профиля.

4. Проведены комплексные экспериментальные исследования по определению сопротивления металла деформации, пластическим свойствам и угару в интервале температур 600–1000 °С полугорячей штамповки 10 марок углеродистой и легированной стали: ст3сп, 20, 20ХН, 40, 40Х, 40ХН, 65Г, 35ХГСА, 18ХГТ, 18Х2Н4МА. Впервые для определения оптимальной температуры нагрева заготовок для точной объемной штамповки поковок применена обобщенная функция желательности. В качестве откликов использованы: сопротивление металла деформации; пластические свойства металла, степень деформации сдвига до разрушения; поверхностный угар при нагреве. Установлено, что график обобщенной функции желательности описывается кривой с максимумом. Максимальное значение функции желательности соответствует оптимальной температуре нагрева металла для полугорячей штамповки. Определены оптимальные температуры 750–870 °С полугорячей штамповки в зависимости от марки стали ст3сп, 20, 20ХН, 40, 40Х, 40ХН, 65Г, 35ХГСА, 18ХГТ, 18Х2Н4МА.

5. С применением физического и математического моделирования проведены сравнительные экспериментальные исследования напряженного и

деформированного состояния, использования ресурса пластичности, энергосиловых условий деформации металла при штамповке поковок круглых в плане (шестерня и фланец) из шаровых и цилиндрических заготовок. Установлено, что при штамповке поковок круглых в плане (штампующихся в торец) полость штампа полностью заполняется металлом, поверхностных дефектов на готовой поковке не обнаружено. Напряженное состояние поковки можно характеризовать как объемное сжатие. Отмечено наличие растягивающих напряжений на свободной боковой поверхности поковки на промежуточных стадиях формоизменения. Однако максимальная степень использования ресурса пластичности для всех исследованных поковок не превышает 25 %. При штамповке из шаровой заготовки неравномерность деформации меньше на 15–29 %, и сила штамповки на 20–30 % ниже, чем при штамповке из цилиндрической заготовки. Общая энергоемкость штамповки снизилась на 10–30 %.

6. В результате физического и математического моделирования установлено, что при полугорячей штамповке поковок детали «корпус распылителя» прямым выдавливанием в закрытом штампе с увеличением коэффициента вытяжки от 2 до 4 относительная удельная сила увеличивается в 1,8–1,9 раза. С увеличением угла наклона матрицы от  $60^{\circ}$  до  $90^{\circ}$  относительная удельная сила возрастает на 4–6 %. С увеличением коэффициента трения возрастает величина относительной удельной силы, однако характер общей зависимости  $q = f(\lambda, \gamma)$  не изменяется. Исследования заполнения металлом торцевой части поковки стержня диаметром 9,6 мм с различной конфигурацией показали, что торцевая часть стержня поковки любой конфигурации (цилиндрическая, конусная, специальная форма) заполняется металлом. С использованием методики планирования эксперимента выполнены исследования формоизменения металла и изменения силы при полугорячем выдавливании металла в закрытом штампе. Установлена зависимость силы выдавливания от угла наклона матрицы, коэффициента трения и коэффициента вытяжки. Торцевая часть поковки может увеличивать силу выдавливания в 3,0 раза.

7. По результатам теоретических и промышленных исследований для производства шаровых заготовок повышенной точности по массе:

– на АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк по новой методике разработана и внедрена в производство калибровка валков и технология прокатки шаров диаметром 30–50 мм. За счет реализации новой продукции получен экономический эффект в размере 3 млн рублей;

– проведена реконструкция шаропрокатного стана 40–80 ОАО «Гурьевского металлургического завода», г. Гурьевск для прокатки шаровых заготовок диаметром 120 мм. Разработаны и внедрены: новая калибровка прокатных валков для проката шаров диаметром 120 мм; новая технология прокатки шаров большого диаметра повышенного качества. Совокупный экономический эффект за счет реализации нового вида продукции составляет 3 млн 64 тыс. рублей в год.

8. Базируясь на концепции комплексной технологии полугорячей безоблойной штамповки, разработаны энерго- и ресурсосберегающие технологии полугорячей штамповки поковок:

– для условий ОАО «Новокузнецкий вагоностроительный завод», г. Новокузнецк разработана и внедрена новая технология штамповки поковки «шестерня». Использование закрытого штампа и шаровой заготовки позволило сократить отходы металла. Годовая экономия от внедрения новой технологии составляет 65 т стали марки 18ХГТ, что в денежном выражении соответствует 2 млн 991,3 тыс. рублей;

– в условиях ООО «Тонар АГРО», г. Барнаул (Алтайский край) установлена оптимальная температура нагрева, спроектированы штампы, выполнено компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния полугорячей безоблойной штамповки поковок «фланец» и «шайба упорная» в закрытых штампах из шаровой заготовки. Снижение температуры нагрева заготовок и использование безоблойной штамповки позволило снизить расход металла на 21 %, расход электроэнергии на 23 %, и на 10 % увеличить

производительность труда. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения новой технологии – около 2 млн рублей;

– для условий ООО «ТехнОмаш», г. Барнаул (Алтайский край) разработана энерго- и ресурсосберегающая технология полугорячей точной штамповки корпуса распылителя для дизельных двигателей. Внедрение новой технологии штамповки поковки «корпус распылителя» позволило снизить расход металла и получить в условиях массового производства годовую экономию в размере 1 млн 458 тыс. рублей.

Совокупный годовой эффект внедрения проведенных исследований в производство составляет 13 млн 89,3 тыс. рублей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбин, Ю. И. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением / Ю. И. Рыбин, А. И. Рудской, А. М. Золотов. – Санкт-Петербург : Наука, 2004. – 644 с. – Текст : непосредственный.
2. Салиенко, А. Е. Новые компьютерные технологии в ковке и штамповке / А. Е. Салиенко, А. Н. Солдаткин, А. М. Рудис. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 2004. – № 4. – С. 37–40.
3. Грачев, К. Ф. Ковочное производство / К. Ф. Грачев. – Москва : ОНТИ, 1935. – 400 с. – Текст : непосредственный.
4. Неймайер, К. Ф. Холодная и горячая штамповка / К. Ф. Неймайер. – Москва : ОНТИ, 1936. – Т. 2. – 71 с. – Текст : непосредственный.
5. Порецкий, С. В. Курс кузнечного дела : в 3 т. / С. В. Порецкий. – Москва : ОНТИ, 1934. – Т. 3. – 214 с. – Текст : непосредственный.
6. Ребельский, А. В. Конструирование и расчет штампов для горячей штамповки / А. В. Ребельский, А. Н. Брюханов. – Москва : Машгиз, 1947. – Т. 1. Молотовые и обрезные штампы. – 556 с. – Текст : непосредственный.
7. Брюханов, А. Н. Горячая штамповка / А. Н. Брюханов, А. В. Ребельский. – Москва : Машгиз, 1952. – 666 с. – Текст : непосредственный.
8. Унксов, Е. П. Новое в технологии горячей штамповки / Е. П. Унксов. – Москва : Машгиз, 1948. – 223 с. – Текст : непосредственный.
9. Охрименко, Я. М. Технология горячей штамповки / Я. М. Охрименко. – Москва : Машгиз, 1949. – 283 с. – Текст : непосредственный.
10. Охрименко, Я. М. Основы технологии горячей штамповки / Я. М. Охрименко. – Москва : Машгиз, 1957. – 328 с. – Текст : непосредственный.

11. Губкин, С. И. Ковка и штамповка цветных металлов и их сплавов / С. И. Губкин. – Москва ; Ленинград : Металлургиздат, 1940. – 440 с. – Текст : непосредственный.

12. Ганаго, О. А. Безоблойная штамповка на молотах / О. А. Ганаго, И. Я. Тарновский. – Москва : Машгиз, 1955. – 87 с. – Текст : непосредственный.

13. Немзер, Г. Г. Тепловые процессы производства крупных поковок / Г. Г. Немзер. – Ленинград : Машиностроение, 1979. – 270 с. – Текст : непосредственный.

14. Тимошпольский, В. И. Теоретические основы тепловой обработки стали в трубoproкатном производстве / В. И. Тимошпольский, Ю. А. Самойлович. – Минск : Белорусская наука, 2005. – 303 с. – Текст : непосредственный.

15. Тимошпольский, В. И. Производство высокоуглеродистой катанки на металлургических агрегатах высшего технического уровня / В. И. Тимошпольский [и др.]. – Минск : Белорусская наука, 2004. – 238 с. – Текст : непосредственный.

16. Тимошпольский, В. И. Теплотехнология нагрева высокоуглеродистых марок стали в печах с механизированным подом РУП «БМЗ» / В. И. Тимошпольский [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Энергетика. – 2001. – № 5. – С. 71–81.

17. Тимошпольский, В. И. Некоторые закономерности повышения эффективности теплотехнологий металлургических агрегатов высшего технического уровня / В. И. Тимошпольский, И.А. Трусова, С.М. Козлов [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Энергетика. – 2001. – № 6. – С. 61–65.

18. Тимошпольский, В. И. Разработка концепции энергосберегающих совмещенных теплотехнологических процессов в металлургических теплотехнологиях / В. И. Тимошпольский [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Энергетика. – 2002. – № 1. – С. 54–61.

19. Самойлович, Ю. А. Теплотехнологические режимы при производстве импортозамещающей металлопродукции в условиях РУП «БМЗ» /

Ю. А. Самойлович, В. И. Тимошпольский, И.А. Трусова [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Энергетика. – 2002. – № 6. – С. 57–69.

20. Мансуров, А. М. Технология горячей штамповки / А. М. Мансуров. – Москва : Машгиз, 1960. – 324 с. – Текст : непосредственный.

21. Сосенушкин, Е. Н. Совершенствование технологической подготовки производства деталей холодной и полугорячей объемной штамповки / Е. Н. Сосенушкин. – Москва : Машиностроение, 1991. – 108 с. – Текст : непосредственный.

22. Володин, И. М. Моделирование процессов горячей объемной штамповки : монография / И. М. Володин. – Москва : Машиностроение, 2006. – 253 с. – Текст : непосредственный.

23. Соловцов, С. С. Безотходная резка сортового проката в штампах / С. С. Соловцов. – Москва : Машиностроение, 1985. – 175 с. – Текст : непосредственный.

24. Эдуардов, М. С. Штамповка в закрытых штампах / М. С. Эдуардов. – Ленинград : Машиностроение, 1971. – 240 с. – Текст : непосредственный.

25. Губинский, В. И. Применение низкотемпературного режима нагрева и прокатки при производстве катанки / В. И. Губинский [и др.]. – Текст : непосредственный // Сталь. – 1991. – № 3. – С. 49–51.

26. Горбанев, А. А. Технология производства катанки на стане 150 из заготовок с пониженными температурами нагрева / А. А. Горбанев [и др.]. – Текст : непосредственный // Сталь. – 1992. – № 5. – С. 52–54.

27. Осколков, А. И. Выбор температур высокоскоростного деформирования стали 18Х2Н4МА / А. И. Осколков [и др.]. – Текст : непосредственный // Пути повышения качества и надежности инструмента : тезисы докладов научно-технической конференции. – Рублевск : Гориздат, 1987. – С. 74–75.

28. Головин, В. А. Актуальные проблемы холодной и полугорячей объемной штамповки / В. А. Головин. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1985. – № 8. – С. 34–35.

29. Адамовский, А. Г. Графическое определение размеров заготовок для поковок / А. Г. Адамовский. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1972. – № 10. – С. 41.
30. Богомолов, В. В. Допуски на размеры поковок и методика определения размеров заготовки для безоблойной штамповки / В. В. Богомолов. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1963. – № 12. – С. 14–16.
31. Резников, Ю. Н. Расчет размеров заготовок в процессах объемной штамповки / Ю. Н. Резников. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1979. – № 2. – С. 14–16.
32. Резников, Ю. Н. Расчет формы и размеров заготовок в процессах объемной штамповки методом верхней оценки / Ю. Н. Резников. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Черная металлургия. – 1979. – № 2. – С. 64–70.
33. Резников, Ю. Н. Расчет и проектирование заготовок в процессах объемной штамповки с применением ЭВМ и чертежно-графического автомата / Ю. Н. Резников, Г. М. Курочкин. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1980. – № 1. – С. 14–16.
34. Решетов, В. М. Особенности безоблойной штамповки / В. М. Решетов, В. В. Богомолов. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1964. – № 12. – С. 41–43.
35. Круглова, Е. Д. О геометрической точности заготовок, отрезаемых от сортового проката в штампах с втулочными ножами / Е. Д. Круглова. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1973. – № 3. – С. 13–15.
36. Соловцов, С. С. Отрезка от сортового проката точных заготовок для объемной штамповки / С. С. Соловцов. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1972. – № 8. – С. 18–22
37. Соловцов, С. С. Факторы, влияющие на точность резки сортового проката в штампах / С. С. Соловцов. – Текст : непосредственный // Повышение

точности и автоматизация штамповки иковки : сборник статей / под ред. В. Т. Мещерина. – Москва : Машиностроение, 1971. – № 9. – С. 37–43.

38. Кутышкин, А. В. Исследование точности заготовок для горячей облойной штамповки / А. В. Кутышкин, В. Н. Токарев. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Черная металлургия. – 1997. – № 2. – С. 18–20.

39. Синицин, В. Т. Исследование величины колебания объема заготовки при штамповке / В. Т. Синицин. – Текст : непосредственный // Автомобильная промышленность. Экспресс-информация. – 1970. – № 9. – С. 7–10.

40. Коваленко, В. Д. Анализ схем холодной резки сортового проката сдвигом / В. Д. Коваленко. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1968. – № 5. – С. 18–21.

41. Покровский, В. Б. Получение плоского перпендикулярного торца при резке заготовок в полузакрытых штампах / В. Б. Покровский. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1972. – № 1. – С. 12–14.

42. Кислый, П. Е. Технологические параметры процесса точной резки прутков сдвигом с дифференцированным зажимом / П. Е. Кислый, С. В. Бондаренко. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1968. – № 3. – С. 16–19.

43. Кислый, П. Е. Расчет технологических параметров резки круглого проката и труб методом кручения / П. Е. Кислый. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1960. – № 8. – С. 9–14.

44. Мещерин, В. Т. Геометрическая точность заготовок при многоопорной отрезке в штампах / В. Т. Мещерин, В. А. Самсонов. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1978. – № 9. – С. 9–13.

45. Синицин, В. Т. Влияние скорости деформирования на геометрическую точность резки круглого сортового проката в штампе / В. Т. Синицин. – Текст : непосредственный // Повышение точности и автоматизация

штамповки иковки : сборник статей / под ред. В. Т. Мещерина. – Москва : Машиностроение, 1967. – № 8. – С. 51–59.

46. Мещерин, В. Т. Влияние высоких скоростей резки на качество заготовок, отрезаемых от сортового проката / В. Т. Мещерин, С. С. Соловцов, А. И. Тимонин. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1972. – № 8. – С. 22–25.

47. Мещерин, В. Т. Параметры точной резки сортового проката в штампах при высоких скоростях деформирования / В. Т. Мещерин, С. С. Соловцов, А. Н. Тимонин. – Текст : непосредственный // Автомобильная промышленность. – 1973. – № 7. – С. 27–30.

48. Соловцов, С. С. Положительное влияние высокой скорости на качество коротких заготовок, отрезаемых от прутка / С. С. Соловцов, А. И. Тимонин. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1977. – № 3. – С. 25–27.

49. Цеманн, Г. Н. Влияние температуры нагрева прутков на качество отрезка / Г. Н. Цеманн. – Текст : непосредственный // Повышение точности и автоматизация штамповки иковки : сборник статей. / под ред. В. Т. Мещерина. – Москва : Машиностроение, 1971. – № 9. – С. 33–43.

50. Дзидовски, С. Влияние низких температур на разрушение при резке стальных прутков / С. Дзидовски. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Машиностроение. – 1977. – № 12. – С. 126–130.

51. Thomas, A. Shearing of billets for drop forging / A. Thomas. – Text : direct // Metallurgy and Metal Forming. – 1974. – Vol. 41. – No. 7. – P. 198–204.

52. Masuda, M. Theoretical research en the blanking of sheet material / M. Masuda, T. Gimma. – Text : direct // Annals du college Internationale pour letude des techniques de production mecanique. – 1962. – Vol. 11. – No. 4. – P. 224–228.

53. Humel, P. Werkzeug und spannzeug heim hochgeschwindigkeitstrennen von rund-profilstangen / P. Humel, P. Strandell. – Text : direct // Maschinenwerk. – 1977. – Vol. 83. – No. 73. – S. 1357–1359.

54. Untersuchung der formabwendungen beim zerteilen mit hohen sehneidgeschwindigkeit / A. Neubauer [et al.] – Text : direct // Wiss. Z. Tech. Hochsch. O. Giirike. 1980. – Vol. 24. – No. 1. – S. 1–7.

55. Maiti, S. K. An investigation into the effect of axial forces on bar cropping based on a study of pre-cracking elastic stress distribution / S. K. Maiti. – Text : direct // J. of Mechanical Working Technology. – 1979 – Vol. 3. – No. 2. – P. 193–200.

56. Precision metal cropping under high axial load / J. I. Lattey [et al.]. – Text : direct // Machinery and Production Engineering. – 1971. – Vol. 118. – No. 3057. – P. 920–924.

57. Jepson, C. D. The metallurgical factors affecting the cold cropping of steel forging billet / C. D. Jepson, P. J. Appleton. – Text : direct // Steel Times. – 1980. – Vol. 208. – No. 7. – P. 490–498.

58. Пушкарев, В. Е. Устройство для дозирования по весу заготовок из сортового проката / В. Е. Пушкарев, А. Д. Мителев, Б. А. Ильенко. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1973. – № 3. – С. 15–17.

59. Целиков, А. И. Специальные прокатные станы / А. И. Целиков [и др.]. – Москва : Металлургия, 1971. – 336 с. – Текст : непосредственный

60. Целиков, А. И. Холодная прокатка шаров малого диаметра в винтовых калибрах / Н. А. Целиков [и др.]. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1983. – № 7. – С. 19–20.

61. Целиков, Н. А. Изготовление стальных шаров холодной прокаткой в винтовых калибрах / Н. А. Целиков, В. И. Котенок. – Текст : непосредственный // Вестник машиностроения. – 1984. – № 4. – С. 41–43.

62. Поперечная прокатка в машиностроении / под ред. А. И. Целикова, В. С. Смирнова. – Москва ; Ленинград : Машгиз, 1957. – 376 с. – Текст : непосредственный.

63. Александров, П. А. Прокатное производство : справочник / П. А. Александров [и др.] ; под ред. Е. С. Рокотяна. – Москва : Metallurgizdat, 1962. – Т. 2. – 684 с.

64. Грановский, С. П. Новые процессы и станы для прокатки изделий в винтовых калибрах / С. П. Грановский. – Москва : Металлургия, 1980. – 116 с. – Текст : непосредственный.

65. Шор, Э. Р. Новые процессы прокатки / Э. Р. Шор. – Москва : Metallurgizdat, 1960. – 386 с. – Текст : непосредственный.

66. Котенок, В. И. Аналитическое исследование процесса прокатки шаров в винтовых калибрах / В. И. Котенок. – Текст : непосредственный // Совершенствование технологии, конструкций и расчетов металлургических машин : сборник научных трудов ВНИИМЕТМАШ / под ред. Б. В. Попова, Л. В. Коновалова. – Москва, 1986. – С. 38–51.

67. Котенок, В. И. Энергоэкономные калибровки валков шаропрокатных станов / В. И. Котенок, С. И. Подобедов. – Текст : непосредственный // Металлург. – 2001. – № 9. – С. 45–47.

68. Котенок, В. И. Создание эффективных калибровок шаропрокатных валков и расширение сортамента шаров на действующих и новых станах / В. И. Котенок, С. И. Подобедов. – Текст : непосредственный // Труды 3 Конгресса прокатчиков, Липецк, 19-22 октября 1999 г. / Конгресс прокатчиков. – Москва : Черметинформация, 2000. – С. 438–441.

69. Балин, А. Ф. Поперечно-винтовая прокатка кузнечных заготовок / А. Ф. Балин – Москва : Машгиз, 1959. – 76 с. – Текст : непосредственный.

70. Мошаров, А. А. Применение поперечно-винтовой прокатки в кузнечно-штамповочном производстве / А. А. Мошаров. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1969. – № 12. – С. 38–39.

71. Целиков, А. И. Технология и станы для прокатки круглых периодических профилей / А. И. Целиков [и др.]. – Текст : непосредственный // Металлург. – 1970. – № 4. – С. 40–43.

72. Васильчиков, М. В. Новые процессы прокатки / М. В. Васильчиков [и др.]. – Текст : непосредственный // Сборник трудов ВНИИМЕТМАШ. – Москва, 1954. – № 12. – С. 151–194.

73. Филиппова, М. В. Малоотходная технология штамповки осесимметричных поковок из шаровых заготовок / М. В. Филиппова [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сборник научных трудов. — Новокузнецк : СибГИУ, 2010. – Вып. 25. – С. 83–86.

74. Перетяцько, В. Н. Штамповка осесимметричных поковок / В. Н. Перетяцько, А. В. Бахаев, М. В. Филиппова, С. А. Вахман. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Черная металлургия. – 2009. – № 4. – С. 21–22.

75. Peretyatko, V. N. Stamping axisymmetric forgings / V. N. Peretyatko, A. V. Bakhaev, M. V. Filippova, S. A. Vakhman. Text : direct // Steel in Translation. – 2009. – Vol. 39. – No. 4. – P. 300–301.

76. Филиппова, М. В. Безотходная штамповка шестерни / М. В. Филиппова [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сборник научных трудов. – Новокузнецк : СибГИУ, 2012. – Вып. 29. – С. 69–73.

77. Бахаев, А. В. Разработка ресурсосберегающей технологии штамповки поковок круглых в плане из шаровой заготовки : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.05 / Бахаев Андрей Владимирович ; науч. рук. В. Н. Перетяцько. – Новокузнецк, 2013. – 142 л. – Текст : непосредственный.

78. Павлов, В. И. Машиностроению – прогрессивную заготовительную базу / В. И. Павлов, О. В. Карасев. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1978. – № 4. – С. 3–6.

79. Egan, P. F. Transverse rolling solves many problems / P. F. Egan. Text : direct // Metal Forming. – 1967. – Vol. 34. – No. 4. – P. 99–105.

80. Поляков, Д.И. Развитие кузнечно-штамповочного производства / А. А. Мошаров. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1972. – № 8. – С. 1–2.

81. Федоров, А.А. Разработка ресурсосберегающей технологии безоблойной полугорячей штамповки поковок типа крестовин : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.05 / Федоров Александр Андреевич ; науч. рук. В. Н. Перетяцько. – Новокузнецк, 2012. – 150 с. – Текст : непосредственный.

82. Филиппова, М. В. Штамповка поковки «крестовина» из шаровой заготовки / М. В. Филиппова [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 8. – С. 24–27.

83. Филиппова, М. В. Выдавливание крестовины из шаровой заготовки / М. В. Филиппова [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сборник научных трудов. – Новокузнецк : СибГИУ, 2014. – Вып. 33. – С. 83–88.

84. Холодная объемная штамповка : справочник / под. ред. Г. А. Навроцкого. – Москва : Машиностроение, 1973. – 496 с. – Текст : непосредственный.

85. Брюханов, А. Н. Ковка и объемная штамповка / А. Н. Брюханов. – Москва : Машгиз, 1975. – 408 с. – Текст : непосредственный.

86. Темлянецв, М. В. Окисление и обезуглероживание стали в процессах нагрева под обработку металлов давлением : монография / М. В. Темлянецв, Ю. Е. Михайленко. – Москва : Теплотехник, 2006. – 200 с. – Текст : непосредственный.

87. Развитие теории и практики металлургических технологий : монография : в 3 т. / под ред. В. Н. Перетяцько, Е. В. Протопопова, И. Ф. Селянина ; В. Н. Перетяцько, М. В. Темлянецв, М. В. Филиппова. – Москва : Теплотехник, 2010. – Т. 2 : Пластичность и разрушение стали в процессах нагрева и обработки давлением. – 352 с. – Текст : непосредственный.

88. Курнаков, Н. С. Давление, истечение и твердость пластических тел / Н. С. Курнаков, С. Ф. Жемчужный. – Текст : непосредственный // ЖРМО. – 1913. – № 3. – С. 256–310.

89. Губкин, С. И. Пластическая деформация металлов. / С. И. Губкин. – Москва : Metallurgizdat, 1961. – 376 с. – Т. 1 : Физико-механические основы пластической деформации. – Текст : непосредственный.

90. Губкин, С. И. Пластическая деформация металлов. / С. И. Губкин. – Москва : Metallurgizdat, 1961. – Т. 2 : Физико-химическая теория пластичности. – 416 с. – Текст : непосредственный.

91. Губкин, С. И. Пластическая деформация металлов. / С. И. Губкин. – Москва : Metallurgizdat, 1961. – Т. 3 : Теория пластической обработки металлов – 306 с. – Текст : непосредственный.

92. Зайков, М. А. Режимы деформации и усилия при горячей прокатке / М. А. Зайков. – Свердловск : Metallurgizdat, 1960. – 302 с. – Текст : непосредственный.

93. Полухин, П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – Москва : Metallurgiya, 1983. – 353 с. – Текст : непосредственный.

94. Колмогоров, В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2001. – 836 с. – Текст : непосредственный.

95. Соколов, Л. Н. Сопротивление металлов пластической деформации / Л. Н. Соколов. – Москва : Metallurgizdat, 1963. – 284 с. – Текст : непосредственный.

96. Соколов, Л. Н. Об учете разупрочнения при выводе аналитических зависимостей для сопротивления деформации сталей / Л. Н. Соколов, Е. И. Ефимов. – Текст : непосредственный // Известия АН СССР. Металлы. – 1980. – № 1. – С. 163–166.

97. Соколов, Л. Н. Исследование упрочнения-разупрочнения специальных сталей на кулачковом пластометре / Л. Н. Соколов [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Черная металлургия. – 1984. – № 5. – С. 65–70.

98. Соколов, Л. Н. Зависимость  $\sigma$ - $\varepsilon$ - $t$  при горячей пластической деформации металлов / Л. Н. Соколов, В. К. Икорский. – Текст : непосредственный // Известия АН СССР. Металлы. – 1979. – № 2. – С. 115–117.

99. Полухин, П. И. Физические основы пластической деформации / П. И. Полухин, С. С. Горелик, В. К. Воронцов. – Москва : Metallurgiya, 1982. – 584 с. – Текст : непосредственный.

100. Целиков, А. И. Теория расчета усилий в прокатных станах / А. И. Целиков. – Москва : Metallurgizdat, 1962. – 494 с. – Текст : непосредственный.

101. Третьяков, А. В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением : справочник / А. В. Третьяков, В. И. Зюзин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Metallurgiya, 1973. – 224 с. – Текст : непосредственный.

102. Андреюк, Л. В., Сопротивление деформации сталей и сплавов / Л. В. Андреюк, Г. Г. Тюленев. – Текст : непосредственный // Теория и практика металлургии : труды НИИМ. – Челябинск : НИИМ, 1970. – № 11. – С. 101–123.

103. Шварцбарт, Я. С. Сопротивление деформации сталей и сплавов при непрерывной горячей прокатке / Я. С. Шварцбарт. – Текст : непосредственный // Известия АН СССР. Металлы. – 1980. – № 1. – С. 86–94.

104. Тарновский, И. Я. Механические свойства стали при горячей обработке давлением / И. Я. Тарновский [и др.]. – Свердловск : Metallurgizdat, 1960. – 264 с. – Текст : непосредственный.

105. Тарновский, И. Я. Сопротивление деформации и пластичность стали при высоких температурах / И. Я. Тарновский [и др.]. – Тбилиси : Сабчота Сакартвело, 1970. – 224 с. – Текст : непосредственный.

106. Богатов, А. А. Механические свойства и модели разрушения металлов / А. А. Богатов. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2002. – 329 с. – Текст : непосредственный.

107. Механические свойства сталей, деформированных в широком интервале температур / под ред. В. П. Северденко. – Минск : Наука и техника, 1974. – 49 с. – Текст : непосредственный.

108. Динник, А. А. Обработка металлов давлением / А. А. Динник. – Текст : непосредственный // Обработка металлов давлением : сборник научных трудов ДМИ. – Днепропетровск : ДМИ, 1960. – № 39. – С. 311–327.

109. Смирнов-Аляев, Г. А. Сопротивление металлов пластическому деформированию : монография / Г. А. Смирнов-Аляев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Машиностроение, 1978. – 368 с. – Текст : непосредственный.

110. Сопротивление деформации и пластичность металлов / В. С. Смирнов [и др.]. – Москва : Metallurgy, 1975. – 273 с. – Текст : непосредственный.

111. Суяров, Д. И. Упрочнение и разупрочнение металлов и сплавов при горячей пластической деформации : учебное пособие / Д. И. Суяров, Р. В. Лель, Ф. С. Гилевич. – Горький : Горьковский политехнический институт им. А. А. Жданова, 1975. – 75 с. – Текст : непосредственный.

112. Третьяков, А. В. Механические свойства сталей и сплавов при пластическом деформировании : справочник / А. В. Третьяков, Г. К. Трофимов, М. К. Гурьянова. – Москва : Машиностроение, 1971. – 63 с. – Текст : непосредственный.

113. Агеев, Н. П. Механические испытания металлов при высоких температурах и кратковременном нагружении / Н. П. Агеев, С. И. Каратушин. – Москва : Metallurgy, 1968. – 280 с. – Текст : непосредственный.

114. Осипов, В. Г. Испытание стали методом горячего скручивания / В. Г. Осипов. – Текст : непосредственный // Бюллетень ИННИ. – 1947. – 22 с.

115. Зуев, М. Н. Пластичность сталей при высоких температурах / М. Н. Зуев [и др.]. – Москва : Metallurgizdat, 1954. – 103 с. – Текст : непосредственный.

116. Мигачев, Б. А. Пластичность инструментальных сталей и сплавов / Б. А. Мигачев, А. И. Потапов. – Москва : Metallurgy, 1980. – 87 с. – Текст : непосредственный.

117. Калпин, Ю. Г. Сопротивление деформации и пластичность металлов при обработке металлов давлением : учебное пособие / Ю. Г. Калпин [и др.]. – Москва : МГТУ МАМИ, 2005. – 113 с. – Текст : непосредственный.

118. Хензель, А. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением : справочник ; пер. с нем. / А. Хензель, Т. Шпиттель. – Москва : Metallurgiya, 1982. – 360 с. – Текст : непосредственный.

119. Деформируемость металлов / [Труд коллектива исследователей, выполненный под руководством С. И. Губкина] ; АН БССР. – Москва : Metallurgizdat, 1953. – 200 с. – Текст : непосредственный.

120. Колмогоров, В. Л. Напряжения, деформация, разрушение / В. Л. Колмогоров. – Москва : Metallurgiya, 1970. – 230 с. – Текст : непосредственный.

121. Богатов, А. А. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением / А. А. Богатов, О. И. Мижирицкий, С. В. Смирнов. – Москва : Metallurgiya, 1984. – 144 с. – Текст : непосредственный.

122. Паршин, В. А. Деформируемость и качество / В. А. Паршин, Е. Г. Зудов, В. Л. Колмогоров. – Москва : Metallurgiya, 1979. – 192 с. – Текст : непосредственный.

123. Механика деформирования и разрушения : сборник научных трудов / под ред. А. А. Богатова. – Екатеринбург, УрО РАН, 2001. – 405 с. – Текст : непосредственный.

124. Колмогоров, В. Л. Пластичность и разрушение / В. Л. Колмогоров, А. А. Богатов, Б. А. Мигачев. – Москва : Metallurgiya, 1977. – 336 с. – Текст : непосредственный.

125. Огородников, В. А. Деформируемость и разрушения металлов при пластическом формоизменении / В. А. Огородников. – Киев : УМК ВО, 1989. – 152 с. – Текст : непосредственный.

126. Огородников, В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. – Киев : Вища школа, 1983. – 176 с. – Текст : непосредственный.

127. Зайков, М. А. Критерий пластичности при обработке металлов давлением / М. А. Зайков, В. Н. Перетятыко. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Черная металлургия. – 1959. – № 8. – С. 75–86.

128. Перетяtko, В. Н. Пластичность углеродистых сталей / В. Н. Перетяtko, М. А. Зайков. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Черная металлургия. – 1961. – № 6. – С. 67–74.

129. Перетяtko, В. Н. Пластичность хромистых сталей / В. Н. Перетяtko, М. А. Зайков. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Черная металлургия. – 1968. – № 2. – С. 52–54.

130. Вульф, В. В. Пластичность некоторых нержавеющей сталей / В. В. Вульф, М. А. Зайков, В. Н. Перетяtko. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Черная металлургия. – 1967. – № 11. – С. 110–114.

131. Перетяtko, В. Н. Пластичность стали при горячей деформации / В. Н. Перетяtko. – Текст : непосредственный // Обработка металлов давлением : межвузовский сборник. – Свердловск : Изд-во УПИ, 1982. С. 58–64.

132. Перетяtko, В. Н. Оценка повреждаемости при горячем кручении / В. Н. Перетяtko, С. А. Обищенко, Т. Н. Дадочкина. – Текст : непосредственный // Обработка металлов давлением : межвузовский сборник. – Свердловск : Изд-во УПИ, 1982. – С. 96–100.

133. Пуарье, Ж. П. Высокотемпературная пластичность кристаллических тел : пер. с франц. / Ж. П. Пуарье ; под ред. А. С. Кагана. – Москва : Металлургия, 1982. – 272 с. – Текст : непосредственный.

134. Хоникомб, Р. Пластическая деформация металлов ; пер. с англ. / Р. Хоникомб ; под ред. Б. Я. Любова. – Москва : Мир, 1972. – 408 с. – Текст : непосредственный.

135. Cockroft, M. G. Ductility and workability of metals. – Text : direct / M. G. Cockroft, D. J. Latham // Journal of the Institute of Metals. – 1968. – Vol. 96. – P. 33–39.

136. Brozzo, P. A new method for the production of formability in metal sheets / P. Brozzo, B. Deluca, R. Rendina. Text : direct // Steel Metal Forming and Formability; Proceedings of the 7th biennial Conference of the International Deep Drawing Research group, Amsterdam, Netherlands, 1972. – P. 9–13.

137. Степанский, Л. Г. Энергетический критерий разрушения металла при обработке давлением / Л. Г. Степанский. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1988. – № 9. – С. 1–5.

138. Бурлаков, И. А. Рациональное использование ресурса пластичности при холодной штамповке листовых заготовок на основе критериев Кокрофта и Колмогорова / И. А. Бурлаков [и др.]. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2016. – № 12. – С. 3–8.

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

140. Казанцев, Е. И. Энергосберегающая технология нагрева слитков / Е. И. Казанцев [и др.]. – Москва : Metallurgiya, 1992. – 176 с. – Текст : непосредственный.

141. Перетятыко, В. Н. Нагрев стальных слябов / В. Н. Перетятыко [и др.] ; под ред. В. Н. Перетятыко. – Москва : Теплотехник, 2008. – 178 с. – Текст : непосредственный.

142. Копытов, В. Ф. Безокислительный нагрев стали / В. Ф. Копытов. – Москва : Машгиз, 1947. – 144 с. – Текст : непосредственный.

143. Копытов, В. Ф. Нагрев стали в печах / В. Ф. Копытов. – Москва : Metallurgizdat, 1955. – 264 с. – Текст : непосредственный.

144. Францевич, И. Н. Высокотемпературное окисление металлов и сплавов / И. Н. Францевич, Р. Ф. Войтович, В. А. Лавренко. – Киев : Государственное издательство технической литературы УССР, 1963. – 323 с. – Текст : непосредственный.

145. Эстрин, Б. М. Производство и применение контролируемых атмосфер / Б. М. Эстрин. – Москва : Metallurgiya, 1973. – 392 с. – Текст : непосредственный.

146. Скворцов, А. А. Безокислительный и малоокислительный нагрев стали под обработку давлением / А. А. Скворцов, А. Д. Акименко, М. Я. Кузелев. – Москва : Машиностроение, 1968. – 270 с. – Текст : непосредственный.

147. Ващенко, А. И. Окисление и обезуглероживание стали / А. И. Ващенко [и др.]. – Москва: Металлургия, 1972. – 335 с. – Текст : непосредственный.

148. Северденко, В. П. Окалина при горячей обработке металлов давлением / В. П. Северденко, Е. М. Макушок, А. Н. Равин. – Москва : Металлургия, 1977. – 208 с. – Текст : непосредственный.

149. Леонидова, М. Н. Физико-химические основы взаимодействия металла с контролируемыми атмосферами / М. Н. Леонидова, Л. А. Шварцман, Л. А. Шульц. – Москва : Металлургия. 1980. – 263 с. – Текст : непосредственный.

150. Губинский, В. И. Уменьшение окалинообразования при производстве проката / В. И. Губинский, А. Н. Минаев, Ю. В. Гончаров. – Киев : Техніка, 1981. – 135 с. – Текст : непосредственный.

151. Шмыков, А. А. Термодинамика и кинетика процессов взаимодействия контролируемых атмосфер с поверхностью стали / А. А. Шмыков, А. А. Хорошайлов, Е. А. Гюлиханданов. – Москва : Металлургия, 1991. – 158 с. – Текст : непосредственный.

152. Эстрин, Б. М. Контролируемые атмосферы в производстве металлопродукции / Б. М. Эстрин, Ю. И. Шумянский. – Москва : Металлургия, 1991. – 303 с. – Текст : непосредственный.

153. Кубашевский, О. Окисление металлов и сплавов / О. Кубашевский, Б. Гопкинс. – Москва : Металлургия, 1965. – 428 с. – Текст : непосредственный.

154. Темлянцев, М. В. Исследование окисления низколегированных кремнемарганцовистых сталей при нагреве в печах сопротивления / М. В. Темлянцев [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Черная металлургия. – 2004. – № 4. – С. 47–49.

155. Темлянцев, М. В. Высокотемпературное окисление и обезуглероживание кремнистых пружинных сталей / М. В. Темлянцев, Н. В.

Темлянцев. – Текст : непосредственный // Заготовительные производства в машиностроении. – 2005. – № 3. – С. 50–52.

156. Темлянцев, М. В. Исследование процессов окисления и обезуглероживания стали при нагреве / М. В. Темлянцев. – Текст : непосредственный // Сталь. – 2007. – № 3. – С. 58–60.

157. Темлянцев, М. В. Исследование высокотемпературного окисления и обезуглероживания рельсовой стали марки Э78ХСФ / М. В. Темлянцев, О. Д. Олендаренко. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 6. – С. 60–61.

158. Штиллер, В. Уравнение Аррениуса и неравновесная кинетика / В. Штиллер. – Москва : Мир, 2000. – 179 с. – Текст : непосредственный.

159. Лялин, В. М. Определение температурных режимов заготовки при полугорячей штамповке в зависимости от требуемых механических свойств / В. М. Лялин, Р. В. Серегин, В. И. Петров. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Черная металлургия. – 2003. – № 1. – С. 25–28.

160. Ланской, Е. Н. Совершенствования процессов полугорячей объемной штамповки : обзор / Е. Н. Ланской, Б. М. Поздеев. – Москва : НИИМаш, 1983. – 56 с. – Текст : непосредственный.

161. Овчинников, А. Г. Состояние и тенденции развития низкотемпературной штамповки выдавливанием : обзор / А. Г. Овчинников, А. В. Хабаров, К. К. Волчанинов. – Москва : НИИМаш, 1984. – 71 с. – Текст : непосредственный.

162. Холодная и полугорячая штамповка на прессах. Методические рекомендации / Всесоюзный проектно-конструкторский институт сварочного производства ; [исполнитель Головин В. А. [и др.]]. – Москва : НИИМаш, 1981. – 73 с. – Текст : непосредственный.

163. Перетяцько, В. Н. Особенности теплового состояния шаровой и цилиндрической заготовок при нагреве под горячую объемную штамповку / В. Н. Перетяцько, М. В. Темлянцев, А. В. Бахаев. – Текст : непосредственный

// Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. – Новокузнецк : СибГИУ, 2010. – Вып. 12. – С. 132–140.

164. Перетяtko, В. Н. Исследование теплового состояния шаровой и цилиндрической заготовок при нагреве под горячую объемную штамповку / В. Н. Перетяtko, М. В. Темлянцев, А. В. Бахаев. – Текст : непосредственный // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сборник научных трудов. – Новокузнецк : СибГИУ, 2010. – Вып. 25. – С. 71–82.

165. Губинский, В. И. Теория пламенных печей / В. И. Губинский, Лу Джун-У. – Москва : Машиностроение, 1995. – 255 с. – Текст : непосредственный.

166. Новик, Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – Москва : Машиностроение, 1980. – 304 с. – Текст : непосредственный.

167. Кожевников, И. Ю. Планирование экспериментов при изучении влияния методов вторичного рафинирования и чистоты шихты на качество стали / И. Ю. Кожевников [и др.]. – Текст : непосредственный // Заводская лаборатория. – 1976. – Т. 42. – № 1. – С. 80–82.

168. Тарлинский, В. Д. Разработка высокопрочных сварочных электродов с применением математического метода / В. Д. Тарлинский [и др.]. – Текст : непосредственный // Сварочное производство. – 1973. – № 3. – С. 3–5.

169. Новик, Ф. С. Планирование промышленных экспериментов в литейном производстве / Ф. С. Новик [и др.]. – Текст : непосредственный // Литейное производство. – 1972. – № 5. – С. 5–7.

170. Ангервакс, А. И. Безоблойная штамповка / А. И. Ангервакс [и др.] ; под ред. И. Ф. Головнева. – Москва ; Ленинград : Машгиз, 1958. – 296 с. – Текст : непосредственный.

171. Журавлев, А. З. Экономия металла в кузнечном цехе (Из опыта работы завода «Ростсельмаш») / А. З. Журавлев. – Текст : непосредственный // Доклады на научно-технической конференции по кузнечно-штамповочному производству. – Ростов-на-Дону : НТО МАШПРОМ, 1964. – С. 27–29.

172. Маликов, А. Н. Справочник для работников кузнечно-прессовых цехов / А. Н. Маликов. – Москва : Московский рабочий, 1976. – 167 с. – Текст : непосредственный.

173. Журавлев, А. З. Основы теории штамповки в закрытых штампах / А. З. Журавлев. – Москва : Машиностроение, 1973. – 224 с. – Текст : непосредственный.

174. Апарович, С. А. Безоблойная штамповка на молотах и фрикционных прессах / С. А. Апарович, Р. Е. Гуревич. – Москва : МДНТП, 1957. – 22 с. – Текст : непосредственный.

175. Журавлев, А. З. Напряжения и удельные давления при затекании в угол закрытого штампа / А. З. Журавлев. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Черная металлургия. – 1965. – № 5. – С. 112.

176. Журавлев, А. З. Давление на стенку при штамповке в закрытом ручье с затеканием металла в углы / А. З. Журавлев. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1966. – № 8. – С. 1–5.

177. Губкин, С. И. Теория обработки металлов давлением / С. И. Губкин. – Москва : Металлургиздат, 1947. – 532 с. – Текст : непосредственный.

178. Альтман, М. З. Опыт внедрения безоблойной штамповки насадки из Бр. АЖМЦ 10-3-1,5 / М. З. Альтман. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1964. – № 7. – С. 7–10.

179. Волосов, Н. Н. Металлосберегающая технология штамповки поковок в открытых штампах / Н. Н. Волосов, В. Г. Шибakov, В. Д. Филатов. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1986. – № 11. – С. 13–14.

180. Кондратенко, В. Г. Влияние погрешности установки заготовки на работу деформирования при закрытой осадке / В. Г. Кондратенко, Т. А. Григорян. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – № 11. – С. 130–133.

181. Фельде, А. А. К выбору параметров закрытых ручьев / А. А. Фельде, Б. Г. Каплунов. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Черная металлургия. – 1986. – № 10. – С. 57–62.

182. Третьюхин, В. В. Закрытая штамповка поковок методом комбинированного выдавливания / В. В. Третьюхин. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 2008. – № 8. – С. 16–19.

183. Кривцов, В. С. Анализ предельного формоизменения металла в полости закрытого штампа / В. С. Кривцов [и др.]. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2007. – № 3. – С. 39–44.

184. Пат. 2119402 Российская федерация, МКИ В 21 J 13/02. Штамп для осадки / А. А. Ромашов [и др.]. – № 98101065/02 ; заявл. 30.01.98 ; опубл. 27.09.98, Бюл. № 27. – Текст : непосредственный.

185. Перетяцько, В. Н. Моделирование штамповки осесимметричных поковок / В. Н. Перетяцько, А. В. Бахаев, М. В. Филиппова. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 4. – С. 27–29.

186. Филиппова, М. В. Моделирование безоблойной штамповки / М. В. Филиппова, А. В. Бахаев, В. Н. Перетяцько. – Текст : непосредственный // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сборник научных трудов. – Новокузнецк : СибГИУ, 2011. – Вып. 27. – С. 137–142.

187. Филиппова, М. В. Удельное усилие затекания металла в компенсатор / М. В. Филиппова. – Текст : непосредственный // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сборник научных трудов. – Новокузнецк : СибГИУ, 2008. – Вып. 21. – С. 83–86.

188. Поксеваткин, М. И. Применение внутреннего компенсатора при горячей штамповке выдавливанием / М. И. Поксеваткин, М. В. Филиппова, В. Н. Перетяцько. – Текст : непосредственный // Вестник горно-металлургической

секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сборник научных трудов. – Новокузнецк : СибГИУ, 2005. – Вып. 14. – С. 118–122.

189. Перетяцько, В. Н. Расчет компенсатора при точной штамповке выдавливанием / В. Н. Перетяцько, М. В. Филиппова. – Текст : непосредственный // Металлургия: новые технологии, управление, инновации и качество : труды Всероссийской научно-практической конференции / Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : СибГИУ, 2007. – С. 146–150.

190. Jolgaф, M. Closed Die forging geometrical parameters optimization for Al-MMCb / M. Jolgaф [et al.]. – Text : direct // American Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2008. – No. 1. – P. 1–6.

191. Gupta, A. K. Closed die forging of powder performs / A. K. Gupta, A. K. Jha. – Text : direct // Journal of the Institution of Engineers PR. – 2005. – Vol. 85. – P. 52–59.

192. Mamalis, A. G. Finite-element simulation of axisymmetric preforms in precision forging at elevated temperatures / A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, A. K. Baldoukas. – Text : direct // Journal of Materials Processing Technology. – 1996. – Vol. 57. – No. 1–2. – P. 103–111.

193. Graf, G. Close-die flashless forging in automobile industry / G. Graf, J. Čermak. – Text : direct // Journal for Technology of Plasticity. – 2001. – Vol. 26. – No. 2. – P. 1–9.

194. Liu, F. Experimental study and numerical simulation of isothermal closed die forging for aluminum alloy rotor / F. Liu, D. Shan, Y. Lü. – Text : direct // Trans. Nonferrous Metals Soc. China. – 2005. – Vol. 15. – No. 2. – P. 136–141.

195. Ulik, A. Research of metal flow in closed die in precision forging / A. Ulik, L. Kravarik, L. Bernadic. – Text : direct // Slovak university of technology in Bratislava. – 2009. – No. 27. – P. 113–118.

196. Kapustova, M. Analysis of drop forging in closed die using computer simulation / M. Kapustova. – Text : direct // Slovak university of technology in Bratislava. – 2009. – No. 27. – P. 35–42.

197. Kapustova, M. Computer simulation of precision die forging / M. Kapustova, L. Kravarik, J. Bliznak. – Text : direct // Machine design. – 2011. – Vol. 3. – No. 2. – P. 143–146.
198. Haider, M. Preform design for near net shape close die gear forging using simulation technique / M. Haider, K. K. Pathak<sup>1</sup>, G. Agnihotri. – Text : direct // Archives of Applied Science Research. – 2010. – No. 2. – P. 317–324.
199. Skunca, M. Relations between numerical simulation and experiment in closed die forging of a gear / M. Skunca [et al.]. – Text : direct // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – Vol. 177. – P. 256–260.
200. Sedighi, M. Optimization of preform in close die forging by combination of neural network and genetic algorithm / M. Sedighi, M. Hadi, S. Kolahdouz. – Text : direct // World Applied Sciences Journal. – 2009. – Vol. 7. – No. 11. – P. 1464–1473.
201. Radev, R. H. Process planning support for intermediate steps design of axisymmetric hot close-die forging parts / R. H. Radev. – Text : direct // Proceedings of Intelligent Production Machines and Systems : 2nd I PROMS Virtual International Conference, 2006. – Vol. 6. – P. 413–418.
202. Schleider, M. W. Three-dimensional simulation of closed-die forging process using MSC/ DYNA / M. W. Schleider. – Text : direct // Mercer University Engineering Research Center, 1994. – P. 170.
203. Gohil, D. A modular approach for the estimation of forging load for the closed die forging process by computer simulation / D. Gohil, M. Maisuria. – Text : direct // International journal of mechanics. – 2008. – Vol. 2. – No. 4. – P. 111–118.
204. Gohil, D. Computer simulation technique for the closed die forging process : a modular approach / D. Gohil, M. Maisuria. – Text : direct // Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on system science and simulation in engineering, 2008. – P. 61–66.
205. Овчинников, А. Г. Основы теории штамповки выдавливания на прессах / А. Г. Овчинников. – Москва : Машиностроение, 1983. – 200 с. – Текст : непосредственный.

206. Головин, В. А. Технология холодной штамповки выдавливанием / В. А. Головин, А. Н. Митькин, А. Г. Резников. – Москва : Машиностроение, 1970. – 152 с. – Текст : непосредственный.

207. Артес, А. Э. Групповое производство деталей холодной объемной штамповкой / А. Э. Артес. – Москва : Машиностроение, 1991. – 190 с. – Текст : непосредственный.

208. Евстратов, В. А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов / В. А. Евстратов. – Харьков : Вища школа, 1987. – 143 с. – Текст : непосредственный.

209. Евстифеев, В. В. Классификация технологических процессов холодной объемной штамповки. Вопросы групповой технологии : учебное пособие для заочных курсов повышения квалификации ИТР / В. В. Евстифеев, А. Э. Артес. – Москва : Машиностроение, 1987. – 79 с. – Текст : непосредственный.

210. Мишунин, В. А. Теория и практика процесса холодного выдавливания / В. А. Мишунин. – Москва : Машиностроение, 1993. – 320 с. – Текст : непосредственный.

211. Pearson, C. E. The extrusion of metals / C. E. Pearson. – London : Chapman, 1953. – 205 p. – Text : direct.

212. Tresca, H. Sur l'écoulement des corps solides soumis a de fortes pressions / H. Tresca. – Text : direct // Paris Comp. Rend. Acad. Sci. – 1964. – Vol. 59. – No. 11. – P. 754.

213. Истомин, П. С. Прессование металлов / П. С. Истомин. – Москва : Metallurgizdat, 1944. – 344 с. – Текст : непосредственный.

214. Шофман, Л. А. Основы расчета процессов штамповки и прессования / Л. А. Шофман. – Москва : Машгиз, 1961. – 340 с. – Текст : непосредственный.

215. Перлин, И. Л. Теория прессования металлов / И. Л. Перлин, Л. Х. Рейтберг. – Москва : Metallurgiya, 1975. – 447 с. – Текст : непосредственный.

216. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением : учебник для вузов / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – Москва : Машиностроение, 1977. – 423 с. – Текст : непосредственный.
217. Хилл, Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл. – Москва : ГОСТЕХИЗДАТ, 1956. – 408 с. – Текст : непосредственный.
218. Прагер, В. Теория идеально пластических тел / В. Прагер, Ф. Г. Ходж ; пер. с англ. Н. А. Талицких, Н. А. Форсмон ; под ред. Г. С. Шапиро. – Москва : Изд-во иностр. лит., 1956. – 398 с. – Текст : непосредственный.
219. Соколовский, В. В. Теория пластичности / В. В. Соколовский. – Москва : Высшая школа, 1969. – 608 с. – Текст : непосредственный.
220. Шофман, Л. А. Элементы теории холодной штамповки / Л. А. Шофман. – Москва : Оборонгиз, 1952. – 335 с. – Текст : непосредственный.
221. Томленов, А. Д. Теория пластического деформирования металлов / А. Д. Томленов. – Москва : Metallurgy, 1972. – 408 с. – Текст : непосредственный.
222. Джонсон, В. Механика процесса выдавливания металлов / В. Джонсон, Х. Кудо. – Москва : Metallurgy, 1965. – 174 с. – Текст : непосредственный.
223. Томсен, Э. Механика пластических деформаций при обработке металлов / Э. Томсен, Ч. Янг, Ш. Кобояши. – Москва : Машиностроение, 1969. – 502 с. – Текст : непосредственный.
224. Алюшин, Ю. А. Определение верхней оценки удельного усилия при прессовании металлов / Ю. А. Алюшин. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1965. – № 1. – С. 10–13.
225. Рвачев, М. А. Анализ экспериментов по визиопластичности с помощью метода R-функций / М. А. Рвачев, В. Д. Покрас. – Текст : непосредственный // Деп. в УкрНИИТИ, 18.12.87, № 3194 Ук. – 22 с.
226. Березовский, В. Н. Деформированное состояние при осадке шара и цилиндра / В. Н. Березовский, В. Е. Логинов. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Черная металлургия. – 1984. – № 4. – С. 65–71.

227. Толчинский, М. С. Использование функции тока для экспериментального исследования стационарного пластического течения / М. С. Толчинский. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Машиностроение. – 1970. – № 9. – С. 154–159.

228. Алюшин, Ю. А. Исследование деформированного состояния при истечении металла в облой / Ю. А. Алюшин, Г. П. Жигулев. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Черная металлургия. – 1972. – № 10. – С. 24–26.

229. Kiuchi, V. Flow of solid metal during extrusion: three dimensional simulation by finite element method. 1. / V. Kiuchi, V. Mendoza, I. Vanadimoto. – Text : direct // Seisak Kenkun = Mon. f. Inst. Ind. Sci. / Univ. Tokyo. – 1994. – Vol. 46. – No. 12. – P. 651–654.

230. Kiuchi, M. Flow of solid metal during extrusion: three dimensional simulation by finite element method. 2. / M. Kiuchi, I. Vanadimoto, V. Mendoza. – Text : direct // Seisan Kenkyn = Mon. f. Inst. Ind.Sci / Univ.Tokyo. – 1995. – Vol. 47. – No. 10. – P. 506–509.

231. Мещерин, В. Т. Основные проблемы закрытой горячей объемной штамповки / В. Т. Мещерин. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1972. – № 3. – С. 6–10.

232. Норицин, И. А. Тенденция развития объемной штамповки в закрытых штампах / И. А. Норицин. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1972. – № 9. – С. 1–6.

233. Акаро, И. Л. Тенденции в развитии технологии и автоматизации кузнечно-штамповочного производства : обзор / И. Л. Акаро. – Москва : НИИмаш, 1981. – 81 с. – Текст : непосредственный.

234. Морозов, Е. М. Метод конечных элементов в механике разрушения / Е. М. Морозов, Г. П. Никишков. – Москва : Наука, 1980. – 256 с. – Текст : непосредственный.

235. Теория пластических деформаций металлов / Е. П. Унксов [и др.] ; под. ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. – Москва : Машиностроение, 1983. – 598 с. – Текст : непосредственный.
236. Тарновский, И. Я. Вариационные принципы механики в теории обработки металлов давлением / И. Я. Тарновский [и др.]. – Москва : Металлургиздат, 1963. – 54 с. – Текст : непосредственный.
237. Смирнов, В. К. Вариационные уравнения принципа возможного изменения деформированного состояния для задач с ранее неизвестными границами пластического очага деформации / В. К. Смирнов. – Текст : непосредственный // Труды Уральского политехнического института. Вып. 196. – Свердловск : УПИ, 1972. – С. 4–11.
238. Ильюшин, А. А. Механика сплошной среды / А. А. Ильюшин. – Москва : Изд-во МГУ, 1978. – 287 с. – Текст : непосредственный.
239. Друянов, Б. А. Теория технологической пластичности / Б. А. Друянов, Р. И. Непершин. – Москва : Машиностроение, 1990. – 271 с. – Текст : непосредственный.
240. Кузьменко, В. И. Решение на ЭВМ задач пластического деформирования : справочник / В. И. Кузьменко, В. Ф. Балакин. – Киев : Тэхника, 1990. – 136 с. – Текст : непосредственный.
241. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган ; пер. с англ. Б. И. Квасова. – Москва : Мир, 1986. – 318 с. – Текст : непосредственный.
242. Оден, Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред / Дж. Оден ; пер. с англ. А. М. Васильева. – Москва : Мир, 1976. – 464 с. – Текст : непосредственный.
243. Флетчер, К. Численные методы на основе метода Галеркина / К. Флетчер ; пер. с англ. Л. В. Соколовской. – Москва : Мир, 1988. – 352 с. – Текст : непосредственный.
244. Шайдуров, В. В. Многосеточные методы конечных элементов / В. В. Шайдуров. – Москва : Наука, 1989. – 288 с. – Текст : непосредственный.

245. Lee, C. H. New solutions to rigid plastic deformation problems using a matrix method / C. H. Lee, S. Kobayashi. – Text : direct // Journal of Engineering for Industry. – 1973. – Vol. 95. – No. 3. – P. 865–873.

246. Cornfield, G. C. Theoretical prediction of plastic flow in hot rolling including the effect of various temperature distribution / G. C. Cornfield, R. H. Johnson. – Text : direct // Iron Steel Institute. – 1973. – No. 211. – P. 567.

247. Zienkiewicz, O. C. Flow of plastic and visco-plastic solids with special reference to extrusion and forming processes / O. C. Zienkiewicz, P. N. Godbole. – Text : direct // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 1974. – No. 8. – P. 3–16.

248. Sebastian, M. A. A method of discretization and an approach to three-dimensional deformation analysis of extrusion by the finite element method / M. A. Sebastian, P. Rodriguez, A. M. Sanchez. – Text : direct // Numerical methods in industrial forming processes : proceedings of the international conference. – Swansea (UK), 1982. – P. 227–236.

249. Миленин, А. А. Разработка научных основ и развитие технологий трехмерного пластического формоизменения металлов с применением методов компьютерного моделирования : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Миленин Андрей Анатольевич. – Днепропетровск, 2001. – 36 с. – Текст : непосредственный.

250. Чесноков, В. С. Разработка и применение программного обеспечения для автоматизированного проектирования и моделирования процессовковки и горячей штамповки / В. С. Чесноков [и др.]. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2008. – № 9. – С. 36–44.

251. Жезезков, О. С. Теоретический анализ процесса горячей штамповки корпусов шаровых шарниров на основе компьютерного моделирования / О. С. Жезезков [и др.]. – Текст : непосредственный // Наука и производство : сборник докладов 60-й научно-технической конференции МГТУ–ММК по итогам

научно-исследовательских работ 2000–2001 гг. – Магнитогорск : Изд-во МГТУ, 2001. – С. 124–126.

252. Бильчук, М. В. Совершенствование технологии изготовления деталей арматуростроения / М. В. Бильчук. – Текст : электронный // Наука и образование : электронное научно-техническое издание. – 2008. – № 6. – URL: <http://old.technomag.edu.ru/doc/99358.html> (дата обращения: 15.08.2016).

253. Салиенко, А. Е. Виртуальное производство. MSC. Software–революция в промышленности / А. Е. Салиенко, А. Н. Солдаткин, А. М. Рудис. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 2002. – № 10. – С. 43–48.

254. Биба, Н. В. QForm – программа, созданная для технологов / Н. В. Биба, С. А. Стебунов. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 2004. – № 9. – С. 38–41.

255. Салиенко, А. Е. Новые компьютерные технологии в ковке и штамповке / А. Е. Салиенко, А. Н. Солдаткин, А. М. Рудис. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 2004. – № 4. – С. 36–39.

256. Программа MSC.SuperForge как один из элементов системы виртуального производства и управления качеством изделий / А. Н. Солдаткин [и др.]. – Текст : непосредственный // САПР и графика. – 2000. – № 7. – С. 24–25.

257. Чумаченко, Е. Н. Применение имитационной компьютерной модели течения металла для расчета параметров прессования / Е. Н. Чумаченко [и др.]. – Текст : непосредственный // Metallurg. – 1998. – № 10. – С. 31–33.

258. Slagter, W. Advances in three-dimensional forging process modelling / W. Slagter, C. Florie, A. Venis. – Text : direct // Proceedings of the 15th National Conference on Manufacturing Research. – England, 1999. – P. 73–78.

259. Ren, X. Study on the influence of deforming velocity on steel ball quality based on DEFORM /X. Ren, Y. Liu. – Text : direct // Appl. Mech. Mater. – 2012. – P. 117–119, 1806–1809.

260. Pater, Z. Thermomechanical analysis of a helical-wedge rolling process for producing balls / Z. Pater [et al.]. – Text : direct // Metals. – 2018. – Vol. 8. – No. 11. – P. 2–14.
261. Du, S. Analysis of factors influencing the skew rolling ball quality / S. Du, X. Ren, Y. Liu. – Text : direct // Materials. – 2013. – Vol. 12. – No. 9. – P. 248–250.
262. Pater, Z. Experimental and numerical analysis of helical-wedge rolling process for producing steel balls / Z. Pater, J. Tomczak, J. Bartnicki, M. R. Lovell, P. L. Menezes. – Text : direct // Int. J. Mach. Tool Manuf. – 2013. – Vol. 67. – P. 1–7.
263. Tomczak, J. Designing of screw impressions in helical rolling of balls / J. Tomczak, Z. Pater, T. Bulzak. – Text : direct // Arch. Civ. Mech. Eng. 2014. – Vol. 14. – P. 104–113.
264. Pater, Z. A thermomechanical analysis of the multi-wedge helical rolling (MWHR) process for producing balls / Z. Pater. – Text : direct // Metalurgija. – 2016. – Vol. 55. – P. 233–236.
265. Cao, Q. Finite element analysis of deformation characteristics in cold helical rolling of bearing steel-balls / Q. Cao, L. Hua, D. Qian. – Text : direct // J. Cent. South Univ. – 2015. – Vol. 22. – P. 1175–1183.
266. Рубцов, В. Ю. Моделирование прокатки мелющих шаров на валках с непрерывно изменяющимся шагом / О. В. Рубцов, В. В. Курочкин, О. И. Шевченко. – Текст : непосредственный // Черные металлы. – 2020. – № 6. – С. 36–40.
267. Рубцов, В. Ю. Критерии отделения перемычки при прокатке шаров / О. В. Рубцов, В. В. Курочкин, О. И. Шевченко. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2020. – Т. 11. – № 1. – С. 46–48.
268. Шварц, Д. Л. Компьютерное моделирование двухзаходной прокатки при производстве мелющих шаров диаметром 100 мм из легированных сталей / Д. Л. Шварц, А. А. Семенов, И. К. Галимьянов. – Текст : непосредственный // Metallurg. – 2022. – № 1. – С. 79–84.

269. Шварц, Д. Л. Компьютерное моделирование новой калибровки шаропрокатных валков двухзаходной прокатки мелющих шаров диаметром 100 мм из легированных сталей / Д. Л. Шварц, И. К. Галимьянов, А. А. Семенов. – Текст : непосредственный // *Металлург.* – 2022. – № 6. – С. 80–84.

270. Биба, Н. В. QForm – универсальная и эффективная программа для моделированияковки и штамповки / Н. В. Биба, С. А. Стебунов, Ю. А. Гладков, П. С. Мордвинцев. – Текст : непосредственный // *Кузнечно-штамповочное производство.* – 2011. – № 1. – С. 36–42.

271. Tomov, B. About the performing steps design for die forging using FEM simulation / B. Tomov, R. Radev, V. Gagov. – Text : direct // *Journal for Technology of Plasticity* – 1999. – No. 1–2. – P. 79–85.

272. Guoqun, Z. Sensitivity analysis based perform die shape design for net-shape forging / Z. Guoqun, E. Wright, V. G. Ramana. – Text : direct // *International Journal of Machine Tools and Manufacture.* – 1997. – Vol. 37. – P. 1251–1271.

273. Zhao, G. Preform design of a generic turbine disk forging process / G. Zhao [et al.]. – Text : direct // *Journal of Materials Processing Technology.* – 1998. – Vol. 84. – No. 1–3. – P. 193–201.

274. Vazquez, V. Die design for flashless forging of complex parts / V. Vazquez, T. Altan. – Text : direct // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2000. – Vol. 98. – No. 1. – P. 81–89.

275. Chitkara, N. R. Near-net shape forging of a crown gear : some experimental results and an analysis / N. R. Chitkara, Y. J. Kim. – Text : direct // *International Journal of Machine Tools & Manufacture.* – 2001. – Vol. 41. – No. 3. – P. 325–346.

276. Ou, H. An FE simulation and optimisation approach for forging of aeroengine components / H. Ou [et al.]. – Text : direct // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2004. – Vol. 151. – No. 1–3. – P. 208–216.

277. Domblesky, J. Welded preforms for forging / J. Domblesky [et al.]. – Text : direct // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2006. – Vol. 171. – No. 1. – P. 141–149.

278. Bramley, A. N. The use of forging simulation tools / A. N. Bramley, D. J. Mynors. – Text : direct // Materials and Design. – 2000. – Vol. 21. – No. 4. – P. 279–286.

279. Lu, B. 3D die shape optimization for net-shape forging of aerofoil blades / B. Lu [et al.] – Text : direct // Materials and Design. – 2009. – Vol. 30. – No. 7. – P. 2490–2500.

280. Lu, B. Die shape optimisation for net-shape accuracy in metal forming using direct search and localised response surface methods / B. Lu, H. Ou, H. Long. – Text : direct // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2011. – Vol. 44. – No. 4. – P. 529–545.

281. Ou, H. Finite element modelling and optimisation of net-shape metal forming processes with uncertainties / H. Ou [et al.]. – Text : direct // Computers & Structures. – 2012. – Vol. 90–91. – P. 13–27.

282. Zhao, X. Sensitivity analysis based multiple objective preform die shape optimal design in metal forging / X. Zhao [et al.]. – Text : direct // Journal of Materials Science and Technology. – 2006. – Vol. 22. – No. 2. – P. 273–278.

283. Badrinarayanan, S. A sensitivity analysis for the optimal design of metal forming process / S. Badrinarayanan, N. Zabarar. – Text : direct // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1996. – Vol. 129. – No. 4. – P. 319–348.

284. Fourment, L. Optimal design for non-steady-state metal forming processes / L. Fourment, J. L. Chenot. – Text : direct // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 1996. – Vol. 39. – P. 33–55.

285. Luo, R. A new approach to preform die shape design optimization micro genetic algorithm / R. Luo, H. Yao, Y. Peng. – Text : direct // China Mechanical Engineering. – 2001. – Vol. 12. – No. 2. – P. 202–204.

286. Букарев, И. М. Моделирование процесса объемной штамповки в DEFORM 3D и QFORM 3D / И. М. Букарев, Д. М. Бабин. – Текст : электронный // Наука и образование : научное издание / МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2008. – № 6. – URL: <http://old.technomag.edu.ru/doc/99449.html> (дата обращения: 15.08.2016).

287. Филиппова, М. В. Производство точных по массе шаровых заготовок на станах поперечно-винтовой прокатки / М. В. Филиппова, С. В. Сметанин. – Текст : непосредственный // Прокатное производство (приложение к журналу «Технология металлов»). – 2025. – № 22. – С. 32–40.

288. Филиппова, М. В. Осадка шаровой заготовки / М. В. Филиппова, А. А. Федоров, Г.С. Котлов. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Черная металлургия. – 2011. – № 6. – С. 55–56.

289. Филиппова, М. В. Применение шаровой заготовки для штамповки / М. В. Филиппова, А. В. Бахаев, А. А. Федоров. – Текст : непосредственный // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк : СибГИУ, 2009. – Вып. 13. – Ч. 3. – С. 113–115.

290. Филиппова, М. В. Шаровая заготовка для безоблойной штамповки / М. В. Филиппова, В. Н. Перетяцько, А. В. Климов. – Текст : непосредственный // Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением : мат. международ. науч.-техн. конф. – Санкт-Петербург : Балт. гос. техн. н-т., 2014. – С. 240–240.

291. Перетяцько, В. Н. Шаровая заготовка / В. Н. Перетяцько, М. В. Филиппова, А. С. Климов [и др.]. – Текст : непосредственный // Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. – № 3. – С. 17–19.

292. Филиппова, М. В. Комплекс полугорячей объемной штамповки / М. В. Филиппова, С. В. Сметанин, Е. Е. Прудкий ; науч. рук. В. Н. Перетяцько. – Текст : непосредственный // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк : СибГИУ, 2016. – Вып. 20. – Ч. 3. – С. 227–229.

293. Филиппова, М. В. Компьютерное моделирование прокатки шаров большого диаметра / М. В. Филиппова, С. В. Сметанин, В. Н. Перетяцько. – Текст : непосредственный // Бюллетень научно-технической и экономической информации. Черная металлургия. – 2016. – Вып. 9 (1401). – С. 75–78.

294. Филиппова, М. В. Математическое моделирование прокатки шаров / М. В. Филиппова [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Черная металлургия. – 2017. – № 7. – С. 516–521.

295. Filippova, M. V. Rolling of metal ball / M. V. Filippova, M. V. Temlyantsev, V. N. Peretyat'ko, E. E. Prudkii. – Text : direct // Steel in Translation. – 2017. – Vol. 47. – No. 7. – P. 435–439.

296. Филиппова, М. В. Компьютерное моделирование прокатки шаров в винтовых калибрах / М. В. Филиппова, С. В. Сметанин, В. Н. Перетятыко. – Текст : непосредственный // Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах : труды IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Новокузнецк : СибГИУ, 2016. – Ч. 1. – С. 290–294.

297. Филиппова, М. В. Усилия и напряжения при прокатке шара / М. В. Филиппова, В. Н. Перетятыко, С. В. Сметанин. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Черная металлургия. – 2016. – Т. 59. – № 8. – С. 587–588.

298. Перетятыко, В. Н. Выбор оптимальной температуры нагрева заготовки для полугорячей штамповки / В. Н. Перетятыко, М. В. Филиппова. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Черная металлургия. – 2006. – № 6. – С. 16–19.

299. Филиппова, М. В. Механические свойства и поверхностный угар стали 20Х при температурах полугорячей штамповки / М. В. Филиппова, А. А. Федоров, В. Н. Перетятыко. – Текст : непосредственный // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сборник научных трудов / Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : СибГИУ, 2011. – Вып. 28. – С. 61–66.

300. Темлянцев, М. В. Окисление углеродистых конструкционных сталей при нагреве в атмосфере воздуха под обработку давлением / М. В. Темлянцев [и др.]. – Текст : непосредственный // Заготовительные производства в машиностроении. – 2004. – № 5. – С. 44–46.

301. Малинин, Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. – Москва : Машиностроение, 1968. – 400 с. – Текст : непосредственный.

302. Филиппова, М. В. Кривые течения аустенитной стали 08X18H10T при горячей деформации / М. В. Филиппова, М. В. Темлянцев, В. Н. Перетяцько. – Текст : непосредственный // Проблемы черной металлургии и металловедения. – 2015. – № 4. – С. 104–109.

303. Филиппова, М. В. Разработка и внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий обработки металлов давлением : монография / М. В. Филиппова, В. Н. Перетяцько, М. В. Темлянцев. – Новосибирск : СО РАН, 2016. – 266 с. – Текст : непосредственный.

304. Harrington, E. C. Jr. The desirability function / E. C. Jr. Harrington. – Text : direct // Industrial Quality Control. – 1965. – Vol. 21. – No. 10. – P. 494–498.

305. Филиппова, М. В. Моделирование в QForm-3D штамповки шестерни из шаровой заготовки / М. В. Филиппова [и др.]. – Текст : непосредственный // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. – № 8. – С. 14–18.

306. Филиппова, М. В. Компьютерное моделирование операций штамповки / М. В. Филиппова [и др.]. – Текст : непосредственный // Инновационный конвент «Кузбасс: образование, наука, инновации» : материалы инновационного конвента. – Кемерово ; Новокузнецк, 2014. – С. 375–377.

307. Бахаев, А. В. Штамповка осесимметричных поковок / А. В. Бахаев, М. В. Филиппова, С. А. Вахман. – Текст : непосредственный // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк : СибГИУ, 2008. – Вып. 12. – Ч. 3. – С. 243–246.

308. Филиппова, М. В. Моделирование безоблойной штамповки из шаровой заготовки / М. В. Филиппова [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Черная металлургия. – 2011. – № 10. – С. 24–27.

309. Filippova, M. V. Flash-free stamping from a spherical blank / M. V. Filippova [et al.]. – Text : direct // Steel in Translation. – 2011. – Vol. 41. – No. 10. – P. 805–807.

310. Филиппова, М. В. Моделирование штамповки шестерни из точной цилиндрической заготовки / М. В. Филиппова. – Текст : непосредственный // Кузбасс: образование, наука, инновации : материалы инновационного конвента. – Кемерово ; Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2016. – С. 474–476.

311. Уральский, В. И. Деформация металлов жидкостью высокого давления / В. И. Уральский [и др.]. – Москва : Металлургия, 1976. – 423 с. – Текст : непосредственный.

312. Дель, Г. Д. Технологическая механика / Г. Д. Дель. – Москва : Машиностроение, 1978. – 174 с. – Текст : непосредственный.

313. Инженерная теория пластичности / под ред. В. И. Беляева. – Минск : Наука и техника, 1985. – 288 с. – Текст : непосредственный.

314. Филиппова, М. В. Полугорячая штамповка выдавливания в закрытых штампах / М. В. Филиппова, А. А. Федоров. – Текст : непосредственный // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк : СибГИУ, 2008. – Вып. 12. – Ч. 3. – С. 247–250.

315. Филиппова, М. В. Определение размеров заготовки при штамповке выдавливанием / М. В. Филиппова // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк : СибГИУ, 2007. – Вып. 11. – Ч. 3. – С. 159–160.

316. Филиппова, М. В. Штамповка выдавливанием / М. В. Филиппова [и др.]. – Текст : электронный // Будущее машиностроения России : вторая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов : электронный сборник трудов. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 1 электрон. опт. диск. – С. 64–65.

317. Филиппова, М. В. Выдавливание в закрытых штампах / М. В. Филиппова, В. Н. Перетятыко, А. С. Климов. – Текст : непосредственный //

Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сборник научных трудов / Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : СибГИУ, 2009. – Вып. 23. – С. 143–146.

318. Климов, А. С. Шаропрокатный стан / А. С. Климов, М. В. Филиппова, В. Н. Перетяцько. – Текст : непосредственный // Металлургия: технологии, управление, инновации, качество : труды Всероссийской научно-практической конференции / Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : СибГИУ, 2010. – С. 255–258.

319. Перетяцько, В. Н. Калибровка валков для прокатки шара / В. Н. Перетяцько, А. С. Климов, М. В. Филиппова. – Текст : непосредственный // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сборник научных трудов. – Новокузнецк : СибГИУ, 2012. – . Вып. 30. – С. 44–50.

320. Климов, А. С. Производство горячекатаных шаров / А. С. Климов, М. В. Филиппова. – Текст : непосредственный // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк : СибГИУ, 2010. – Вып. 14. – Ч. 3. – С. 88–92.

321. Филиппова, М. В. Производство горячекатаных шаров диаметром 93 мм / М. В. Филиппова. – Текст : непосредственный // Металлургия: технологии, управление, инновации, качество : труды Всероссийской научно-практической конференции / Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : СибГИУ, 2013. – С. 166–171.

322. Перетяцько, В. Н. Калибровка валков шаропрокатного стана. Сообщение 1 / В. Н. Перетяцько, А. С. Климов, М. В. Филиппова. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Черная металлургия. – 2013. – № 4. – С. 27–30.

323. Перетяцько, В. Н. Калибровка валков прокатного стана. Сообщение 2 / В. Н. Перетяцько, А. С. Климов, М. В. Филиппова. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Черная металлургия. – 2013. – № 6. – С. 16–20.

324. Peretyatko, V. N. Roller grooving in ball-rolling mills / V. N. Peretyatko, A. S. Klimov, M. V. Filippova. – Text : direct // Steel in Translation. – 2013. – Vol. 43. – No. 4. – P. 168–170.

325. Перетяцько, В. Н. Калибровка валков шаропрокатного стана / В. Н. Перетяцько, А. С. Климов, М. В. Филиппова, А. А. Федоров. – Текст : непосредственный // Металлургия : технологии, управление, инновации, качество : труды Всероссийской научно-практической конференции / Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : СибГИУ, 2010. – С. 258–266.

326. Филиппова, М. В. Усилия при прокатке шаров / М. В. Филиппова, В. Н. Перетяцько, А. С. Климов. – Текст : непосредственный // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сборник научных трудов / Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : СибГИУ, 2011. – Вып. 27. – С. 143–146.

327. Филиппова, М. В. Термически активированные процессы при горячей деформации стали 08X18H10T / М. В. Филиппова, М. В. Темлянцев, В. Н. Перетяцько. – Текст : непосредственный // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2015. – № 2 (12). – С. 33–37.

328. Сорокин, В. Г. Стали и сплавы. Марочник: справ. изд. / В. Г. Сорокин и др.; науч. ред. В. Г. Сорокин, М. А. Гервасьев. – Москва : Интермет Ижиниринг, 2003. – 608 с. – Текст : непосредственный.

329. Ростовцев, А. Н. Исследование пластичности углеродистых сталей в области температур горячей обработки давлением / А. Н. Ростовцев, В. Н. Перетяцько, В. М. Самойлов и др. – Текст : непосредственный // Физика твердого тела. – Кемерово, 1976. – Вып. 1. – С. 90–107.

330. Перетяцько, В. Н. Пластичность высокохромистых среднеуглеродистых нержавеющей сталей / В. Н. Перетяцько, М. В. Филиппова. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Черная металлургия. – 1999. – № 12. – С. 21–23.

331. Перетяцько, В. Н. Пластичность металла при горячей деформации / В. Н. Перетяцько. – Текст : непосредственный // Обработка металлов давлением : межвузовский сборник. – Свердловск : УПИ, 1982. – С. 58–64.

332. Дель, Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости / Г. Д. Дель. – Москва : Машиностроение, 1971. – 199 с. – Текст : непосредственный.

333. Унсков, Е. П. Теория пластических деформаций металлов / Е. П. Унсков, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров и др. – Москва : Машиностроение, 1983. – 600 с. – Текст : непосредственный.

334. Алтан, Г. Применение моделирующих материалов для определения усилия формообразования при обработке металлов давлением / Г. Алтан, Г. Хеннинг, А. Сэброф. – Текст : непосредственный // Конструирование и технология машиностроения : труды Американского общества инженеров-механиков : [журнал] ; пер с англ. – Москва, 1970. – № 2. – С. 185–192.

335. Филиппова, М. В. Удельное усилие при выдавливании / М. В. Филиппова, В. Н. Перетяцько, А. А. Федоров. – Текст : непосредственный // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сборник научных трудов. – Новокузнецк : СибГИУ, 2011. – Вып. 28. – С. 56–60.

336. Филиппова, М. В. Качество мелющих шаров / М. В. Филиппова, А. С. Климов, В. Н. Перетяцько. – Текст : непосредственный // Заготовительные производства в машиностроении. – 2015. – № 12. – С. 30–35.

337. Перетяцько, В. Н. Качество шаровой заготовки / В. Н. Перетяцько, М. В. Филиппова, А. А. Федоров, А. В. Бахаев. – Текст : непосредственный // Металлургия: новые технологии, управление, инновации и качество : труды Всероссийской научно-практической конференции / Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : СибГИУ, 2008. С. 66–68.

338. Степнов, М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний : справочник / М. Н. Степнов. – Москва : Машиностроение, 1985. – 231 с. – Текст : непосредственный.

339. Филиппова, М. В. Многокритериальная оптимизация температуры нагрева заготовок для точной штамповки / М. В. Филиппова, В. Н. Перетяцько. – Текст : непосредственный // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве : труды VI Всероссийской научно-практической конференции. – Новокузнецк : СибГИУ, 2007. – С. 391–393.

340. Филиппова, М. В. Моделирование технологии полугорячей штамповки / М. В. Филиппова, В. Н. Перетяцько. – Текст : непосредственный // Metallurgy: новые технологии, управление, инновации и качество : труды Всероссийской научно-практической конференции / Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк. : СибГИУ, 2006. – С. 98–101.

341. Филиппова, М. В. Аналитический расчет функции желательности при полугорячей штамповке стали 18Х2Н4МА / М. В. Филиппова. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Черная металлургия. – 2008. – № 4. – С. 67–68.

342. Филиппова, М. В. Разработка технологии полугорячей штамповки / М. В. Филиппова, В. Н. Перетяцько. – Текст : непосредственный // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сборник научных трудов. – Новокузнецк : СибГИУ, 2006. – Вып. 17. – С. 92–96.

343. Аверкиев, А. Ю. Ковка и штамповка : в 4-х т. Т. 1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка : справочник / А. Ю. Аверкиев [и др.] ; под ред. Е. И. Семенова. – Москва : Машиностроение, 1985. – 567 с. – Текст : непосредственный.

344. Перетяцько, В. Н. Выбор размеров заготовки при штамповке шара / В. Н. Перетяцько, А. В. Бахаев, С. А. Вахман, М. В. Филиппова. – Текст : непосредственный // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сборник научных трудов. – Новокузнецк : СибГИУ, 2007. – Вып. 18. – С. 64–68.

345. Перетяцько, В. Н. Моделирование процесса штамповки шара / В. Н. Перетяцько, А. В. Бахаев С. А. Вахман, М. В. Филиппова. – Текст :

непосредственный // Известия вузов. Черная металлургия. – 2008. – № 12. – С. 30–31.

346. Peretyatko, V. N. Simulation of ball stamping / V. N. Peretyatko, A. V. Bakhaev, S. A. Vakhman, M. V. Filippova. – Text : direct // Steel in Translation. – 2008. – Vol. 38. – No. 12. – P. 971–972.

347. Филиппова, М. В. Малоотходная технология штамповки осесимметричных поковок из шаровой заготовки / М. В. Филиппова [и др.]. – Текст : непосредственный // Высокие технологии, прикладные исследования, промышленность : сборник трудов международной конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». – Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического ун-та, 2009. – С. 160–161.

348. Филиппова, М. В. Полугорячая штамповка шестерни / М. В. Филиппова [и др.]. – Текст : непосредственный // Заготовительные производства в машиностроении. – 2017. – № 4. – С. 171–176.

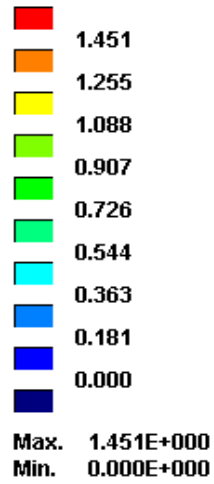
349. Филиппова, М. В. Моделирование штамповки детали «фланец» из шаровой заготовки / М. В. Филиппова [и др.]. – Текст : непосредственный // Инновационный конвент «Кузбасс: образование, наука, инновации» : материалы инновационного конвента. – Кемерово ; Новокузнецк, 2019. – С. 543–546.

350. Филиппова, М. В. Автоматизированный комплекс для полугорячей штамповки выдавливанием / М. В. Филиппова, В. Н. Перетяtko. – Текст : непосредственный // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сборник научных трудов. Вып. 22. – Новокузнецк : СибГИУ, 2008. – С. 85–88.

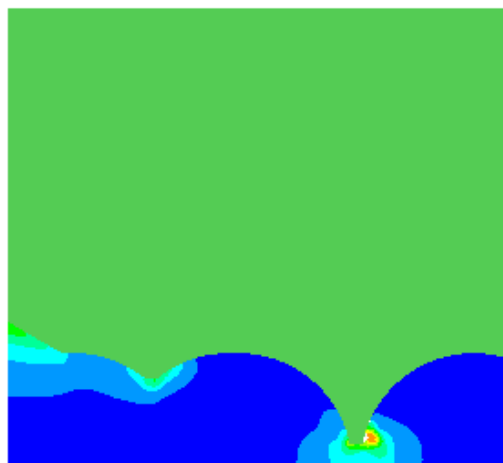
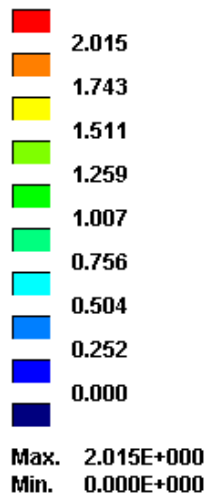
## Приложение А

## Напряженно-деформированное состояние металла при прокатке шаров

Effective Plastic Strain



Effective Plastic Strain



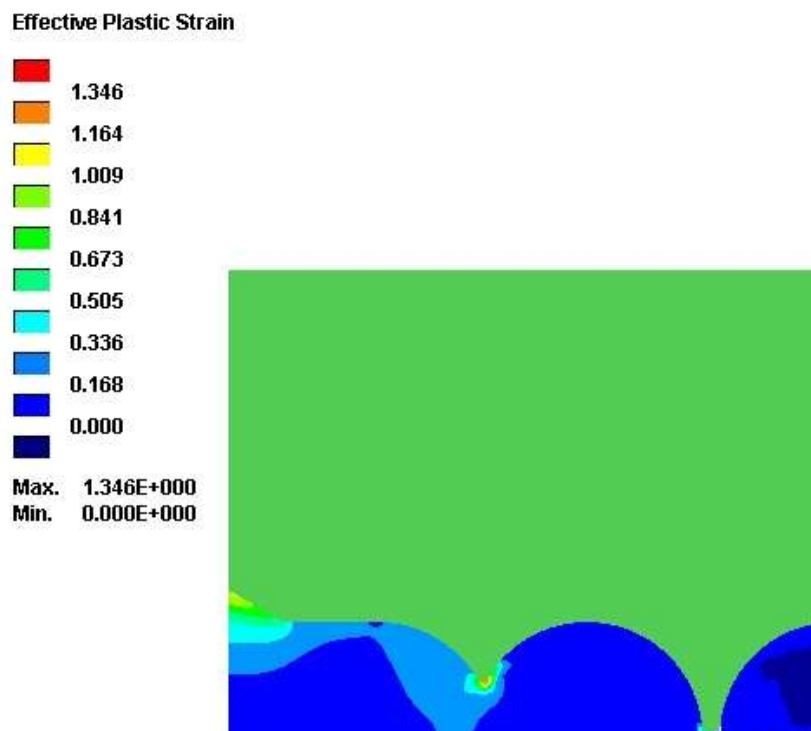
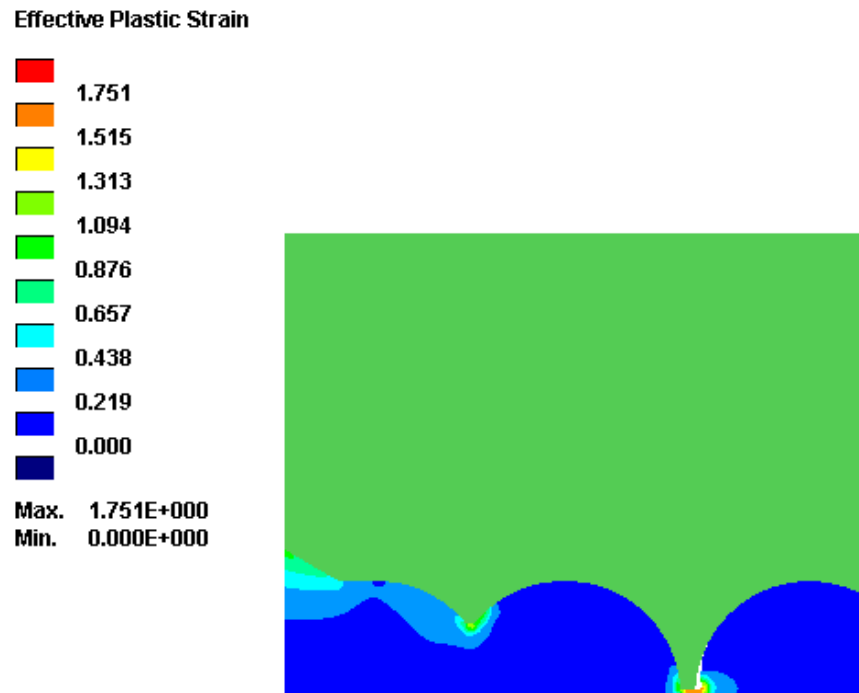
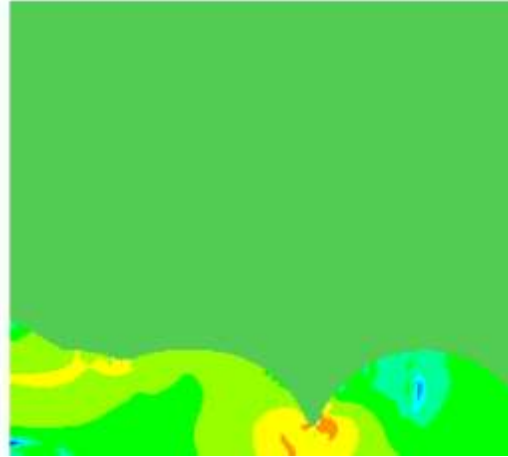
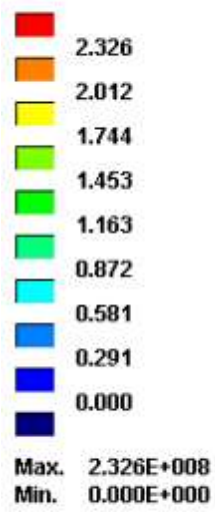
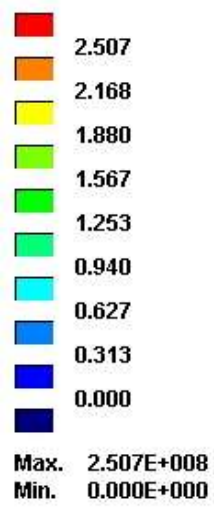


Рисунок А.1 – Распределение интенсивности деформаций по объему шаровой заготовки при последовательном повороте валков на  $90^{\circ}$

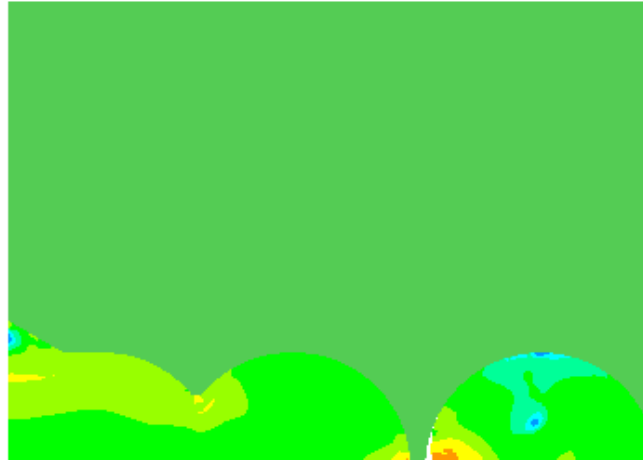
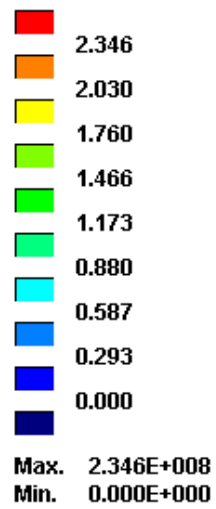
Effective Stress  
E+8 Pa



Effective Stress  
E+8 Pa



Effective Stress  
E+8 Pa



Effective Stress  
E+8 Pa

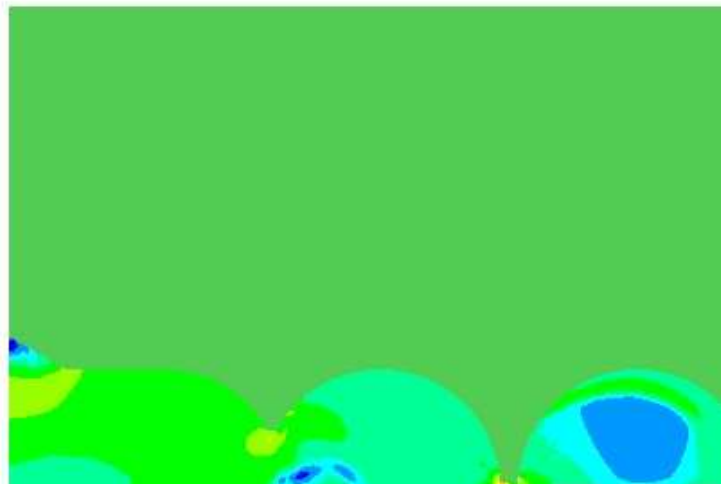
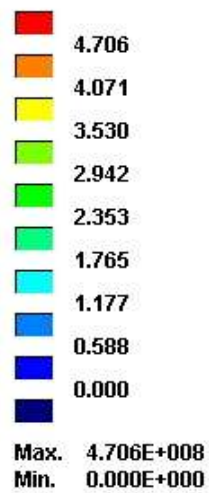


Рисунок А.2 – Распределение интенсивности напряжений по объему шаровой заготовки при последовательном повороте валков на  $90^0$

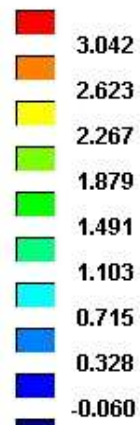
Pressure  
E+9 Pa



Max. 1.082E+009  
Min. -2.797E+007



Pressure  
E+9 Pa



Max. 3.042E+009  
Min. -6.017E+007



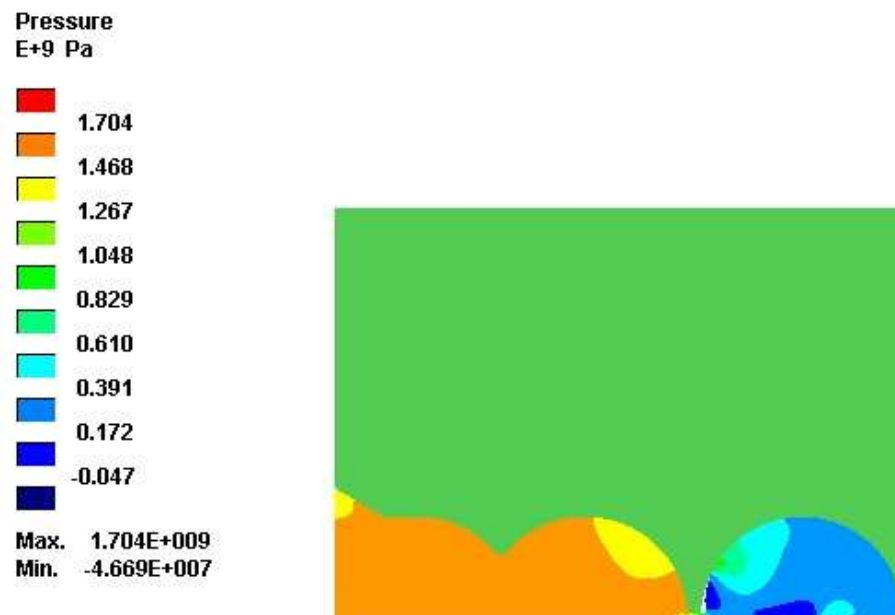


Рисунок А.3 – Распределение гидростатического давления по объему шаровой заготовки при последовательном повороте валков на  $90^{\circ}$

## Приложение Б



### использования результатов научно-исследовательской работы «Разработка энергосберегающей технологии производства шаров большого диаметра».

На АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» установлены шаропрокатные станы, предназначенные для прокатки шаров диаметром от 40 до 100 мм. Однако увеличение количества заказов на производство шаров малого диаметра потребовало разработки новых калибровок для шаров диаметром 30 и 50 мм, и усовершенствование технологии производства шаров диаметром 40 мм с целью улучшения качества.

Специалистами калибровочного бюро АО «Евраз ЗСМК» была проведена научно-исследовательская работа по разработке калибровки и технологии прокатки шаров малых диаметров 30, 40, 50 мм. При проведении работы были использованы результаты компьютерного моделирования прокатки шаров и некоторые разделы методики расчета калибровки валков шаропрокатного стана, выполненные Филипповой М.В., доцентом кафедры «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК» Сибирского государственного индустриального университета.

Результаты работы внедрены в производство. Экономический эффект от внедрения результатов работы составляет 3 млн. руб. в год. Доля исполнителя доц. Филипповой М.В. составляет 20%.

Настоящий акт составлен для подтверждения научной и практической значимости результатов НИР и не является основанием для финансовых претензий.

Главный калибровщик  
прокатного производства  
АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский  
металлургический комбинат»

Копылов И.В.

## Приложение В

### Калибровка валков для прокатки шаровых заготовок диаметром 90 мм

Диаметр заготовки  $d_з = \frac{d_{ш}}{\eta_0}$ . Примем коэффициент радиального роста размера шара  $\eta_0 = 1,03$ .

По ГОСТ 2590-2006 «Прокат сортовой стальной горячекатаный круглый» выбираем ближайшую по диаметру заготовку 90 мм. Тогда уточненный диаметр шара:

$$d_{ш} = d_з \cdot \eta_0 = 90 \cdot 1,03 = 92,7 \text{ мм.} \quad (1)$$

Предварительный этап:

Диаметр калибра: принимаем коэффициент, учитывающий температурное расширение металла  $\eta_t = 1,013$ .

$$d_к = 92,7 \cdot 1,013 = 93,91 \text{ мм,} \quad (2)$$

Принимаем  $d_к = 94$  мм.

Минимальная ширина реборды:

$$a = 0,04 \cdot 47 + 1,3 = 1,88 \text{ мм} \quad (3)$$

Начальная высота реборды:

$$h_0 = 1,5 + 0,07(47 - 10) = 4,1 \text{ мм.} \quad (4)$$

Минимальный радиус перемычки:

$$r = 1 + 0,04(47 - 10) = 2,48 \text{ мм.} \quad (5)$$

Ширина реборды перед отрезкой:

$$a_{отр} = 4 + 0,14(47 - 10) = 9,18 \text{ мм} \quad (6)$$

Примем ширину реборды перед отрезкой 9,2 мм.

Разбиваем длину калибра на участки равной длины, угол разбивки  $\Delta\alpha = 90^\circ$ .

Радиус перемычки в конце формовки при  $\alpha = \alpha_\phi - \Delta\alpha = 540 - 90 = 450^\circ$ .

$$r_{отр} = 2,48 + \frac{47-0,26-2,48}{540} = 2,55 \text{ мм} \quad (7)$$

Рассчитываем изменения высоты реборды при повороте валка на  $90^\circ$ ; высоту реборды для каждого угла поворота валков от  $\alpha_{общ} = 1260^\circ$  до  $0^\circ$  через промежуток  $90^\circ$  находим высоту реборды,  $h_{1260} = 4$  мм.

Рассчитываем радиус перемычки, при этом минимальный радиус перемычки равен 2,5 мм; радиус перемычки на формовочном участке; ширину сферического участка.

Принимаем ширину сферического участка отрезки именно на угле поворота валка  $\alpha_{отд+90}$ , предшествующему отделочному участку калибра, т. е.  $C_{отр} = C_{\alpha_{отд+90}} = C_{810} = 46,08$  мм.

Основной шаг нарезки реборды:

$$\frac{T}{Z} = 2 \cdot C_{отр} + \alpha_{отр}, \quad (8)$$

где  $Z$  – число заходов реборды валка. Для однозаходной калибровки  $Z = 1$ .

Для калибровки шара диаметром 90 мм:  $\alpha_{общ} = 1260^\circ$ ,  $\alpha_\phi = 540^\circ$ ,  $\alpha_{отд} = 720^\circ$ ,  $R_K = 47$  мм,  $a_{отр} = 9,20$  мм,  $C_{отр} = C_{810} = 46,08$  мм. Получаем основной шаг нарезки 101,36 мм.

Нарезка калибров производится на токарно-винторезном станке модели 165 (или модели РТ 911Ф). Расчетный основной шаг нарезки реборды невозможно получить на данном станке, поэтому методом подбора шестерен гитары станка находим максимально приближенное значение основного шага. Настраиваем станок на метрический шаг 40, сменные шестерни 123:72, и получим шаг 102,5 мм.

Рассчитываем предварительную ширину реборды на отделочном участке:

$$\alpha_{отд} = T_{осн} - 2 \cdot C_{720}, \text{ мм.} \quad (13)$$

Принимаем ширину реборды  $a_{нач} = 4,5$  мм,  $a_{мин} = 3,18$  мм и  $a_{отд} = 9,2$  мм. Тогда  $a_{1260} = 4,5$  мм,  $a_{1170} = 4,4$  мм,  $a_{1080} = 4,1$  мм,  $a_{990} = 3,2$  мм,  $a_{900} = 4,6$  мм,  $a_{810} = 7,1$  мм,  $a_{720} = 7,6$  мм,  $a_{630} = 8,5$  мм.

Исходя из принятой ширины реборды, рассчитываем заполнение калибра металлом.

Расчетные данные на предварительном этапе калибровки приведены в таблице В.1.

Таблица В.1 – Расчетные данные на предварительном этапе калибровки

| $\alpha$ , град | $h_\alpha$ , мм | $r_\alpha$ , мм | $C_\alpha$ , мм | $a_\alpha$ , мм | $V_{C_\alpha}$ , мм <sup>3</sup> | $V_{a_\alpha}$ , мм <sup>3</sup> | $\Sigma V_{C_\alpha-360}^\alpha$ , мм <sup>3</sup> | $V_{S_\alpha}$ , мм <sup>3</sup> |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|--|----------------------------------|
| 1260            | 4               | 43              | 18,97           | 4,5             | 124520,103                       | 33691,061                        | 359481,087   | -                                |
| 1170            | 10,75           | 36,25           | 29,92           | 4,4             | 179570,833                       | 20228,416                        | 407934,795   | -                                |
| 1080            | 17,5            | 29,5            | 36,59           | 4,1             | 202623,703                       | 11482,676                        | 425883,374   | -                                |
| 990             | 24,25           | 22,75           | 41,13           | 3,2             | 212565,687                       | 5853,493                         | 433010,767   | -                                |
| 900             | 31              | 16              | 44,19           | 4,6             | 216305,896                       | 3619,114                         | 435633,786   | 75578,621                        |
| 810             | 37,75           | 9,25            | 46,08           | 7,1             | 217322,385                       | 1854,737                         | -  | 27124,913                        |
| 720             | 44,5            | 2,5             | 46,93           | 7,6             | 217445,684                       | 145,300                          | -  | 9176,334                         |
| 630             | 44,5            | 2,5             | 46,93           | 8,5             | -                                | -                                | -  | 2048,941                         |
| 540             | 44,5            | 2,5             | 46,93           | 9,2             | -                                | -                                | -  | -574,078                         |

На **основном** этапе расчета проверяем принятую ширину реборды для каждого угла  $\alpha$  по условию соответствия вытяжке. Рассчитываем: ширину цилиндрического участка калибра; ширину реборды. Определяем шаги нарезки калибра, рассчитывая от  $\alpha_{отд} - 90$  до  $\alpha_{общ}$ .

Расчетные данные на основном этапе калибровки приведены в таблице В.2.

На последнем этапе проводим **корректировку** калибровки прокатных валков. Для этого вычисляем ширину цилиндрического участка калибра, исходя из полученных шагов, на углах от  $\alpha_{отд} - 90$  до  $\alpha_{общ}$ .

На *второй итерации* уточняем ширину реборды, объем металла в перемычках, уточняем объем металла в цилиндрической части.

Проверяем заполнение калибров. Заполнение калибра по мере прокатки должно приближаться к полному объему шара.

Таблица В.2 – Расчетные данные на основном этапе калибровки

| $\alpha$ , град | $b_\alpha$ , мм | $S_\alpha$ , мм | $a_\alpha$ , мм | $t_\alpha$ , мм |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1260            | -               | 58,75           | 5,8             | 18,5653         |
| 1170            | -18,52          | 37,77           | 4,9             | 51,9126         |
| 1080            | -9,47           | 25,12           | 4,2             | 68,5947         |
| 990             | -5,17           | 16,65           | 3,6             | 77,0296         |
| 900             | -2,02           | 10,90           | 4,5             | 77,0296         |
| 810             | 5,90            | 3,91            | 6,9             | 92,1494         |
| 720             | -               | 1,32            | 7,4             | 98,3898         |
| 630             | -               | 0,30            | 8,3             | 100,9874        |
| 540             | -               | -0,08           | 8,64            | 102,5000        |

Расчетные данные по калибровке валков после корректировки приведены в таблице В.3.

Таблица В.3 – Расчетные данные по калибровке валков после корректировки

| $\alpha$ , град | $S_\alpha$ , мм | $a_\alpha$ , мм | $V_{a\alpha}$ , мм <sup>3</sup> | $V_{sa}$ , мм <sup>3</sup> | $\Sigma V_{Ca}^\alpha$ , мм <sup>3</sup> |
|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|----------------------------|--|
| 1260            | 58,72           | 5,84            | 33889,8936                      | -                          | 359298,645                               |
| 1170            | 37,72           | 4,94            | 20401,1873                      | -                          | 407953,542                               |
| 1080            | 25,13           | 4,20            | 11466,4026                      | -                          | 425873,798                               |
| 990             | 16,69           | 3,56            | 5781,20305                      | -                          | 432973,183                               |
| 900             | 10,31           | 3,80            | 3055,39849                      | 15697,7627                 | 435350,49                                |
| 810             | 3,94            | 6,40            | 1719,4585                       | 2289,2027                  | 435699,009                               |
| 720             | 1,38            | 7,26            | 142,420497                      | 279,415301                 | 435033,789                               |
| 630             | 0,35            | 8,28            | 162,535639                      | 18,1822236                 | -  |
| 540             | 0               | 8,64            | 169,56                          | 0                          | -  |

По окончательным результатам строим график изменения высоты реборды (рисунок В.1).

Из рисунка В.1 видно, что шар прокатывается за 3,5 оборота ( $1260^{\circ}$ ). Из них отделочный участок составляет  $720^{\circ}$  и формующий участок  $540^{\circ}$  (1,5 оборота). На отделочном участке высота реборды постоянна и составляет для левого валка 44,5 мм. На формующем участке высота реборды изменяется от 4 мм до 44,5 мм.

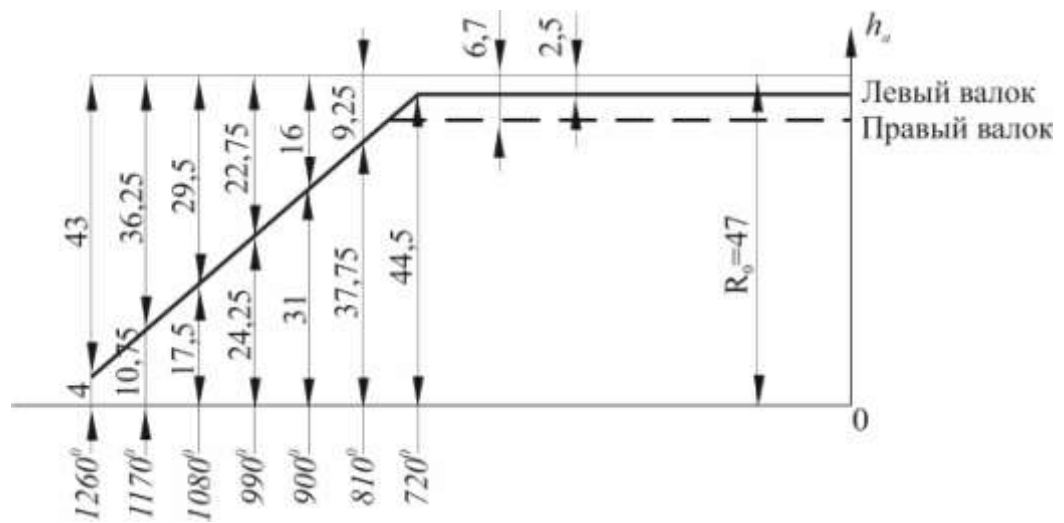


Рисунок Б.1 – График изменения высоты реборды

Строим график подрезки реборды (рисунок В.2). Подрезка реборды производится только на формующем участке при каждом повороте валка на  $90^{\circ}$ . Поэтому график подрезки реборды представлен отрезками прямой линии.

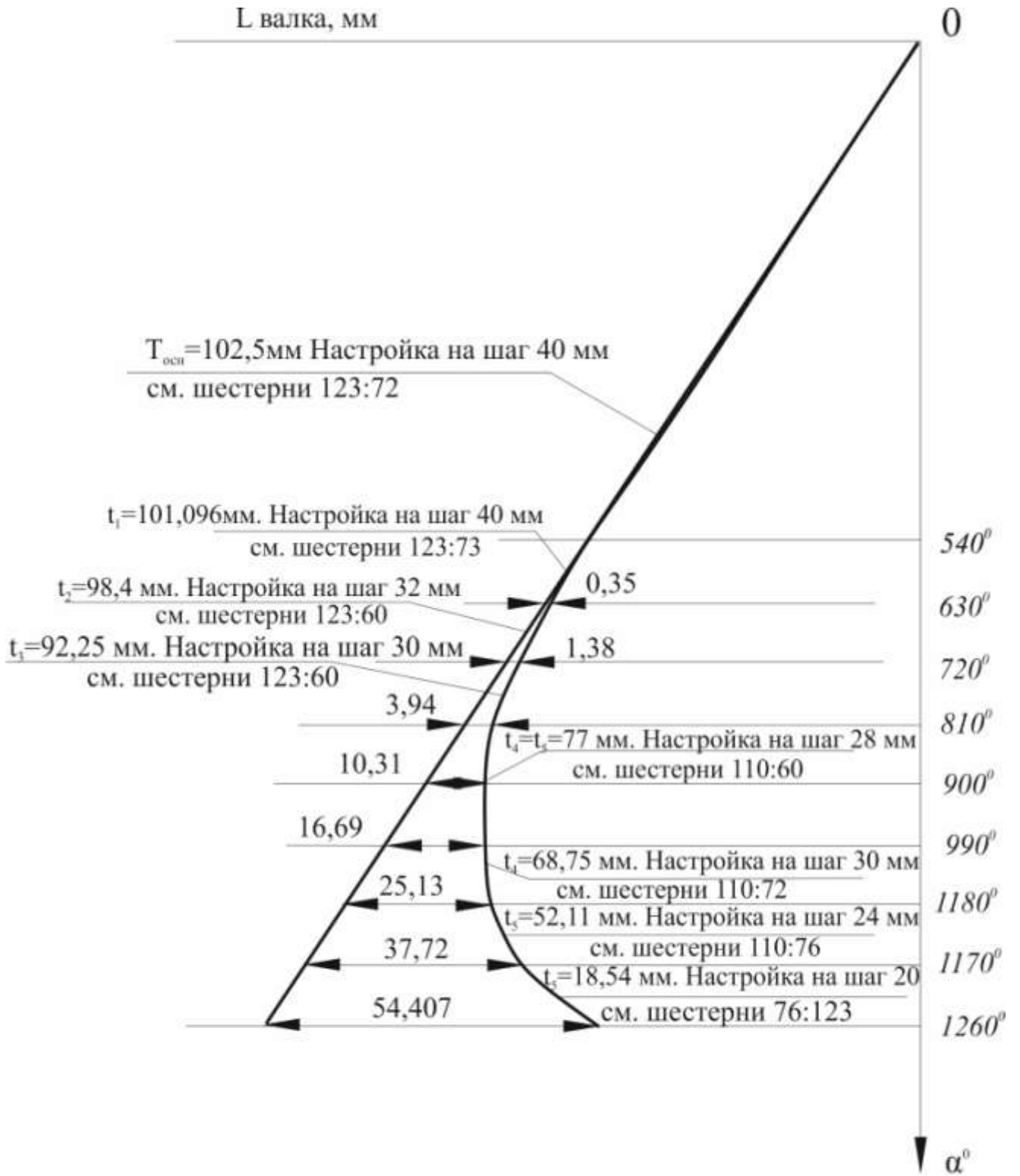


Рисунок В.2 – Строим график подрезки реборды

## Приложение Г

### Химический состав исследованных марок стали

Таблица Г.1 – Химический состав сталей

| Марка<br>стали | С, % | Si, % | Mn, % | Cr, % | Ni, % | Mo, % | Ti, % | Критические<br>точки, °С |                 |
|----------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|-----------------|
|                |      |       |       |       |       |       |       | Ac <sub>1</sub>          | Ac <sub>3</sub> |
| СтЗсп          | 0,18 | 0,16  | 0,53  | -     | -     | -     | -     | 735                      | 850             |
| 20             | 0,21 | 0,19  | 0,25  | -     | -     | -     | -     | 735                      | 850             |
| 20ХН           | 0,20 | 0,53  | 0,25  | 0,57  | 1,25  | -     | -     | 735                      | 805             |
| 40             | 0,43 | 0,26  | 0,61  | -     | -     | -     | -     | 730                      | 790             |
| 40Х            | 0,41 | 0,26  | 0,68  | 0,91  | -     | -     | -     | 743                      | 815             |
| 40ХН           | 0,38 | 0,26  | 0,58  | 0,60  | 1,27  | -     | -     | 735                      | 768             |
| 65Г            | 0,65 | 0,29  | 1,03  | -     | -     | -     | -     | 721                      | 745             |
| 35ХГСА         | 0,37 | 1,32  | 0,97  | 1,37  | -     | -     | -     | 760                      | 830             |
| 18ХГТ          | 0,20 | 0,31  | 0,81  | 1,21  | -     | -     | 0,07  | 740                      | 825             |
| 18Х2Н4МА       | 0,12 | 0,25  | 0,40  | 1,46  | 4,12  | 0,33  | -     | 700                      | 810             |

## Приложение Д

### Калибровка валков для прокатки шаровых заготовок диаметром 120 мм

Расчет калибровки валков для прокатки шаровой заготовки номинальным диаметром 120 мм (фактический диаметр шара составляет 125 мм) Диаметр валков 440–460 мм.

Тогда диаметр заготовки будет  $d_3 = \frac{d_{ш}}{\eta_0}$ . Примем коэффициент радиального роста размера шара  $\eta_0 = 1,03$ .

По ГОСТ 2590-2006 «Прокат сортовой стальной горячекатаный круглый» выбираем ближайшую по диаметру заготовку 120 мм. Тогда диаметр шара будет равен:

$$d_{ш} = d_3 \cdot \eta_0 = 120 \cdot 1,03 = 123,6 \text{ мм.} \quad (1)$$

Предварительный этап:

Диаметр калибра: принимаем коэффициент, учитывающий температурное расширение металла,  $\eta_t = 1,013$ .

$$d_k = 123,6 \cdot 1,013 = 125,2 \text{ мм,} \quad (2)$$

Минимальная ширина реборды:

$$a = 0,04 \cdot 62,6 + 1,3 = 3,8 \text{ мм} \quad (3)$$

Начальная высота реборды:

$$h_0 = 1,5 + 0,07 \cdot (62,6 - 10) = 5,2 \text{ мм,} \quad (4)$$

Минимальный радиус перемычки:

$$r = 11 + 0,04 \cdot (62,6 - 10) = 3,1 \text{ мм.} \quad (5)$$

Ширина реборды перед отрезкой:

$$a_{отр} = 4 + 0,14(62,6 - 10) = 11,4 \text{ мм} \quad (6)$$

Разбиваем длину калибра на участки равной длины, угол разбивки  $\Delta\alpha = 90^\circ$ .

Радиус перемычки в конце формовки при  $\alpha = \alpha_\phi - \Delta\alpha = 540 - 90 = 450^\circ$ .

$$r_{\text{отр}} = 3,1 + \frac{62,6 - 5,2 - 3,1}{540} = 3,2 \text{ мм} \quad (7)$$

Изменения высоты реборды при повороте валка на  $90^\circ$ :

$$\Delta h = r_{\text{отр}} - r, \text{ мм.} \quad (8)$$

Для каждого угла поворота валков от  $\alpha_{\text{общ}} = 1260^\circ$  до  $0^\circ$  через промежуток  $90^\circ$  находим высоту реборды.

Рассчитываем радиус перемычки; минимальный радиус перемычки; радиус перемычки на формовочном участке, ширину сферического участка  $C_a$ :

Принимаем ширину сферического участка отрезки именно на угле поворота валка  $\alpha_{\text{отд}+90}$ , предшествующему отделочному участку калибра.

Определяем основной шаг нарезки реборды для однозаходной калибровки.

Для калибровки шара диаметром 125 мм имеем  $\alpha_{\text{общ}} = 1260^\circ$ ,  $\alpha_\phi = 540^\circ$ ,  $\alpha_{\text{отд}} = 720^\circ$ ,  $R_k = 62,6$  мм,  $a_{\text{отр}} = 11,4$  мм,  $C_{\text{отр}} = C_{810} = 61,41$  мм. Основной шаг нарезки реборды  $T_{\text{осн}} = 2 \cdot 61,41 + 11,4 = 134,22$  мм.

Нарезка калибров производится на токарно-винторезном станке модели 165 (или модели РТ 911Ф). Расчетный основной шаг нарезки реборды невозможно получить на данном станке, поэтому методом подбора шестерен гитары станка найдем максимально приближенное значение основного шага. Настраиваем станок на метрический шаг 60, сменные шестерни 114:76 и получаем шаг 135 мм.

Принимаем ширину реборды  $a_{\text{нач}} = 7,2$  мм,  $a_{\text{мин}} = 3,8$  мм и  $a_{\text{отд}} = 9,96$  мм.

Исходя из принятой ширины реборды, рассчитываем заполнение калибра металлом: объем металла в сферической части калибра; объем металла в перемычках; объем шара с перемычками; объем металла в цилиндрической части калибра.

Расчетные данные на предварительном этапе калибровки приведены в таблице Д.1.

Таблица Д.1 – Расчетные данные на предварительном этапе калибровки

| $\alpha$ ,<br>град | $h_\alpha$ ,<br>мм | $r_\alpha$ ,<br>мм | $C_\alpha$ ,<br>мм | $a_\alpha$ ,<br>мм | $V_{C\alpha}$ , мм <sup>3</sup> | $V_{a\alpha}$ , мм <sup>3</sup> | $\Sigma V_{C\alpha-360}^\alpha$ ,<br>мм <sup>3</sup> | $V_{S\alpha}$ , мм <sup>3</sup> |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|---------------------------------|
| 1260               | 5,2                | 57,4               | 24,98              | 7,2                | 291209,24                       | 74525,72                        | 842724,36  | -                               |
| 1170               | 14,25              | 48,35              | 39,76              | 6,0                | 423669,73                       | 44065,03                        | 960787,57  | -                               |
| 1080               | 23,3               | 39,3               | 48,73              | 4,8                | 478745,88                       | 23290,36                        | 1004313,0  | -                               |
| 990                | 32,35              | 30,25              | 54,81              | 3,8                | 502345,91                       | 10924,06                        | 1021729,88   | -                               |
| 900                | 41,4               | 21,2               | 58,9               | 4,4                | 511145,95                       | 6212,61                         | 1028174,2  | 185190,27                       |
| 810                | 50,45              | 12,15              | 61,41              | 7,0                | 513508,5                        | 3246,40                         | 1029007,26   | 67127,06                        |
| 720                | 59,5               | 3,1                | 62,52              | 9,96               | 513783,97                       | 300,7                           | 1027843,88   | 23601,64                        |
| 630                | 59,5               | 3,1                | 62,52              | -                  | -                               | -                               | -  | 6184,75                         |
| 540                | 59,5               | 3,1                | 62,52              | -                  | -                               | -                               | -  | 0                               |

На основном этапе расчета проверяем принятую ширину реборды для каждого угла  $\alpha$  по условию соответствия вытяжке. Рассчитываем: ширину цилиндрического участка калибра; ширину реборды. Определяем шаги нарезки калибра, рассчитывая от  $\alpha_{отд} - 90$  до  $\alpha_{общ}$ . Расчетные данные основного этапа калибровки представлены в таблице Д.2.

Таблица Д.2 – Расчетные данные на основном этапе калибровки

| $\alpha$ , град | $b_\alpha$ , мм | $S_\alpha$ , мм | $a_\alpha$ , мм | $t_\alpha$ , мм |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1260            | -               | -               | 7,2             | 21,56           |
| 1170            | -25,92          | -               | 6,0             | 68,04           |
| 1080            | -13,62          | -               | 4,8             | 90,36           |
| 990             | -8,32           | -               | 3,8             | 108,88          |
| 900             | -4,73           | 15,04           | 1,34            | 96,64           |
| 810             | 3,24            | 5,45            | 5,91            | 120,88          |
| 720             | -               | 1,95            | 7,22            | 129,32          |
| 630             | -               | 0,5             | 8,64            | 133,00          |
| 540             | -               | 0               | 9,14            | -               |

На последнем этапе проводим корректировку калибровки прокатных валков. Для этого вычисляем ширину цилиндрического участка калибра, исходя из полученных шагов, на углах от  $\alpha_{\text{отд}} - 90$  до  $\alpha_{\text{общ}}$ .

На второй итерации уточняем ширину реборды, объем металла в перемычках, уточняем объем металла в цилиндрической части.

Проверяем заполнение калибров. Заполнение калибра по мере прокатки должно приближаться к полному объему шара.

Расчетные данные по калибровке валков после корректировки приведены в таблице Д.3.

Таблица Д.3 – Расчетные данные по калибровке валков после корректировки

| $\alpha$ , град | $S_{\alpha}$ , мм | $a_{\alpha}$ , мм | $V_{a\alpha}$ , мм <sup>3</sup> | $V_{s\alpha}$ , мм <sup>3</sup> | $\Sigma V_{Ca}^{\alpha}$ , мм <sup>3</sup> |
|-----------------|-------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|
| 1260            | 78,17             | 6,87              | 71109,95                        | 962362,41                       | 840479,93                                  |
| 1170            | 49,82             | 6,00              | 44065,03                        | 613341,37                       | 960770,18                                  |
| 1080            | 32,94             | 4,60              | 22319,93                        | 405529,20                       | 1003814,74                                 |
| 990             | 21,09             | 3,69              | 10607,84                        | 267028,79                       | 1021576,60                                 |
| 900             | 13,56             | 3,64              | 5139,52                         | 166939,16                       | 1027650,03                                 |
| 810             | 5,44              | 6,74              | 3118,85                         | 66911,09                        | 1029002,25                                 |
| 720             | 1,68              | 8,27              | 249,83                          | 20744,28                        | 1027843,21                                 |
| 630             | 0,5               | 9,46              | 285,60                          | 6155,57                         | -  |
| 540             | 0                 | 9,96              | 300,70                          | 0                               | -  |

Подбираем шаги токарного станка для нарезки калибров.

$$t_{630} = 133 \text{ мм, метрический шаг 56, сменные шестерни 114:72;}$$

$$t_{720} = 130,26 \text{ мм, метрический шаг 60, сменные шестерни 110:76;}$$

$$t_{810} = 120 \text{ мм, метрический шаг 120, сменные шестерни 76:114;}$$

$$t_{900} = t_{990} = 102,5 \text{ мм, метрический шаг 40, сменные шестерни 123:72;}$$

$$t_{1080} = 90 \text{ мм, метрический шаг 40, сменные шестерни 114:76;}$$

$$t_{1170} = 67,5 \text{ мм, метрический шаг 30, сменные шестерни 114:76;}$$

$t_{1260} = 21,6$  мм, метрический шаг 22, сменные шестерни 72:110.

Шар прокатывается за 3,5 оборота ( $1360^\circ$ ). Из них отделочный участок составляет  $730^\circ$  и формирующий участок  $540^\circ$  (1,5 оборота). На отделочном участке высота реборды постоянна и составляет для левого валка 59,5 мм. На формирующем участке высота реборды изменяется от 5,2 мм до 59,5 мм.

По окончательным результатам строим графики изменения высоты реборды и подрезки реборды.

## Приложение Е

### Акт внедрения ОАО «Гурьевский металлургический завод»

УТВЕРЖДАЮ:

Главный инженер ОАО «ГМЗ»



 Ельцов В.А.

«10» сентября 2013г.

#### АКТ

Об использовании результатов научно – исследовательской работы

Научно – исследовательская работа «Разработка калибровки валков шаропркатного стана для прокатки шаров диаметром 120 мм» выполнена в январе – мае 2010 г. сотрудниками Гурьевского металлургического завода, Климовым А.С., Савельевым И.Е. и Титовым Ю.Ю., совместно с кафедрой обработки металлов давлением и металловедения ГОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет» в лице исполнителей проф. Перетяцько В.Н., доц. Филипповой М.В. и аспиранта Федорова А.А.

В работе исследованы деформация металла на формующем участке, отрезка перемычки за 90° до отделочного участка и обкатка металла на отделочном участке. Полученные результаты позволили построить график изменения высоты реборды и график подрезки реборды. Используя полученные графики, были изготовлены калиброванные валки и разработана технология прокатки шара диаметром 120 мм.

По результатам НИР разработана и успешно внедрена в практику работы шаропркатного стана технология прокатки шара диаметром 120 мм.

В настоящее время прокатка шара диаметром 120 мм производится согласно заказам предприятий.

Совокупный экономический эффект за счёт реализации нового вида продукции составляет 3,64 млн. руб. в год.

Совокупный экономический эффект от использования результатов НИР, приходящийся на долю исполнителей доцента Филипповой М.В., аспирантов Климова А.С. и Федорова А.А. составляет 1,56 млн. руб. год.

Настоящий акт составлен для подтверждения научной и практической значимости результатов НИР и не является основанием для финансовых претензий.

И.о. начальника шаропркатного цеха

ОАО «Гурьевский металлургический завод»



Горбатиук В.Ю.

## Приложение Ж

### Акт внедрения ОАО «Новокузнецкий вагоностроительный завод»



#### ОАО «НОВОКУЗНЕЦКИЙ ВАГОНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ЗАВОД»

Юридический адрес: 654000, г. Новокузнецк, пр. Производственный, 22  
 тел.: (3843) 792-421, факс: (3843) 794-122, E-mail: zrmo@nkmk.ru  
 Почтовый адрес: 654005, г. Новокузнецк, ул. Орджоникидзе, 28а, офис, 301  
 ИНН/КПП 4217101428/421701001 р/с 40702810712000000041 в филиале ОАО  
 "ТрансКредитБанка" г. Новокузнецк, к/с 30101810200000000755 БИК 043209755

191108 № \_\_\_\_\_  
 на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_



#### АКТ

#### Внедрения результатов работы

ОАО «Новокузнецкий вагоностроительный завод» совместно с Сибирским государственным индустриальным университетом (СибГИУ) провели комплексные исследования и проектные работы по созданию технологий безоблойной штамповки шестерни из шаровой заготовки. В результате исследований была разработана и изготовлена штамповая оснастка и проведены экспериментальные исследования при штамповке шестерни 12.37.118.

Разработанная технология для штамповки шестерни 12.37.118 внедрены в производство в 2008 году.

Расчеты показали, что при изготовлении шестерни 12.37.118 безоблойной штамповкой из шаровой заготовки экономия металла на одной поковке составляет 0,65 кг по сравнению с получением этой же поковки горячей объемной штамповкой с облоем (Приложение А).

Начальник КТЦ

Начальник ПЭО

 Злотников Е.В.  
 Кузьмина И.Н.

## Приложение А

## Расчет экономической эффективности.

Согласно чертежу поковки, заготовка для изготовления шестерни 12.37.118 должна иметь размеры диаметр 95 мм. и длина  $L=97$  мм.. При этом масса заготовки равна 5,4 кг.

Штамповка шестерни производилась из шаровой заготовки диаметром 105 мм.. Масса заготовки составляет 4,75 кг. Экономия металла при безоблойной штамповке одной поковки шестерни 12.37.118 составляет 0,65 кг по сравнению с изготовлением этой же поковки горячей объемной штамповкой с облоем.

При объеме годового производства 100 тыс. штук поковок, годовая экономия металла составит 65 т. При стоимости проката из круга 120 мм из стали 18ХГТ 46020 руб/т., годовая экономия в денежном выражении составит 2 млн. 991,3 тыс. рублей. Доля СибГИУ (исполнители проф. Перетяцько В.Н., асп. Бахаев А.В., асп. Филиппова М.В.) составит 25% или 774,8 тыс рублей в год.

Начальник ПЭО

 Кузьмина И.Н.

## Приложение 3

### Акт внедрения ООО «Тонар – АГРО»

ООО «Тонар АГРО»

Россия, г.Барнаул, пр.Космонавтов, 10/14

Тел/факс: 8(3852) 555-973, 227-221

e-mail: office@tonar.su сайт: www.tonar.su

Утверждаю:

Директор ООО «Тонар – АГРО»

Девяткин И.И.

2014г.



#### АКТ

О результатах НИР по изготовлению деталей полугорячей штамповкой из шаровых заготовок в закрытом штампе (Протокол о намерениях от 16.01.2012г)

Сотрудниками ООО «Тонар – АГРО», г.барнаул, совместно с кафедрой «Обработка металлов давлением и металловедения» ФГБУ ОПО «Сибирский государственный индустриальный университет» (СибГИУ), г.Новокузнецк, в 2012 – 2014г.г. была выполнена научно – исследовательская работа «Разработка технологии полугорячей штамповки осесимметричных поковок из шаровой заготовки в закрытых штампах». Руководителем работы от ООО «Тонар – АГРО» являлся инженер Григорченков Н.И. Руководителями работы от СибГИУ – д.т.н.проф. Перетьяко В.Н. и к.т.н. доц. Филиппова М.В.

По результатам работы установлена оптимальная температура нагрева стали 40Х. Спроектированы штампы для штамповки 2 поковок из шаровой заготовки. Выполнено компьютерное моделирование заполнения гравюры штампа и напряжённо – деформированного состояния металла при безоблойной штамповке. Проведена опытная штамповка из шаровой заготовки двух осесимметричных поковок, качество которых признано хорошим. Работа проведена на опытном заводе ООО «Тонар – АГРО» .

В результате применения полугорячей штамповки вместо горячей штамповки по существующей технологии, снизился расход электроэнергии в среднем на 23%. Уменьшение расхода металла при использовании технологии составило 21% по сравнению с облойной штамповкой. На 10% увеличилась производительность труда. Ожидаемый экономический эффект около 2млн. руб. в год.

Настоящий акт составлен для констатации научной и практической значимости результатов НИР.

Составил: Руководитель работ от ООО «Тонар – АГРО»  
инженер  Григорченков Н.И.

## Приложение И

### Акт внедрения ООО «ТехнОмаш»

#### Общество с ограниченной ответственностью «ТехнОмаш»

исх. № \_\_\_\_\_ 656015, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 63-33,  
от «28» декабря 2006 г. тел/факс (3852) 66-76-51



Утверждаю:  
Генеральный директор ООО «ТехнОмаш»  
к.т.н., с.н.с. Осколков А.И.

АКТ  
внедрения результатов работы

Акционерное общество «ТЕХНОМАШ» совместно с Сибирским государственным индустриальным университетом (СибГИУ) проводили комплексные исследовательские и проектные работы по созданию технологии полугорячей точной штамповки корпуса распылителя для дизельных двигателей. В результате исследований была разработана технология полугорячей штамповки, спроектирована и изготовлена штамповая оснастка, спроектирована и изготовлена технологическая линия для штамповки корпуса распылителя.

Разработанная технология и линия для штамповки корпуса распылителя внедрены в производство на участке изготовления прецизионных изделий.

Расчеты показали, что при изготовлении корпуса распылителя полугорячей штамповкой экономия металла на одной детали составляет 29,16 г. по сравнению с получением этой детали резанием на токарных автоматах.

Приложение А – расчет экономической эффективности.

Начальник цеха

 Байдоров М.А.

Экономист

 Иванов А.С.

## Приложение А

## Расчет экономической эффективности

Согласно чертежу детали «корпус распылителя», заготовка для изготовления резанием на токарных автоматах должна иметь размеры: диаметр 17 мм. и длина- 52,75 мм. При этом масса заготовки равна 93,34 г.

Штамповка корпуса распылителя производится из калиброванной заготовки диаметром 16,5 мм. и длиной 38,5 мм. Масса заготовки составляет 64,18 г.

Экономия металла при полугорячей штамповки одной поковки «корпус распылителя» составляет 29,16 г, по сравнению с изготовлением этой детали резанием на токарных автоматах.

При объеме годового производства 1 млн. штук поковок, годовая экономия металла составляет 29,16 т. При стоимости проката (круг диаметром 17 мм.) из стали 18Х2Н4МА 50000 руб/т., годовая экономия в денежном выражении составит 1 млн. 458 тыс. рублей. Доля СибГИУ (исполнители проф. Перетяшко В.Н., asp. Филиппова М.В.) составляет 25%, или 364,5 тыс. рублей в год.

Экономист

 Иваннов А.С.