

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова»

На правах рукописи

Герман Светлана Викторовна

Повышение эффективности сборки заготовок и
формообразования составных изделий пластическим
деформированием и улучшение конструкций оборудования

05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, профессор
Поксеваткин Михаил Иванович

Барнаул 2018

Оглавление

Введение	4
Глава 1 Анализ известных технологий сборки металлических заготовок (СМЗ) совместным пластическим деформированием (СПД) и формообразования составных изделий, конструктивные требования к оборудованию	8
1.1 Обоснование выбора способов СМЗ СПД и формообразования составных изделий на основе обеспечения требований по технологичности и эффективности процесса	8
1.2 Содержание термомеханических режимов штамповки составных изделий из сборных заготовок, полученных совместным пластическим деформированием...	11
1.3 Основные требования к нагружающей системе пресс–штамп для СМЗ СМД и формообразования составных изделий	12
1.4 Аналитическое исследование известных способов и технологий СМЗ СПД и получения составных изделий.....	13
Выводы	22
Глава 2 Разработка и моделирование процессов сборки металлических заготовок совместным пластическим деформированием и формообразования составных стержневых изделий	23
2.1 Теоретические предпосылки процесса СМЗ СПД и формообразования составных стержневых изделий	23
2.2 Разработка инновационных технологий СМЗ СПД и формообразования составных изделий и моделирование процессов.....	31
2.2.1 Технология получения составных стержневых изделий с замкнутой силовой схемой	31
2.2.2 Технология сборки металлических заготовок совместным пластическим деформированием с глубокой зачисткой контактных поверхностей.....	39
2.2.3 Технология получения составных стержневых изделий на основе градиентного нагрева заготовок.....	46
Выводы	60
Глава 3 Экспериментальное исследование процессов сборки металлических заготовок и формообразования составного изделия	62
3.1 Постановка задач исследования	62
3.2 Условия проведения опытов.....	66

3.2.1 Материалы, образцы, оборудование	66
3.2.2 Экспериментальная установка, устройство и наладка	67
3.3 Проведение эксперимента	71
3.4 Обработка результатов эксперимента	73
3.5 Компьютерное моделирование сборки заготовок совместным пластическим деформированием в программе DEFORM-3D.....	77
Выводы	79
Глава 4 Оптимизационная система управления процессами неразъемной СМЗ СПД и формообразования составных стержневых изделий (ССИ)	81
4.1 Теоретические предпосылки к созданию моделей управления процессами сборки заготовок и формообразования составного изделия	81
4.2 Проектирование оптимизационной системы управления технологическими процессами (ОСУ ТП) сборки заготовок пластическим деформированием и формообразования составных стержневых изделий	84
4.3 Инновационный технологический процесс получения ССИ с тонкостенной оболочкой	108
Выводы	114
Заключение	115
Список литературы	117
Приложение А	126

Введение

Актуальность работы. Производство неразъемных составных изделий штамповкой сборных заготовок, получаемых совместным пластическим деформированием (кузнечно-прессовой сваркой), вызывает все больший интерес в машиностроении благодаря его высокой эффективности в связи с экономным расходом дорогостоящих легированных сталей и пониженной трудоемкости процесса (например, тарельчатого клапана двигателя внутреннего сгорания, ротора турбонагревателя и др.). Однако, в настоящее время получение составных изделий затруднено из-за недостаточной изученности механизмов образования неразъемного соединения исходных заготовок посредством совместного пластического деформирования и отсутствием практических рекомендаций по проектированию технологических процессов формообразования составных изделий.

Кроме того, отсутствуют практические рекомендации по использованию применяемого для получения составных изделий оборудования повышенной жесткости.

Поэтому проблема повышения эффективности сборки заготовок и формообразования составных изделий пластическим деформированием и улучшения конструкций оборудования является весьма актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Теоретической основой для разработки темы явились научные труды известных отечественных и зарубежных ученых Тарновского И.Я., Колмогорова В.Л., Богатова А.А., Смирнова-Аляева Г.А., Овчинникова А.Г., Крука А.Т., Бэкофена В., и др. авторов.

Информация о способах получения составных изделий совместным пластическим деформированием весьма ограничена, отсутствуют практические рекомендации к разработке технологий получения составных изделий и улучшению конструкций оборудования для сборки заготовок и формообразованию изделий. Не известны результаты исследований механизмов образования металлических связей и межслойного взаимодействия металлов

контактных поверхностей в процессе сборки заготовок совместным пластическим деформированием. Отсюда вытекает вывод, что процесс формообразования сборных изделий изучен далеко недостаточно и требует дальнейших исследований.

Цели и задачи работы. Целями работы являются повышение эффективности ресурсосберегающих технологий получения составных изделий пластическим деформированием на основе новых технических решений и оптимизационной системы управления технологическими процессами. Для этого необходимо решить ряд технологических задач: разработать методологию рационализации термомеханических условий получения составных изделий и систему управления оптимизацией технологических параметров процесса.

Научная новизна работы

1. Осуществлена формализация технологического процесса получения составных изделий с помощью средств математического и информационного моделирования систем.

2. Спроектирована математическая модель, реализованная алгоритмом, обеспечивающая оптимизацию эффективности технологического процесса получения составных изделий на основе управления массивом варьируемых параметров.

3. Создан банк информационно-логических целевых модулей технологических процессов сборки металлических заготовок совместным пластическим деформированием и формообразования составных стержневых изделий из сборных заготовок.

4. Построена функциональная и объектно-ориентированная оптимизационная система выбора технологии получения составных стержневых изделий различной формы и степени сложности на основе использования банка целевых модулей и системного анализа.

5. Разработана методика обоснования выбора проектных решений по технологии получения составных стержневых изделий на основе оценки экономической эффективности процесса.

Теоретическая и практическая значимость

1. Разработаны инновационные процессы формообразования составных изделий совместным пластическим деформированием на основе механизмов вязкого разрушения металлов.

2. Разработаны инновационные процессы формирования составных изделий из сборных заготовок на основе использования противодействия, глубокой зачистки контактных поверхностей и градиентного нагрева исходных заготовок с созданием замкнутой силовой схемы деформирования.

3. С использованием системного анализа процессов созданы математические экономические модели и оптимизационные системы управления параметрами сборки металлических заготовок пластическим деформированием и получения изделий практической направленности, успешно прошедшие апробацию.

4. С использованием теории планирования эксперимента получены зависимости качества сборки металлических заготовок пластическим деформированием от технологических параметров.

5. Спроектированы примерные технологические процессы штамповки составных изделий типа клапана ДВС и стержневого зубчатого колеса типа ведущая шестерня дифференциала с тонкостенной оболочкой на стержневом элементе.

6. Результаты исследований приняты к внедрению на промышленных предприятиях.

Методология и методы диссертационного исследования

1. Методология проектирования и алгоритмирования иерархических гибридных моделей получения составных изделий.

2. Методы конечно-элементного моделирования.

3. Методы теории планировании экспериментальных исследований процесса штамповки изделий.

4. Методы обработки и статистического анализа опытных данных.

Положения, выносимые на защиту

1. Иерархические гибридные модели процессов получения составных изделий с замкнутой силовой схемой на основе запатентованных способов глубокой зачистки контактных поверхностей, противодействия и градиентного нагрева заготовок, реализованные алгоритмами.

2. Экспериментальные зависимости качества сборки металлических заготовок пластическим деформированием от термомеханических параметров процесса.

3. Оптимизационная экономическая система выбора структуры технологии получения составных стержневых изделий на основе разработанного банка информационно-логических целевых модулей и управления термомеханическими параметрами процесса, обеспечивающего требуемые прочность и жесткость изделия при повышенной эффективности.

4. Примерный инновационный технологический процесс получения составных стержневых изделий с тонкостенной оболочкой, реализующий результаты аналитических и экспериментальных исследований.

Степень достоверности результатов проведенных исследований обеспечивается использованием современных методов структурного анализа; согласованностью математических моделей с практическими результатами; компьютерным моделированием процессов; качеством измерений и статистической обработки результатов; практическим использованием и патентоспособностью разработанных технологий.

Апробация. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: XVI научно-практической конференции молодых ученых, г. Барнаул, 2014 г.; II Международной заочной научно-практической конференции, г. Новокузнецк, 2014 г.; IV, V, VI, VII Всероссийской научно-технической конференции, г. Рубцовск, 2014 – 2017 г.г., XII, XIII, XIV, Всероссийской научной-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь», г. Барнаул, 2015 – 2017 г.г.; VII Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении», г. Кемерово, 2015 г.

Глава 1 Анализ известных технологий сборки металлических заготовок (СМЗ) совместным пластическим деформированием (СПД) и формообразования составных изделий, конструктивные требования к оборудованию

1.1 Обоснование выбора способов СМЗ СПД и формообразования составных изделий на основе обеспечения требований по технологичности и эффективности процесса

Вследствие многообразия существующих способов сборки металлических заготовок с использованием их пластической деформации необходимо выделить несколько критериев для определения преимуществ и недостатков того или иного способа получения изделий конкретного назначения. Так, например, для объективной оценки способов целесообразно использовать обобщенную функцию желательности Е.К. Харрингтона [1]. Функция позволяет учитывать связи и воздействия между ними при выборе характерных параметров из совокупности существующих альтернатив благодаря таким ее свойствам, как непрерывность, монотонность и гладкость. Основой построения и приоритетной возможностью функции Е.К. Харрингтона является преобразование натуральных значений частных параметров различной физической сущности и размерности в единую безразмерную шкалу желательности (предпочтительности). Назначение шкалы заключается в установлении соответствия между физическими (характеризующими функционирование исследуемого объекта) и психологическими (чисто субъективные оценки исследователя желательности (предпочтительности)) параметрами. Психологические параметры выражают через числовую систему по шкале желательности. Для получения шкалы желательности удобно пользоваться готовыми разработанными таблицами соответствий между отношениями предпочтения в эмпирической и числовой (психологической) системах (таблица 1.1) [1]. Параметры соответствия

предпочтений и оценивания различных способов сварки, осуществляемых с использованием давления, представлены в таблице 1.2 [2, 3, 4].

Таблица 1.1 – Таблица соответствия числовой и эмпирической систем предпочтений [1]

Эмпирическая система предпочтений (желательности)	Числовая система предпочтений (система психологических параметров)
Очень хорошо	1,00 – 0,80
Хорошо	0,80 – 0,63
Удовлетворительно	0,63 – 0,37
Плохо	0,37 – 0,20
Очень плохо	0,20 – 0,00

Таблица 1.2 – Параметры оценивания различных способов сварки с использованием давления [2, 3, 4]

Вид сварки	Параметры желательности q_i *)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Кузнечно-прессовая	0,5	0,5	0,9	0,3	0,7	0,9	0,7	0,9	0,8	0,6	0,65
Ультразвуковая	1	0,8	0,9	0,2	0,5	1	0,7	0,7	0,9	0,3	0,63
Трением	0,6	0,5	0,9	0,6	0,7	0,4	0,8	0,8	0,5	0,6	0,62
Диффузионная	0,3	0,5	1	1	0,8	1	0,9	0,3	0,9	0,3	0,62
Высокочастотная	0,7	0,5	0,7	0,7	0,6	0,8	0,7	0,6	0,5	0,6	0,63
Газопрессовая	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,7	0,7	0,64
Контактная	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,7	0,8	0,64
Прокаткой	0,4	0,8	0,6	0,6	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,63
Взрывом	0,7	0,5	0,7	0,6	0,7	0,8	0,7	0,8	0,7	0,1	0,56
Импульсом магнитной энергии	0,7	0,5	0,4	0,4	0,9	0,7	0,6	0,7	0,8	0,3	0,57
Холодная	0,6	1	0,3	0,4	0,6	0,8	0,7	0,8	0,8	0,4	0,60

*) 1 – предварительная подготовка поверхностей; 2 – влияние температурного интервала; 3 – диапазон свариваемых сталей; 4 – диапазон свариваемых толщин; 5 – типичные дефекты и доступность их исправления; 6 – необходимость последующей механической и (или) температурной обработки; 7 – условия дальнейшего использования; 8 – защита поверхности от окисления и воздействия внешней среды; 9 – сохранение свойств; 10 – необходимое оборудование и оснащение; 11 – обобщенный параметр желательности (коэффициент).

Конкретные параметры желательности (q_i) сравниваемых видов сварки рассматриваются на основе эффективности или возможности их применения. По совокупности полученных значений q_i рассчитывается обобщенный коэффициент желательности (D), который вычисляется по формуле:

$$D = \sqrt[n]{q_1 \cdot q_2 \cdot \dots \cdot q_n}, \quad (1.1)$$

где n – число используемых значений параметров сравнения (i) для данного вида сварки (таблица 1.2).

При этом наличие корня n -ой степени позволяет сравнивать обобщенные коэффициенты даже при условии отсутствия части параметров.

Для широко применяемых способов получения неразъемного соединения металлических заготовок сваркой с использованием давления как с нагревом (кузнечно-прессовая, ультразвуковая, трением, диффузионная, высокочастотная, газопрессовая и контактная), так и без нагрева (сварка взрывом, импульсом магнитной энергии, холодная сварка), в таблице 1.2 сформулированы параметры желательности (q_i), а на основании известных литературных данных [2, 3, 4] и рекомендаций производителей проведено ее заполнение.

Пример расчета обобщенного параметра

$$D = \sqrt[10]{0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,9 \cdot 0,3 \cdot 0,7 \cdot 0,9 \cdot 0,7 \cdot 0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,6} = 0,65$$

Из таблицы видно, что для формообразования составных изделий из сборных заготовок, полученных совместным пластическим деформированием, наиболее предпочтительна кузнечно-прессовая сварка ($D=0,65$).

Таким образом, с использованием коэффициента желательности можно предварительно обосновать целесообразность применения того или иного способа получения составных изделий из сборных металлических заготовок, образованных совместным пластическим деформированием. Однако уровень качества составных изделий необходимо оценивать, например, относительной величиной площади схватывания металлов по контактными поверхностям исходных заготовок [5, 6].

1.2 Содержание термомеханических режимов штамповки составных изделий из сборных заготовок, полученных совместным пластическим деформированием

Термомеханический режим (ТМР) горячей обработки металлов давлением включает:

- 1) температурный интервал штамповки;
- 2) степень деформации (общая и единичная);
- 3) скорость деформации;
- 4) режимы нагрева заготовок и охлаждения поковок;
- 5) вид напряженного состояния металла в процессе обработки.

Для установления рациональных параметров ТМР необходимо определить закономерности изменения структуры и механических характеристик металла в зависимости от их химического состава и условий деформирования сборной заготовки составного изделия [7].

При использовании высоколегированных сталей для изготовления головки стержневого составного изделия типа клапана ДВС, ротора турбонагревателя, ведущей шестерни дифференциала и других деталей интервал температур устанавливаются соответственно наиболее высокой пластичности и наиболее низкому сопротивлению деформации (900-1160 °С). Последнее должно быть согласовано с пределом прочности металла стержневой заготовки, работающей в качестве прошивня при внедрении ее в головную заготовку в процессе сборки заготовок [8, 9, 10].

Допустимая степень деформации обусловлена запасом технологической пластичности, которая при горячей обработке достаточно высока. Однако, чтобы избежать получения крупного зерна в металле головной заготовки, степень деформации при окончании процесса должна быть не ниже 20% (для легированных сталей) и не ниже 15% (для углеродистых). В противном случае снижаются механические свойства металла [11].

Изменение скорости деформирования в диапазоне от 0,1 до 8 м/с (кривошипный пресс–молот) практически не влияет на технологическую пластичность, но существенно повышает сопротивление деформации (в 2,5÷4,0 раза) [12].

Высоколегированные стали, используемые для головной заготовки, следует нагревать по двухступенчатому режиму: медленно – до температуры 800÷900 °С и ускоренно с 800 °С.

Поковки составных изделий следует охлаждать медленно (в термосах или специальных печах), иначе возможен разрыв металлических связей неразъемного соединения сборных заготовок [13].

Вид напряженного состояния металла при формировании составных изделий оказывает значительное влияние на качество образования неразъемного соединения металлических заготовок пластическим деформированием. Наилучшая пластичность и схватываемость металлов заготовок наблюдается в том случае, когда металл подвергается воздействию всестороннего неравномерного сжатия с высокими сжимающими напряжениями шарового тензора при наличии деформированного состояния, характеризуемого двумя деформациями сжатия и одной растяжения. Поэтому при получении составных изделий пластическим деформированием целесообразно использовать закрытую штамповку или штамповку выдавливанием [14].

1.3 Основные требования к нагружающей системе пресс–штамп для СМЗ СМД и формообразования составных изделий

Большое влияние на качество сборных заготовок и составных изделий оказывает жесткость нагружающей системы пресс–штамп [15, 16], существенно влияющих на полную деформацию вязкого разрушения металла головной заготовки при сборке ее со стержневой заготовкой.

Чем больше жесткость системы, тем больше полная пластическая деформация в процессе вязкого разрушения металла головной заготовки при

сборке ее со стержневой заготовкой [17]. Кроме того, при деформировании сборной заготовки на жесткой машине уменьшается вероятность разрушения срезом в неразъемном соединении контактных поверхностей в процессе формирования изделия, так как время течения металла, в том числе, зависит от величины упругой энергии, накопленной в нагружающей системе [15].

1.4 Аналитическое исследование известных способов и технологий СМЗ СПД и получения составных изделий

В работе [18] предложен способ изготовления биметаллических изделий, включающий сборку заготовок сердечника и оболочки, калибровку сборной заготовки посредством вытяжки с утонением стенки оболочки, герметизацию сборной заготовки и ее термодиффузионную обработку. При этом сборную заготовку дважды подвергают осевому давлению сначала после сборки, а затем после калибровки сборной заготовки. Этот способ позволяет повысить качество биметаллических изделий посредством сопряжения торцевой поверхности заготовок сердечников и внутренней поверхности донной части пластическим деформированием. Однако, несмотря на то, что выбор усилия поддавки был сделан обоснованно, в заготовке сердечника возможно образование остаточных напряжений, которые вызывают деформацию готовых составных изделий. Кроме того, при реализации способа ограничивается выбор соотношений размеров заготовки сердечника и донной части заготовки оболочки, что существенно снижает технологические возможности предложенного технического решения.

В известном способе [19] неразъемного соединения заготовок проводят сборку с зазором охватывающей 1 и охватываемой 2 заготовок с последующей осадкой охватываемой детали. При этом, на внутренней сопрягаемой поверхности охватывающей заготовки выполняют зубья с модулем 2-5 мм (рисунок 1.1). Наличие зубьев позволяет увеличить площадь контактной поверхности, что, с одной стороны, ведет к увеличению прочности неразъемного соединения, выполненного в условиях напряженного состояния заготовок и способного

передавать крутящий момент свыше 700 Н/м, с другой стороны повышает количество дефектов и адсорбатов на контактных поверхностях охватываемой и охватывающей заготовок, так как процесс зачистки перед сборкой охватывающей заготовки с нарезанными зубьями весьма затруднен. Это обстоятельство существенно снижает качество составных изделий.

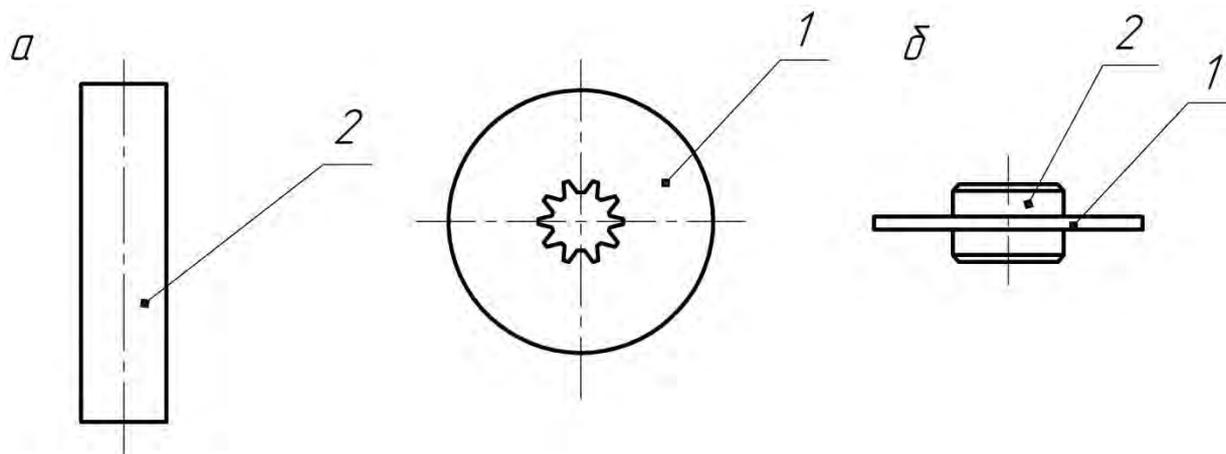


Рисунок 1.1 – Неразъемная сборка заготовок: а – исходные заготовки 1 и 2; б – сборная заготовка

В способе [20] получения крепежных деталей, состоящих из стержня 1 и головки 2, выполненных из материалов с различными свойствами и химическим составом, предложено изготовление головки с отверстием (рисунок 1.2, а), имеющим внутреннюю коническую поверхность, и стержня с соответствующей наружной конической поверхностью, расширяющейся к концу стержня и по длине, превышающей длину конической поверхности головки (рисунок 1.2, б). После ввода стержня 1 в соприкосновение с головкой 2 по конусным поверхностям 3 и 4 с ее наружной стороны и фиксации головки на оправке 5, производят их осевое сжатие и вращение стержня для фрикционного нагрева и пластифицирования материала в зоне трения при относительном продвижении одной из деталей (рисунок 1.2, в).

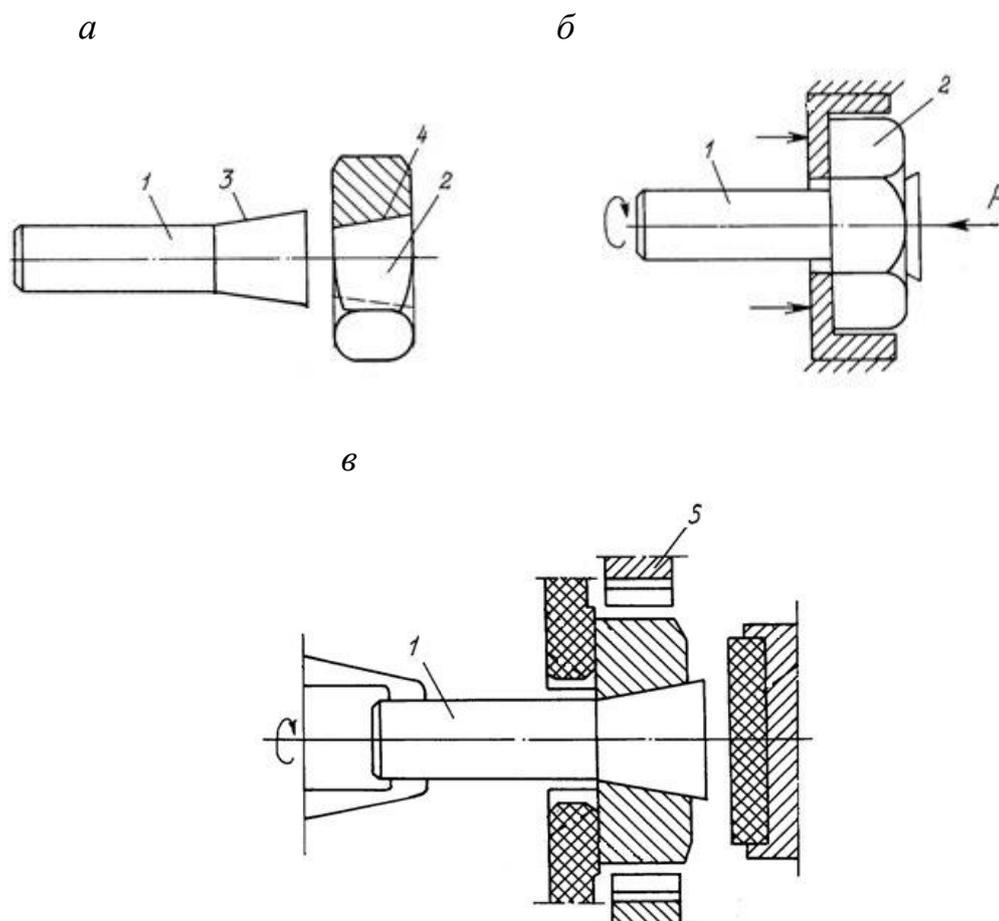


Рисунок 1.2 – Схема получения составной детали типа болт сваркой трением: а – заготовки для производства болтов; б – схема процесса сборки и сварки заготовок для производства болтов; в – схема сварки с элементами крепления, вращения и перемещения стержня и головки

Способ позволяет получить соединение под давлением силой P с предварительным фрикционным нагревом для пластифицирования материала заготовок 1 и 2 в зоне трения. В процессе фрикционного нагрева происходит механическое удаление адсорбатов и других загрязнений с поверхности контакта в зоне соединения. Однако, реализация способа требует точного совмещения и центрирования конических поверхностей 3 и 4 заготовок 1 и 2, а удаление адсорбатов из зоны замкнутых контактных поверхностей заготовок затруднительно. Поэтому качество соединения остается невысоким [21].

В работе [22] предложен способ изготовления клапана для двигателя внутреннего сгорания (ДВС), включающий изготовление тарелки 1 клапана 2 и

полого стержня 3 с образованием на торце со стороны соединения с тарелкой 1 клапана 2 отбортовки 4. Затем осуществляют сборку заготовок и сварку с использованием спеченного материала (например, шлаковую сварку). Способ позволяет получать биметаллические тарельчатые клапаны с полым стержнем для возможности применения дополнительного охлаждения клапана (рисунок 1.3). Применение сварки с использованием спеченного материала ведет к возможности возникновения дефектов в зоне сварного соединения 5 в виде неполного расплавления основного металла, а также пониженную прочность сварного соединения относительно прочности основного металла и возникающих концентраторов напряжений.

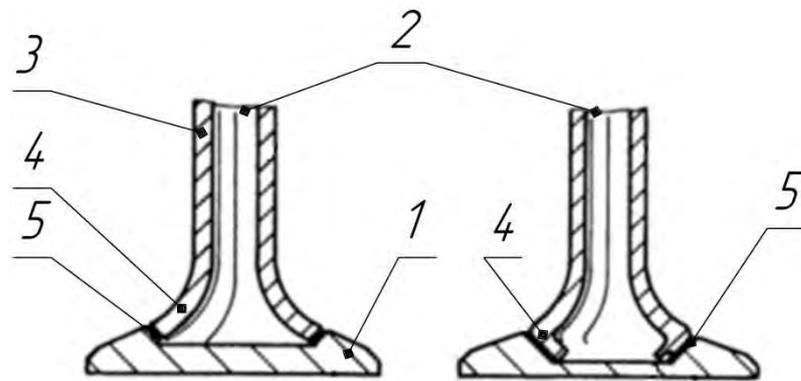


Рисунок 1.3 – Сборные клапаны с полым стержневым элементом для дополнительного охлаждения с различными видами отбортовки

Представляет интерес способ изготовления биметаллического центрального электрода искровой свечи зажигания двигателя внутреннего сгорания [23], включающий следующие технологические переходы (рисунок 1.4): запрессовку сердечника 1 в стакан 2 с получением сборной заготовки (а), прямое выдавливание полученной сборной заготовки (б), отрезку от выдавленной заготовки конического пресс-остатка (в), первую высадку головки электрода (г), вторую высадку головки электрода (д) и диффузионную сварку.

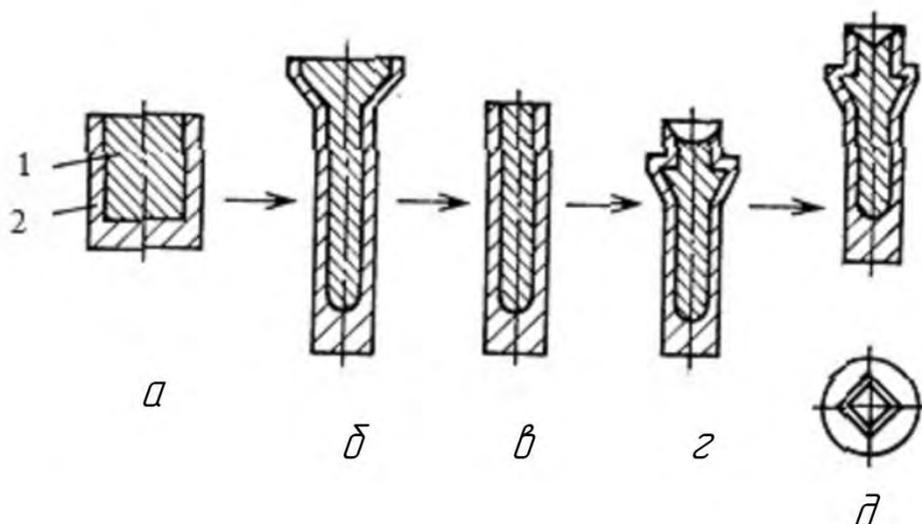


Рисунок 1.4 – Схема изготовления биметаллического центрального электрода искровой свечи зажигания: 1 – сердечник; 2 – стакан. На схеме: а – сборная заготовка; б – первый переход после выдавливания; в – первый переход после обрезки; г – первая высадка; д – вторая высадка

Прямое выдавливание полученной составной заготовки 1 с относительной степенью деформации 40-90% 2 позволяет полностью устранить зазоры и пустоты между сердечником и оболочкой, создаваемые в процессе запрессовки и подготовить контактные поверхности для осуществления последующей диффузионной сварки в вакууме путем создания необходимых давлений. Величина пластической деформации 40-90% позволяет разрушить тонкие окисные пленки, находящиеся на поверхностях оболочки и сердечника, однако удаление оксидов и других адсорбатов невозможно, что снижает качество неразъемного соединения. Кроме того, применение диффузионной сварки для получения неразъемного соединения между оболочкой и сердечником электрода значительно увеличивает трудоемкость изготовления биметаллического центрального электрода, и, следовательно, повышает себестоимость изделия за счет повышенного расхода электроэнергии и трудоемкости процесса диффузионной сварки.

Предложен способ получения составных деталей [24] типа тарельчатого клапана ДВС, включающий получение шаровидной заготовки с центрально

расположенным глухим отверстием, плоскость дна которого перпендикулярна оси отверстия, и стержневой заготовки 3, 4, формообразование торца стержневой заготовки посредством выполнения на нем, по первому варианту, – двух взаимно перпендикулярных углублений треугольного профиля глубиной $(0,05 \div 0,10)$ диаметра стержня, по второму варианту – скоса торца под углом $(5 \div 7)^\circ$, сборку шаровидной заготовки со стержневой заготовкой путем установки последней обработанным торцом в отверстие шаровидной заготовки, нагрев собранных заготовок в печи с защитной атмосферой до ковочной температуры и совместное пластическое деформирование собранных заготовок (рисунок 1.5).

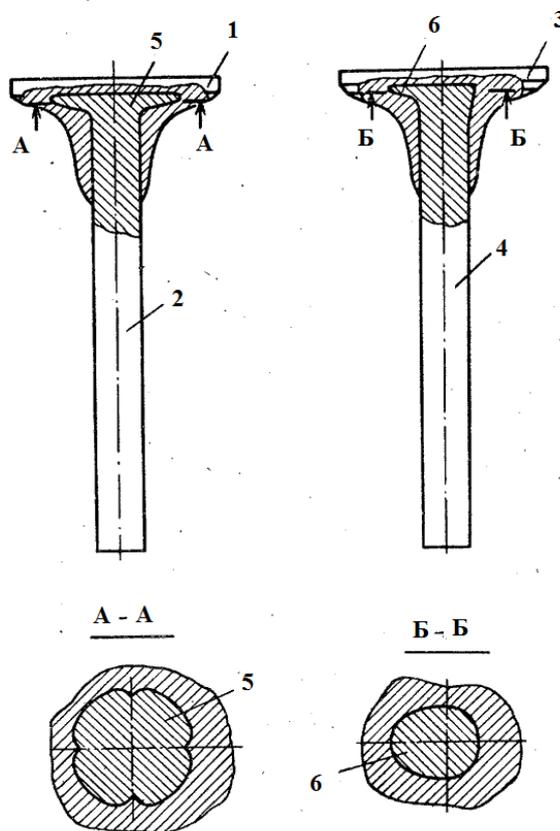


Рисунок 1.5 – Составной клапан ДВС, полученный после совместного деформирования шаровидной заготовки и стержневой заготовки с углублением на торце (а) и стержневой заготовки со скошенным торцом (б): 1, 3 – тарелка; 2 – стержневая заготовка с углублением на конце; 4 – стержневая заготовка со скошенным торцом; 5, 6 – ассиметричная головка

В процессе совместного деформирования головка 5 стержневой заготовки в первом случае приобретает симметричную форму, состоящую из четырех полукруглых частей, во втором случае при наличии скоса торца образуется асимметричная головка 6 тарельчатой формы. В обоих случаях дополнительно повышается качество и надежность получаемого изделия за счет увеличения контактных поверхностей соединяемых заготовок.

Однако известный способ не обеспечивает требуемого качества получаемых составных деталей, так как стенка отверстия в одной из заготовок и поверхность стержневой заготовки неизбежно загрязнены оксидами и другими адсорбатами, ухудшающими кузнечную сварку контактных поверхностей заготовок, что снижает механическую прочность соединения и, следовательно, качество получаемых деталей, особенно в том случае, когда перед сборкой осуществляется нагрев заготовок.

Близким к описанному является способ получения составных деталей [25], включающий подачу стержневой заготовки в полость матрицы с упором в торец выталкивателя, размещение в полости матрицы нагретой до ковочной температуры головной заготовки, получение в ней глухого отверстия путем вдавливания в нее стержневой заготовки с одновременной сборкой этих заготовок и последующее их совместное деформирование с образованием сварного соединения (рисунок 1.6).

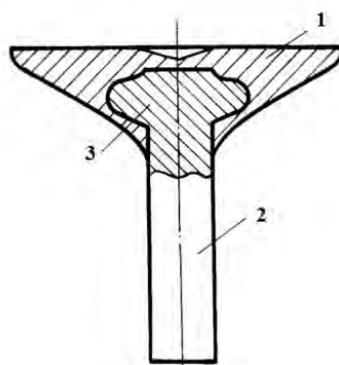


Рисунок 1.6 – Тарельчатый клапан ДВС, полученный совместным пластическим деформированием собранных заготовок. 1 – головная часть; 2 – стержневая часть;

3 – головка, образующаяся после совместного деформирования заготовок

Получение глухого отверстия в головной заготовке путем вдавливания в нее стержневой заготовки с одновременной их сборкой позволяет создать вязкое разрушение металла в процессе прошивки и удалить с контактных поверхностей оксиды и другие адсорбаты кромкой прошиваемого отверстия, что повышает качество получаемого совместным деформированием сварного соединения заготовок и, в результате, повышает качество составных деталей. Однако, при вдавливании стержневой заготовки в нагретую до ковочной температуры головную заготовку неизбежно образование утяжины, поверхность которой, загрязненная оксидами и другими адсорбатами, участвует в получении сварного соединения заготовок при последующем их совместном деформировании. В результате снижается качество составных деталей.

В работе [26] предложена структурная схема автоматизированного производственного модуля сборки составных деталей прошивкой с большим перепадом диаметров и алгоритм управления им. Представленный способ управления режимом сборки на основе научно обоснованного выбора контролируемых параметров технологического процесса дает возможность повысить эффективность работы автоматизированного производственного модуля (рисунок 1.7).

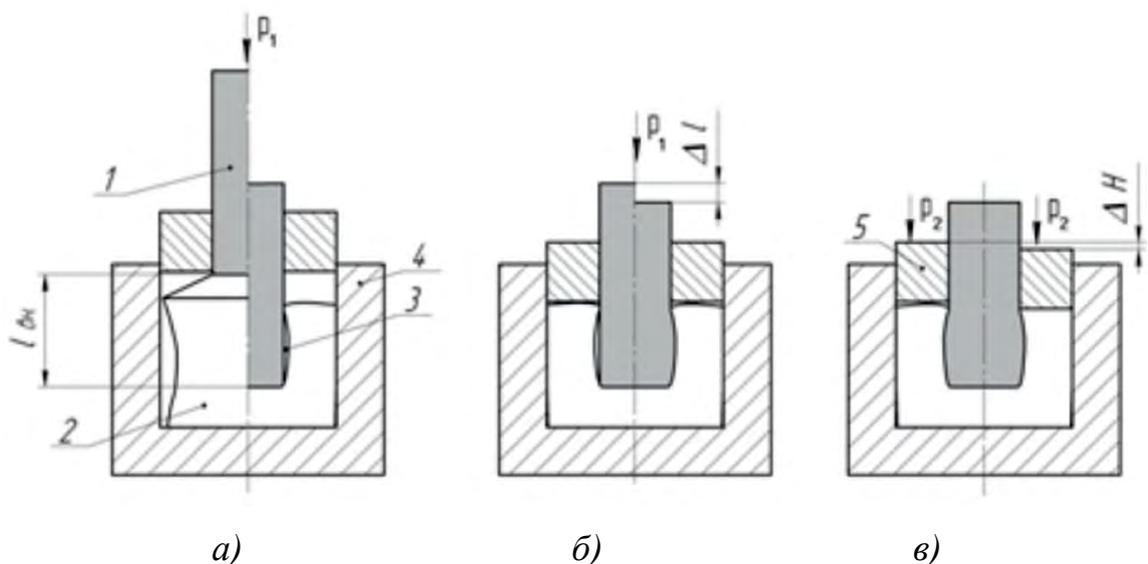


Рисунок 1.7 – Схема способа изготовления составных изделий прошивкой
 а – первый этап (внедрение), б – второй этап (осадка); в – третий и четвертый
 этапы (додавливание)

Несмотря на повышение качества составных изделий с большим перепадом диаметров и обеспечения правильной последовательности выполнения процесса формообразования, предложенный способ весьма трудоемок, так как включает четыре этапа формирования неразъемного соединения, что значительно повышает вероятность образования дефектов в готовом изделии. На первом этапе (рисунок 1.7, а) в нагретую до ковочных температур фасонную заготовку 2 внедряют стержень 1 на определенную глубину ($l_{вн}$), в матрице 4. Заготовка 2 приобретает форму близкую к цилиндрической с минимальной бочкообразностью и без утяжины. Этот этап формоизменения протекает по схеме открытой прошивки и в образованный между боковой поверхностью стержня и заготовки замкнутый кольцевой зазор 3 неизбежно попадают различные адсорбаты. На втором этапе (рисунок 1.7, б), после нагрева соединения для прогрева внедренной части стержня до температуры $T_{кр}$, обеспечивающей потерю им прочностных свойств, происходит расширение металла, что ведет к образованию зазора и, вследствие этого, дополнительному загрязнению поверхностей адсорбатами, что ухудшает схватываемость металлов контактных поверхностей заготовок при образовании неразъемного соединения. В результате снижается качество готового изделия. На третьем этапе после осуществления осадки на (Δl) стержня заполняют кольцевой зазор материалом стержня и, затем, выполняют четвертый этап: додавливание полуфабриката перемещением обоймы 5 на (ΔH_d) (рисунок 1.7, в).

В работе [27] представлена автоматизированная система моделирования и управления технологическим процессом сборки составного изделия прошивкой, состоящая из информационной подсистемы технологической подготовки процесса сборки с поддержкой принятия решений на основе сформированной базы прецедентов, модулей моделирования отдельных этапов процесса и корректирующего управления технологическим процессом сборки составного изделия.

К достоинствам данной разработки можно отнести использование готовых прецедентов в базе, на основе которой осуществляют поиск подходящего прецедента. В базе прецедентов хранятся готовые решения в виде САД-моделей

фасонной заготовки и стержня, принятых решений по выбору оборудования и проектирования оснастки, сформированных управляющих команд. Однако, необходимость создавать новые прецеденты при отсутствии полностью совпадающего прецедента, делает формирование базы прецедентов экономически оправданным только при серийном и массовом производстве составных изделий при наличии практических рекомендаций по разработке целевых модулей моделирования отдельных этапов технологического процесса конкретного назначения, что является весьма сложной задачей.

Выводы

1. На основании результатов аналитических исследований установлено, что СМЗ СПД и способы получения составных изделий обладают достаточной технологичностью и высокой эффективностью, и должны найти более широкое применение в машиностроительной промышленности.

2. Информация о результатах теоретических исследований и практические рекомендации о СМЗ СПД и формообразовании составных изделий весьма ограничены.

3. Дальнейшие исследования в этом направлении позволят совершенствовать и разрабатывать новые ресурсосберегающие процессы СМЗ СПД и формообразования составных изделий, а также целенаправленно модернизировать действующее и создавать современное высокоэффективное оборудование для производства составных изделий.

Глава 2 Разработка и моделирование процессов сборки металлических заготовок совместным пластическим деформированием и формообразования составных стержневых изделий

2.1 Теоретические предпосылки процесса СМЗ СПД и формообразования составных стержневых изделий

Процесс образования неразъемного соединения заготовок пластическим деформированием основан на явлении схватывания металлов, которое встречается, например, при обработке металлов резанием. В результате чего на рабочей поверхности инструмента образуются наросты. Это, вредное при обработке металлов резанием явление, необходимо при получении составных изделий пластическим деформированием.

Технология получения составного изделия содержит следующие этапы: 1) удаление оксидов и других адсорбатов с контактных поверхностей исходных заготовок; 2) сборку заготовок пластическим деформированием и 3) формообразование составного изделия из сборной заготовки обработкой давлением [28, 29].

Очистку контактных поверхностей заготовок осуществляют шлифованием, обдиркой, протягиванием и другими способами, требующими дополнительных затрат. Но наиболее перспективным является способ удаления оксидов и других адсорбатов непосредственно при сборке заготовок посредством внедрения одной заготовки в другую.

В работе [25] предложен способ сборки и формообразования составных стержневых изделий типа тарельчатого клапана ДВС посредством вдавливания нагретой до ковочной температуры головной заготовки, изготовленной, например, из жаропрочной стали, в стержневую заготовку, выполненную из среднеуглеродистой стали, получение сборной заготовки и последующее формообразование составного стержневого изделия.

Основным недостатком технического решения является образование утяжины в головной заготовке при вдавливании ее в стержневую заготовку, что делает невозможным удаление оксидов и других адсорбатов с поверхности утяжины. Поэтому при формообразовании изделия вероятно отслоение металла по неочищенным от адсорбатов контактными поверхностям из-за отсутствия на них металлических связей. В результате снижается прочность неразъемного соединения составных изделий.

Описанный способ сборки металлических заготовок посредством их совместного пластического деформирования использован при разработке ряда инновационных технологий сборки металлических заготовок совместным пластическим деформированием и формообразования составных стержневых изделий повышенной прочности.

Проблема повышения прочности неразъемного соединения составных стержневых изделий включает, по крайней мере, три ключевых аспекта. Во-первых, необходимо обеспечить продольную устойчивость стержневой заготовки в процессе вдавливания в нее головной заготовки, во-вторых, иметь достаточную жесткость нагружающей системы пресс-штамп, и, в-третьих, осуществить перед сборкой заготовок глубокую очистку контактных поверхностей от оксидов и других адсорбатов.

Впервые понятие продольной устойчивости ввел Л. Эйлер [30]. Форма равновесия нагружаемых тел считается устойчивой, если при любом малом отклонении от начального состояния равновесия система возвращается к нему после снятия внешней нагрузки.

Поскольку стержневая заготовка практически всегда имеет кривизну продольной оси, то под действием осевой нагрузки при вдавливании головной заготовки в стержневую последняя может испытывать сжатие и изгиб, что приводит к нарушению симметричности и монотонности течения металла при формировании полости в головной заготовке. В результате ухудшается качество неразъемного соединения при сборке заготовок совместным пластическим деформированием.

Л. Эйлером было получено уравнение для определения критической силы ($F_{кр}$) в зависимости от способа закрепления стержневой заготовки (стержня) (рисунок 2.1):

$$F_{кр} = \pi^2 EJ / (ql)^3, \text{ МН} \quad (2.1)$$

где E – модуль упругости, МПа;

J – момент инерции поперечного сечения стержня при потере продольной устойчивости, мм⁴;

ql – приведенная длина стержня;

q – коэффициент, зависящий от способа закрепления стержня.

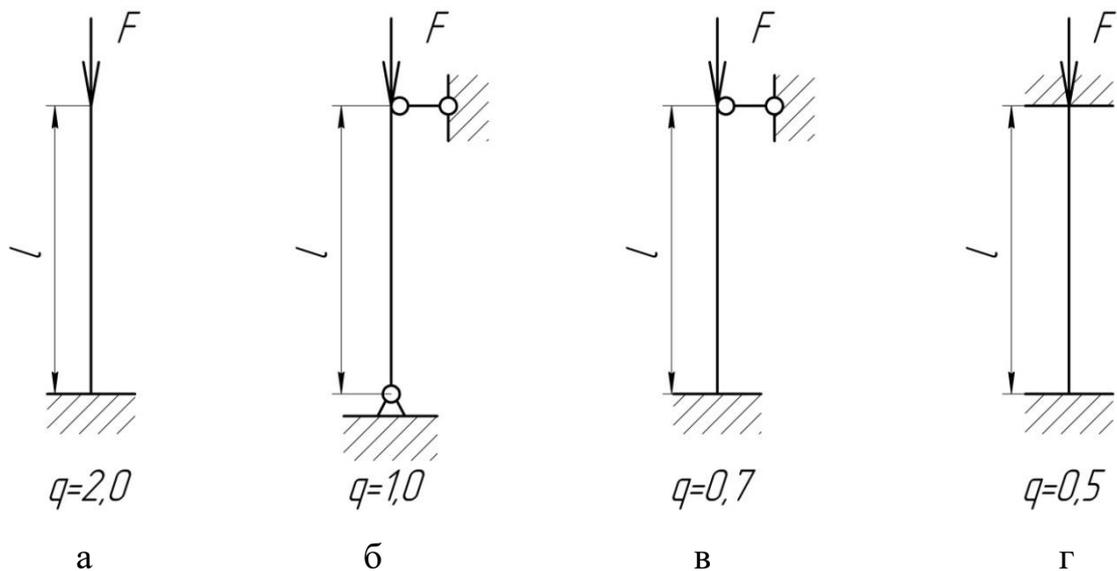


Рисунок 2.1 – Способы закрепления нагружаемой стержневой заготовки

При $q=2,0$ (рисунок 2.1, а) будет худший способ закрепления стержневой заготовки, когда нагружаемую систему легче всего вывести из состояния равновесия, например, при открытой высадке пуансоном с плоским торцом. В этом случае возникает неустойчивость пластической деформации в процессе вдавливания головной заготовки в стержневую, что делает невозможным получение прочного неразъемного соединения металлических заготовок посредством их совместного пластического деформирования.

При формировании составных изделий наиболее предпочтительны штамповка выдавливанием и закрытая штамповка, при выполнении которых создается схема всестороннего объемного неравномерного сжатия $\sigma_1 \geq \sigma_2 > \sigma_3$,

обеспечивающая высокий ресурс пластичности металла и лучшие условия для образования металлических связей по контактными поверхностям сборных заготовок [31].

Поэтому при выполнении второго этапа получения составных изделий – сборки исходных заготовок – наилучший способ закрепления стержневой заготовки при $q = 0,5$ (рисунок 2.1, г). В этом случае возможны максимальная критическая нагрузка $F_{кр}$ и создание механики процесса, отвечающего условиям монотонности течения металла.

При этом способе наиболее вероятно образование ювенильных контактных поверхностей, обеспечивающих развитие объемного взаимодействия соединяемых заготовок в процессе их сборки и формообразования составного изделия на основе действия механизмов механического сцепления, межатомных связей, диффузий и других физико-химических явлений, создающих благоприятные условия проявления эффекта схватывания металлов как необходимого явления для получения неразъемного соединения заготовок. Этот процесс должен протекать на основе вязкого разрушения металлов, не связанного со сколом или мгновенным разрывом межатомных связей в кристаллической решетке [17].

Вязкое разрушение начинается с образования микронарушений от имеющихся в структуре металла зародышей в виде пор, шлаковых и других включений. Микронарушения (микротрещины) возникают в результате микропластической сдвиговой деформации в зернах (кристаллитах) металла исходных заготовок. Создание высокого гидростатического давления путем приложения противодействия в процессе сборки заготовок посредством вдавливания головной заготовки в стержневую задерживает зарождение макронарушений и замедляет процесс разрушения срезом. Поэтому при больших сжимающих напряжениях обычные загрязненные по химическому составу металлы могут проявлять себя как металлы, очищенные от зародышей разрушения. В этом случае при вдавливании головной заготовки в стержневую в процессе сборки исходных заготовок наиболее вероятно вязкое разрушение

В процессе сборки нагретых заготовок в результате активизирующего влияния температуры и сжимающих напряжений быстрее возникают активные центры схватывания металлов.

Образующиеся микронарушения структуры металла при температурах менее температуры рекристаллизации, могут залечиваться путем деформации в результате схватывания атомных слоев поверхностей нарушения, а в области температур рекристаллизации объемы нарушений заполняются атомами за счет диффузии.

Чем интенсивнее протекают процессы возврата и рекристаллизации, тем интенсивнее залечиваются микронарушения.

Скорость вязкого разрушения ориентировочно можно определить по уравнению [32]:

$$u_{\text{в.р.}} = D \cdot e^{\frac{\Psi d}{T}}, \quad (2.2)$$

где $u_{\text{в.р.}}$ – скорость вязкого разрушения;

D и d – константы;

Ψ – степень разрушения;

T – температура, °С.

Активными центрами на контактных поверхностях могут быть поля упругих искажений вокруг дефектов кристаллической структуры (границы зерен, дислокации и вакансии) [33].

Положительное влияние схемы напряженного состояния с высокими значениями сжимающих напряжений шарового тензора на характер вязкого разрушения двухфазных сплавов объясняется, главным образом, тем, что в условиях трехстороннего сжатия формируется межблочная дислокационная структура с повышенной активацией контактных поверхностей соединяемых заготовок, что способствует образованию активных центров схватывания металла.

В процессе вязкого разрушения возникают ювенильные контактные поверхности заготовок, обладающие лучшей схватываемостью и способностью к образованию прочного неразъемного соединения посредством совместного пластического деформирования заготовок.

Возникновению вязкого разрушения способствует склонность металла к деформационному упрочнению, когда уменьшение градиента деформации ведет к вовлечению в пластическую деформацию бóльшего объема металла.

Упрочнение характеризуется коэффициентом упрочнения (n), равным [11]:

$$n = E_k \cdot \varepsilon / \sigma, \quad (2.3)$$

где $E_k = d\sigma/d\varepsilon$ – касательный модуль, соответствующий скорости деформационного упрочнения;

σ – напряжение течения металла, МПа;

ε – степень деформации.

Поскольку скорость деформационного упрочнения ($d\sigma/d\varepsilon$) эквивалентна скорости роста усилия (P) на единицу площади сечения (S) заготовки, то можно записать:

$$E_k = d\sigma/d\varepsilon = dP/dS. \quad (2.4)$$

Или, с учетом соотношения $d\varepsilon = dS/S$, получим:

$$E_k = \frac{1}{S} \cdot \frac{dP}{d\varepsilon}. \quad (2.5)$$

В общем случае скорость деформационного упрочнения (E_k) зависит от материала, условий деформации (ε – степень деформации; ξ – скорость деформации, s^{-1} ; T_d – температура деформации, °C и др. факторов) и геометрических параметров заготовки (соотношение поперечного размера к высоте (длине) высаживаемой части заготовки).

Обобщенную зависимость напряжения (σ) течения от теплофизических факторов можно выразить уравнением [17]:

$$\sigma = \sigma(\varepsilon; \xi; T_d, \text{°C}; \gamma; \dots), \quad (2.6)$$

где γ – поверхностная энергия.

В результате дифференцирования (2.6) получим скорость деформационного упрочнения в виде зависимости:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \right) + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \right) \cdot \left(\frac{\partial \xi}{\partial \varepsilon} \right) + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial T} \right) \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial \varepsilon} \right) + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \gamma} \right) \cdot \left(\frac{\partial \gamma}{\partial \varepsilon} \right) + \dots \quad (2.7)$$

В случае отрицательного значения какого-либо члена правой части уравнения, он становится причиной неустойчивости процесса деформации.

Как известно, продольная устойчивость стержневой заготовки с повышением температуры нагрева снижается. Поэтому при расчете продольной устойчивости следует брать температуру нагрева металла в начальной стадии процесса.

Обычно отрицательной является производная $\left(\frac{\partial \sigma}{\partial T}\right)$, которая показывает, что склонность к адиабатическому процессу деформации способствует неустойчивости течения металла. Но если сделать второй элемент $\left(\frac{\partial T}{\partial \varepsilon}\right)$ третьего члена уравнения (2.7) также отрицательным, то процесс деформации станет устойчивым: вся работа деформации переходит в тепло.

Для практических расчетов изменения температуры в очаге деформации можно воспользоваться соотношением [17]:

$$k \cdot \sigma \cdot d\varepsilon = c \cdot dT$$

или $dT/d\varepsilon = k \cdot \sigma/c,$ (2.8)

где k – часть сохраненного тепла ($k = 1$ для адиабатического процесса деформации);

c – коэффициент объемного расширения.

Изложенные выше механические и теплофизические зависимости, определяющие устойчивость процесса деформации, использованы при реализации условий неразъемного соединения заготовок посредством пластической деформации при штамповке стержневых составных изделий из сборных заготовок.

Вторым важным аспектом проблемы получения прочного неразъемного соединения заготовок при их сборке и формообразовании составного изделия посредством совместного пластического деформирования является использование нагружающей системы пресс-штамп достаточно высокой жесткости. В общем

случае, чем больше жесткость нагружающей системы, тем больше полная пластическая деформация до разрушения, т.е. выше ресурс пластичности металла.

При работе на жесткой машине уменьшается вероятность разрушения срезом, так как время течения металла сильно зависит от величины упругой энергии, накопленной в нагружающей системе.

Качество штампованных составных изделий непосредственно зависит от жесткости конструкции прессы:

$$C = P_n / \Delta l, \text{ МН/мм}; \quad (2.9)$$

где C – коэффициент жесткости прессы;

P_n – номинальное усилие прессы, МН;

Δl – упругая деформация прессы, мм.

Упругая деформация конструкции прессы оценивается податливостью – величиной, обратной жесткости (η):

$$\eta = C^{-1} = \Delta l / P_n, \text{ мм/МН}. \quad (2.10)$$

При объемной штамповке на КГШП податливость колеблется в пределах $(0,10 \div 0,35)$ мм/МН. Податливость служит обоснованием для рационализации припусков и избытка металла. Научно обоснованная взаимосвязь жесткости прессы, точности отштампованной поковки и энергозатрат при выполнении технологических операций установлена в работе [15].

Для сборки металлических заготовок совместным пластическим деформированием и формообразования составных изделий целесообразно использовать однокривошипные ГШП закрытого типа с расположением валов параллельно фронту, которые имеют повышенную жесткость системы пресс-штамп и обеспечивают устойчивую пластическую деформацию, т.е. создают благоприятные условия для образования металлических связей заготовок и их прочного неразъемного соединения.

Третьим аспектом проблемы повышения прочности составных изделий, полученных совместным пластическим деформированием сборных заготовок, является полное удаление оксидов и других адсорбатов с контактных поверхностей заготовок перед их сборкой, препятствующих образованию

металлических связей и вызывающих при формообразовании составного изделия отслаивание металла по контактными поверхностям.

Для решения этих задач разработан ряд комплексных технических систем, положенных в основу проектирования инновационных технологий получения составных стержневых изделий посредством деформирования сборных заготовок.

2.2 Разработка инновационных технологий СМЗ СПД и формообразования составных изделий и моделирование процессов

2.2.1 Технология получения составных стержневых изделий с замкнутой силовой схемой

Как отмечено выше, важнейшим недостатком предложенного способа получения составных стержневых изделий типа тарельчатого клапана [28] является образование утяжины в процессе вдавливания головной заготовки в стержневую, что делает невозможным зачистку поверхности утяжины от адсорбатов. Это обстоятельство снижает качество неразъемного соединения заготовок.

Поэтому разработана технология получения составных стержневых изделий типа тарельчатого клапана ДВС [28], которая также включает сборку заготовок посредством вдавливания нагретой до ковочной температуры головной заготовки в стержневую заготовку и последующее их совместное деформирование с получением неразъемного соединения. Однако, чтобы существенно уменьшить или исключить образование утяжины к головной металлической заготовке по контуру внедряемой стержневой заготовки прикладывают усилие противодействия (рисунок 2.2):

$$P_{\text{пд}} = \sigma_{\text{пд}} \cdot S_{\text{пд}}, \quad (2.11)$$

где $\sigma_{\text{пд}}$ – напряжение противодействия, МПа;

$S_{\text{пд}}$ – площадь приложения усилия противодействия, мм².

Величина напряжения противодействия $\sigma_{\text{пд}}$ должна находиться в диапазоне

$$\sigma_{\text{ср}} < \sigma_{\text{пд}} < \sigma_{\text{вд}}, \quad (2.12)$$

где $\sigma_{\text{ср}}$ – сопротивление срезу металла головной заготовки, МПа;

$\sigma_{\text{вд}}$ – сопротивление деформации металла при вдавливании головной заготовки в стержневую, МПа.

Реализация способа получения составного изделия типа тарельчатого клапана ДВС с замкнутой силовой схемой представлена на рисунке 2.2.

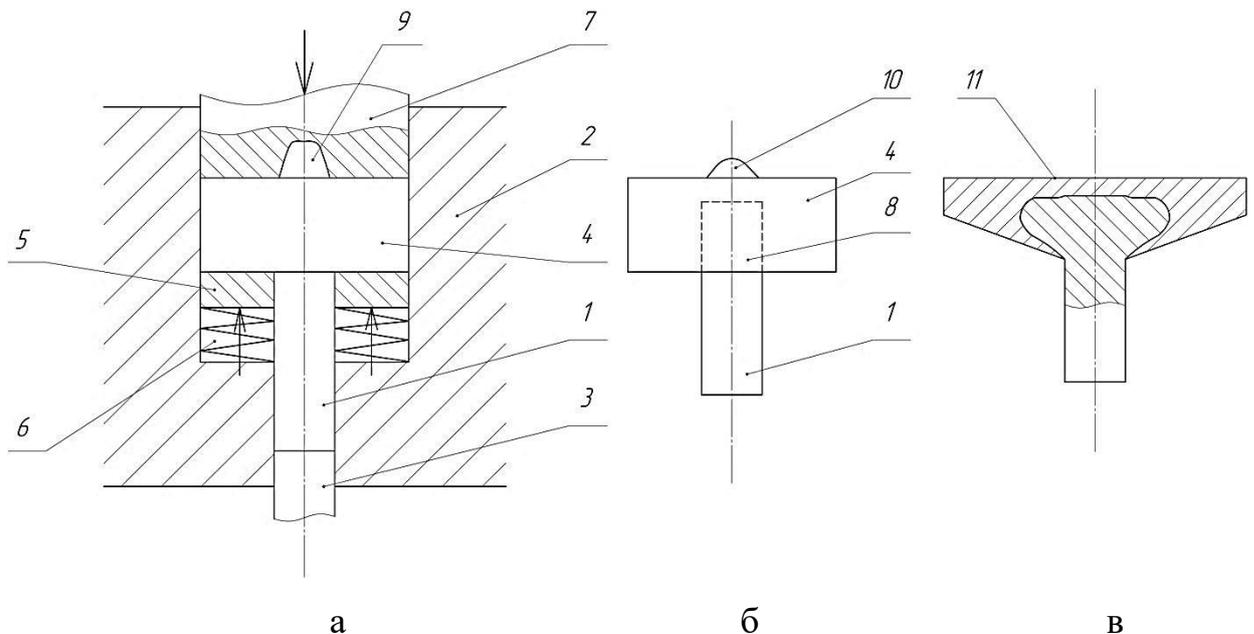


Рисунок 2.2 – Схема сборки металлических заготовок (а), сборная заготовка (б) и полученное изделие (в): 1 – стержневая заготовка; 2 – матрица; 3 – выталкиватель; 4 – головная заготовка; 5 – упорная плита; 6 – упругий элемент; 7 – пуансон; 8 – внедряемая часть стержневой заготовки; 9 – компенсационная полость; 10 – бобышка; 11 – составное изделие

Способ получения составного изделия типа тарельчатого клапана ДВС осуществляют следующим образом.

Стержневую заготовку 1 подают в матрицу 2 с упором в торец выталкивателя 3. Затем в матрице 2 нагретую до ковочной температуры головную заготовку 4 размещают на упорной плите 5 устройства противодействия, содержащего упорную плиту 5 и упругий элемент 6. Упругий элемент 6 предварительно сжимают до усилия противодействия, обеспечивающего

напряжение противодействия ($\sigma_{\text{пд}}$) на поверхности плиты 5 согласно условию (2.12) (рисунок 2.2, а).

Далее, посредством пуансона 7 головную заготовку 4 вдавливают в стержневую заготовку 1, осуществляя прошивку глухого отверстия и одновременную сборку заготовок 1 и 4 (рисунок 2.2, б). При этом, внедренная в головную заготовку 4 часть 8 стержневой заготовки 1 за счет теплопередачи нагревается до ковочной температуры, а избыток металла головной заготовки 4 удаляется в компенсационную полость 9, выполненную в пуансоне 7 (рисунок 2.2, а) с образованием бобышки 10 (рисунок 2.2, б).

После деформирования сборной заготовки получают составное изделие 11 (рисунок 2.2, в).

Процесс сборки металлических заготовок посредством их совместного пластического деформирования можно условно разбить на две стадии: первая – создание физического контакта соединяемых заготовок с одновременной активацией контактных поверхностей, т.е. получение ювенильных поверхностей с образованием на них активных центров схватывания металла; вторая – объемное взаимодействие контактных поверхностей соединяемых заготовок в процессе их сборки на основе действия механизмов: механического сцепления, межатомных связей, диффузий и других физико-химических явлений.

Приложение к головной заготовке усилия противодействия в процессе вдавливания в нее стержневой заготовки, создающего сжимающие напряжения по контуру прошиваемого отверстия, бóльшие, чем напряжение среза металла при прошивке отверстия, существенно снижает или исключает образование утяжины в головной заготовке при прошивке отверстия, и, следовательно, способствует не только более полному удалению оксидов и других адсорбатов с контактных поверхностей головной и внедряемой стержневой заготовок, но и активизирует действие контактных сил трения при наличии значительных сжимающих напряжений в процессе внедрения [34], что создает благоприятные условия для возникновения центров схватывания металлов как необходимого физического явления для получения неразъемного соединения заготовок. Кроме того,

приложение гидростатического давления к контуру прошиваемого отверстия обеспечивает вязкое разрушение материала по плоскостям скольжения, исключая скол или разрыв межатомных связей в кристаллической решетке [17].

В тоже время напряжение противодействия должно быть меньше напряжения вдавливания с тем, чтобы обеспечить при наличии компенсационной полости увеличение высоты головки (утолщения) изделия в результате сборки исходных металлических заготовок. Устанавливают соотношение $\sigma_{\text{пд}} = K \cdot \sigma_{\text{вд}}$ с коэффициентом противодействия K , близким к единице.

Создание схемы напряженного состояния с высокими значениями сжимающих напряжений шарового тензора положительно влияет на характер вязкого разрушения двухфазных сплавов, так как в условиях трехстороннего сжатия формируется межблочная дислокационная структура. При этом, в местах локализации пластической деформации неизбежно действие касательных напряжений, вызывающих сдвиговую деформацию с образованием ювенильных контактных поверхностей, что способствует образованию активных центров схватывания металла в процессе сборки исходных заготовок [35].

При вязком разрушении сопротивление сдвигу зависит от скорости деформации ($\xi, \text{с}^{-1}$) и не зависит от степени деформации ($\epsilon, \%$), а при заданной скорости деформации оно существенно зависит от гидростатического давления [32]:

$$\tau_{\text{сд}} = \tau_0 \cdot e^{\alpha \cdot p} \quad (\text{при } \xi \leq \xi_{\text{доп}}), \quad (2.13)$$

где p – гидростатическое давление, МПа;

$\tau_{\text{сд}}$ – сопротивление сдвигу при данном p , МПа;

τ_0 – сопротивление сдвигу при $p=0$, МПа;

α – функция, зависящая от молекулярной массы.

Для практических расчетов сопротивления деформации ($\sigma_{\text{вд}}$) металла при вдавливании головной заготовки в стержневую можно воспользоваться формулой, полученной для второй стадии горячей закрытой прошивки при максимальном значении показателя внешнего трения, равном 0,5 [36]:

$$\sigma_{\text{вд}} = \sigma_{\text{вг}} \left\{ 3 + 2 \left[1 - 0,85 \left(\frac{d_i}{D} \right) \right] / \left[1 - \left(\frac{d_i}{D} \right)^2 \right] \right\}, \quad (2.14)$$

где d_i – варьируемый диаметр стержневой заготовки, мм;

D – диаметр головной заготовки, мм;

$\sigma_{\text{вг}}$ – предел прочности металла головной заготовки при температуре (T_i , °C) окончания прошивки, МПа.

Сопротивление срезу металла в головной заготовке можно определить как сопротивление деформации в первой стадии закрытой прошивки [36] по выражению:

$$\sigma_{\text{ср}} = \sigma_{\text{вг}} (3 + 0,22d_i/h), \quad (2.15)$$

где $\sigma_{\text{вг}}$ – предел прочности металла головной заготовки при температуре среза, МПа;

h – толщина дна отверстия, прошиваемого в головной заготовке, мм.

Для создания высоких сжимающих напряжений шарового тензора в очаге деформации принимают значения напряжения противодействия ($\sigma_{\text{пд}}$) равным $\sigma_{\text{пд}} = K \cdot \sigma_{\text{вд}}$ при изменении коэффициента K в диапазоне $K = 0,80 \div 0,95$. С увеличением коэффициента K повышается напряжение противодействия и, соответственно, качество зачистки контактных поверхностей улучшается.

Тогда усилие противодействия с учетом (2.11) будет равно:

$$P_{\text{пд}} = K \cdot \sigma_{\text{вд}} \cdot S_{\text{пд}},$$

где $S_{\text{пд}} = \pi(D^2 - d_i^2)/4$ – площадь приложения усилия противодействия, мм².

По найденному усилию противодействия выбирают упругий элемент повышенной жесткости при большом ходе сжатия в пределах его упругой деформации.

Таким образом, в процессе сборки заготовок посредством вдавливания головной заготовки в стержневую при наличии соответствующего противодействия возникает замкнутая силовая система, создающая условия для протекания первой стадии процесса на основе вязкого разрушения металла, не связанного со сколом или мгновенным разрывом межатомных связей в кристаллической решетке [37].

Однако, наличие противодействия недостаточно для получения качественных составных стержневых изделий, получаемых высадкой.

Ранее установлено, что неустойчивость пластической деформации в процессе вдавливания головной заготовки в стержневую делает невозможным получение прочного неразъемного соединения металлических заготовок посредством их совместного пластического деформирования и нарушает требование симметричности расположения волокон в изделии, что также снижает качество продукции.

Важным условием создания устойчивого течения металла в процессе высадки стержневой заготовки является соблюдение требования продольной устойчивости высаживаемой части стержневой заготовки, выражаемого зависимостью:

$$\psi_i = (l_b / d_i) \leq \psi_d, \quad (2.16)$$

где ψ_i и ψ_d – соответственно фактическая и допустимая относительные длины высадки;

l_b – длина высадки стержневой заготовки, мм.

Длину l_b стержневой заготовки находят из соотношения

$$l_b = 4V_b / \pi d_i^2, \quad (2.17)$$

где V_b – объем высаживаемой части стержневой заготовки, мм³;

$$V_b = V_{\Pi} - V_{Г}. \quad (2.18)$$

где V_{Π} и $V_{Г}$ – соответственно объемы поковки и головной заготовки, мм³.

При угле скоса торца стержневой заготовки в пределах от 2° до 6° согласно А.В. Ребельскому допустимая относительная длина высадки равна:

$$\psi_d = 2 + 0,01d_i \leq 2,7. \quad (2.19)$$

Однако, чтобы способствовать монотонному течению металла с образованием симметричного расположения волокон при формировании составного изделия из сборной заготовки, рекомендуется принимать $\psi_d \leq 2,7$ при скосе торца стержневой заготовки, не превышающем 2° [11].

Следует также учесть, что для обеспечения продольной устойчивости стержневой заготовки при вдавливании в нее головной заготовки необходимо

выполнить, кроме соотношения (2.16), еще одно условие: $\sigma_{\text{вд}} < \sigma_{\text{вс}}$. Здесь $\sigma_{\text{вс}}$ – предел прочности стали стержневой заготовки, МПа.

Модель процесса сборки металлических заготовок совместным пластическим деформированием реализована оптимизационным алгоритмом, представленным на рисунке 2.3.

Первый модуль (М1) является информационным, во втором модуле (М2) оптимизируют напряжение вдавливания путем варьирования температуры нагрева головной заготовки, в третьем модуле (М3) оптимизируют напряжения среза и противодействия.

В первом модуле в блоке 1.1 вводят исходную информацию: $D, H, V_{\text{г}}$ – соответственно диаметр, высота и объем головной заготовки, мм; $D_{\text{п}}, H_{\text{п}}$ и $V_{\text{п}}$ – соответственно диаметр, высота и объем поковки, мм; d_i – варьируемый (i) диаметр стержневой заготовки, мм; материалы головной и стержневой заготовок; $T_j \in [T_1, T_{\text{д}}]$ – варьируемая в указанном диапазоне температура нагрева головной заготовки, °С; $T_{\text{д}}$ – допустимая температура нагрева головной заготовки, °С; $\sigma_{\text{вс}}$ – предел прочности стали стержневой заготовки, МПа; h – толщина дна полости в головной заготовке, мм.

В блоке 1.2 ÷ 1.5 определяют геометрические параметры стержневой заготовки.

Далее определяют фактическую (ψ_i) и допустимую ($\psi_{\text{д}}$) относительные длины высадки и проверяют условие продольной устойчивости высаживаемой части стержневой заготовки (блоки 1.6 ÷ 1.8) по формулам (2.16) и (2.19).

Если условие блока 1.8 не выполняется, то увеличивают в допустимом интервале диаметр стержневой заготовки (блоки 1.9), проверяют условие блока 1.10 и осуществляют пересчет в блоках 1.4 ÷ 1.7.

Затем переходят к оптимизации напряжения вдавливания (модуль М2).

В блоке 2.1 устанавливают диапазон варьируемых температур нагрева ($T_j, j = 1, q$) головной заготовки, принимают $j = 1$ (блок 2.2) и переходят к выбору предела прочности ($\sigma_{\text{вг}}$) металла при температуре (T_j) деформации головной заготовки (блок 2.3).

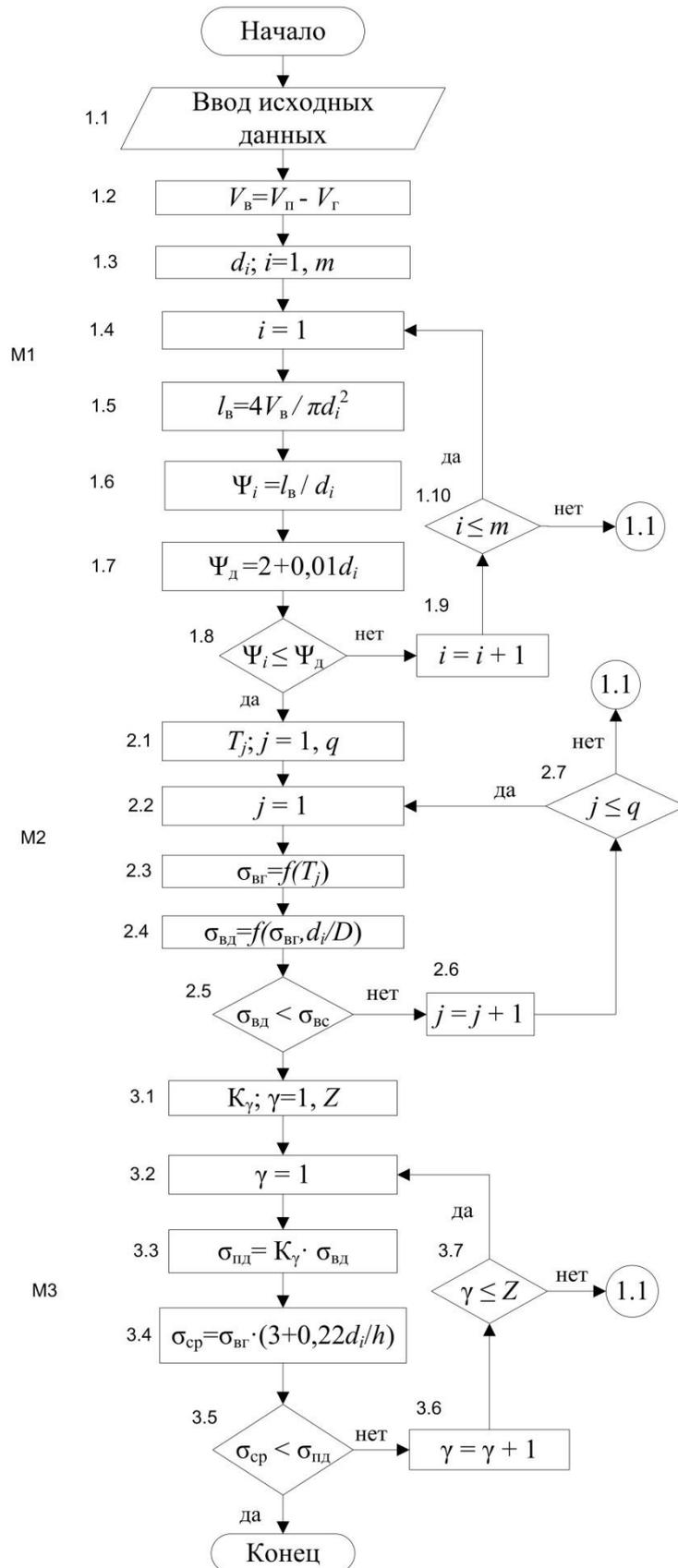


Рисунок 2.3 – Оптимизационный алгоритм процесса сборки металлических заготовок с противодавлением

В блоке 2.4 находят сопротивление деформации при вдавливании головной заготовки в стержневую и проверяют условие $\sigma_{вд} \leq \sigma_{вс}$ (блок 2.5). Если условие не выполняется, то в блоке 2.6 повышают температуру нагрева головной заготовки, проверяют условие допустимости температуры нагрева (блок 2.7) и возвращаются в блок 2.2. Если условие блока 2.5 выполняется, то переходят к третьему модулю (М3).

В блоках 3.1 ÷ 3.3 модуля М3 варьируют $\gamma = 1$, Z в диапазоне $K = 0,80 \div 0,95$, принимают $\gamma = 1$ и устанавливают напряжение противодействия ($\sigma_{пд}$) по формуле $\sigma_{пд} = K_{\gamma} \cdot \sigma_{вд}$.

Далее определяют напряжение среза ($\sigma_{ср}$) по формуле (2.15) и проверяют условие (2.12) (блоки 3.4 ÷ 3.7).

Если условие блока 3.5 выполняется, то результаты регистрируются и функционирование алгоритма завершается. Если условие блока 3.5 не выполняется, то в блоках 3.6 и 3.7 повышают коэффициент противодействия K .

Реализация алгоритма в автоматизированном режиме с использованием компьютерной программы дает возможность оптимизировать ключевые технологические параметры процесса получения составных стержневых изделий с замкнутой силовой схемой с целью минимизации энергосиловых параметров обработки и повышения качества продукции [38].

2.2.2 Технология сборки металлических заготовок совместным пластическим деформированием с глубокой зачисткой контактных поверхностей

Как отмечено в разделе 2.2.1, основной причиной пониженного качества сборки заготовок является неизбежное образование утяжины. Разработанное техническое решение с использованием противодействия [25] существенно улучшает качество зачистки контактных поверхностей при сборке заготовок, а, значит, и качество составных изделий. Однако, в случае использования для головной заготовки материала повышенной прочности [39], прилагаемое усилие противодействия может оказаться недостаточным для исключения утяжины и,

соответственно, глубокой и полной очистки контактных поверхностей от оксидов и других адсорбатов.

В этом случае, а также при использовании стержневых заготовок с пониженным качеством поверхности (коррозия, окалина, пористость и др. дефекты), разработан технологический процесс, в начале которого при вдавливании головной заготовки в стержневую на участке торцевой поверхности головной заготовки, примыкающей к контуру торца стержневой заготовки, формируют обдирочный кольцевой выступ клиновидного сечения, направленный острой вершиной в сторону перемещения головной заготовки. Выступ получают выдавливанием металла в кольцевую полость клиновидной формы. Полость выполнена в опорном кольце, которое опирается на упругий элемент, создающий противодействие в матрице как отмечено в разделе 2.2.1 [29].

Силовые условия формирования кольцевого выступа определяют из соотношения:

$$P_{\text{вд}} > P_{\text{пд}} > P_{\text{кв}}, \quad (2.20)$$

где $P_{\text{вд}}$ – усилие вдавливания головной заготовки в стержневую;

$P_{\text{пд}}$ – усилие противодействия упругого элемента;

$P_{\text{кв}}$ – усилие, необходимое для формирования кольцевого выступа.

Схема реализации технологии сборки металлических заготовок совместным пластическим деформированием с глубокой зачисткой контактных поверхностей представлена на рисунке 2.4.

Стержневую заготовку 1 подают в полость матрицы 2 и центрируют посредством упорного кольца 3, совмещая, при этом, их верхние торцы. Затем, нагретую до ковочной температуры головную заготовку 4 размещают в матрице 2 на торцах упорного кольца 3 и стержневой заготовки 1 (рисунок 2.4, а). Далее пуансоном 5 головную заготовку 4 вдавливают в стержневую заготовку 1. В начале процесса вдавливания в конической полости 6 клиновидной формы, выполненной в опорном кольце 3, которое опирается на упругий элемент 7, формируют кольцевой выступ 8 клиновидного сечения (рисунок 2.4, б).

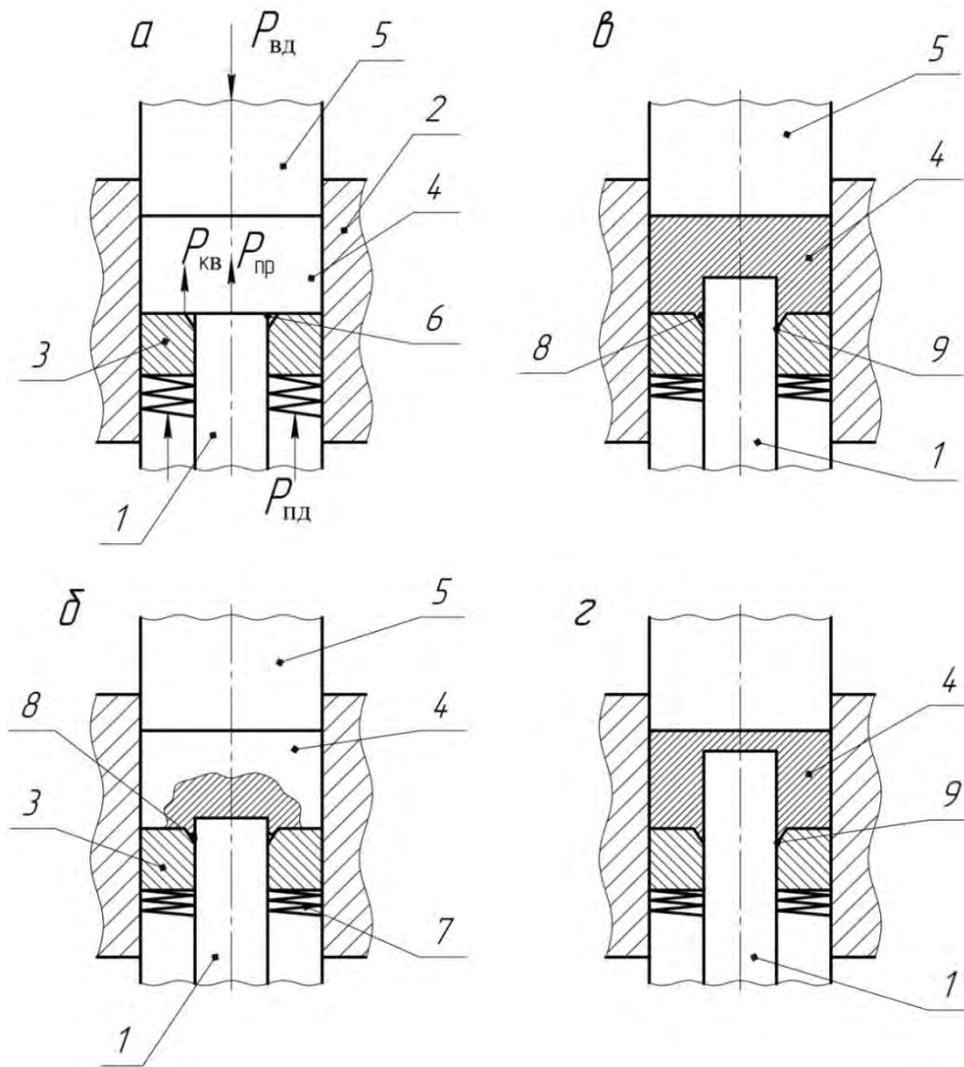


Рисунок 2.4 – Сборка металлических заготовок пластическим деформированием с глубокой зачисткой контактных поверхностей: а – исходное положение заготовок перед сборкой; б – момент образования кольцевого выступа; в – очистка контактной поверхности стержневой заготовки кольцевым выступом в процессе сборки заготовок; г – момент окончания зачистки контактной поверхности (момент завершения сборки металлических заготовок)

При попадании металла в коническую полость 6 температура его мгновенно падает, что обеспечивает получение высокой твердости рабочей кромки 9 кольцевого выступа 8 (рисунок 2.4, б). Затем, при дальнейшем вдавливании головной заготовки 4 в стержневую заготовку 1 рабочей кромкой 9 кольцевого выступа 8 с поверхности стержневой заготовки снимают дефекты, оксиды и другие адсорбаты (рисунок 2.4, в) [29].

Использование сформированного выступа клинового сечения в качестве обдирочного инструмента для удаления поверхностных дефектов и адсорбатов с боковой поверхности стержневой заготовки стало возможным благодаря повышенной твердости утоненной рабочей кромки кольцевого выступа, приобретенной в результате ее резкого охлаждения при контакте с холодной поверхностью стержня [40]:

$$T_{kj} = T_j + (T_{c0} - T_j) \left[\sqrt{\frac{\lambda_{ст} c_{ст} \rho_{ст}}{\lambda_{г} c_{г} \rho_{г}}} / \left(\sqrt{\frac{\lambda_{ст} c_{ст} \rho_{ст}}{\lambda_{г} c_{г} \rho_{г}}} + 1 \right) \right], \quad (2.21)$$

где T_{kj} – температура металла в вершине рабочей кромки кольцевого выступа при температуре T_j , °С;

T_j – варьируемая температура головной заготовки в диапазоне от температуры начала рекристаллизации (T_1) до допустимой температуры (T_d) нагрева металла, т.е. $T_j \in [T_1; T_d]$, °С;

T_{c0} – температура стержневой заготовки, °С;

$\lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности металла стержневой заготовки, Вт/(м·град);

$c_{ст}$ – удельная теплоемкость металла стержневой заготовки, Вт·ч/(кг·град);

$\rho_{ст}$ – плотность металла стержневой заготовки, кг/м³;

$\lambda_{г}$ – коэффициент теплопроводности металла головной заготовки, Вт/(м·град);

$c_{г}$ – удельная теплоемкость металла головной заготовки, Вт·ч/(кг·град);

$\rho_{г}$ – плотность металла головной заготовки, кг/м³.

После падения ковочной температуры нагрева головной заготовки до температуры рабочей кромки кольцевого выступа, выполненного из высоколегированной стали, например, 40X13, сталь приобретает предел прочности, равный примерно $\sigma_{вкi} = 525$ МПа, что значительно превышает предел текучести $\sigma_{тс} = 320$ МПа при 20 °С конструкционной углеродистой стали, например, стали 35, используемой для изготовления стержневой заготовки [44], т.е.

$$\sigma_{вкj} > 1,3\sigma_{тс}. \quad (2.22)$$

Требуемые силовые условия сборки металлических заготовок, в том числе для формирования кольцевого выступа и зачистки контактной поверхности стержневой заготовки, обеспечиваются соотношением (2.20). Угол конуса кольцевого выступа для обдирки мягкой стали составляет 55-60°, для твердой – 70-75° [11].

Для расчета усилия выдавливания кольцевого выступа вначале определяют напряжение течения металла, используя выражение [39]:

$$\sigma_{квj} = \beta \cdot \sigma_{вкj} \frac{h_k}{b - b_1} \ln \frac{b}{b_1}, \quad (2.23)$$

где $\sigma_{квj}$ – напряжение течения металла при формировании кольцевого выступа;

$\sigma_{вкj}$ – предел прочности металла головной заготовки, определяемый по условию $\sigma_{вкj} = f(T_{кj})$;

$\beta = 1,15$ – коэффициент Лодэ;

h_k – высота клиновой канавки, мм;

b – ширина основания клиновой канавки, мм;

b_1 – ширина клиновой канавки при вершине, мм.

Усилие ($P_{кв}$) формирования кольцевого выступа равно

$$P_{кв} = \sigma_{квj} \cdot S_{кв}, \quad (2.24)$$

где $S_{кв}$ – площадь, на которую действует напряжение вдавливания конуса.

$$S_{кв} = \pi[(d_i + 2b)^2 - d_i^2] / 4, \quad (2.25)$$

где d_i – диаметр стержневой заготовки, мм.

Напряжение вдавливания головной заготовки в стержневую определяют, используя формулу 2.14 для закрытой прошивки [36].

Тогда усилие вдавливания ($P_{вд}$) находят по выражению:

$$P_{вд} = \sigma_{вд} \cdot S_{вд}, \quad (2.26)$$

где $S_{вд}$ – площадь, на которую действует напряжение вдавливания головной заготовки в стержневую; $S_{вд} = \pi D_n^2 / 4$.

Модель процесса сборки металлических заготовок совместным пластическим деформированием с использованием обдирочного выступа реализована оптимизационным четырехмодульным алгоритмом, представленным на рисунке 2.5.

Первый модуль (М1) является информационным, во втором модуле (М2) рассчитывают силовые условия деформации, в третьем модуле (М3) оптимизируют напряжение противодействия, в четвертом модуле (М4) определяются силовые условия для эффективного использования клинового выступа.

В первом модуле в блоке 1.1 вводят исходную информацию: $D_{\text{п}}$, $H_{\text{п}}$ и $V_{\text{п}}$ – соответственно диаметр, высота и объем поковки; d_i – варьируемый диаметр стержневой заготовки; материалы головной и стержневой заготовок; $T_j \in [T_1; T_d]$ – варьируемая в установленном диапазоне температура нагрева головной заготовки; T_1 – начальная рекомендуемая температура нагрева головной заготовки, °С; T_d – допустимая температура нагрева головной заготовки, °С; $\sigma_{\text{вг}}$ и $\sigma_{\text{вс}}$ – предел прочности соответственно металлов головной и стержневой заготовок при T_j , °С, МПа; $h_{\text{к}}$, b , b_1 – поперечные размеры клиновой канавки, мм.

Далее выполняют операции, аналогичные блокам 1.2÷1.10 алгоритма, описанного на рисунке 2.3 (формулы (2.16) – (2.19)).

Затем в модуле М2 оптимизируют термомеханические параметры процесса сборки исходных заготовок.

В модуле М3 выполняют операции, аналогичные блокам 3.1÷3.8 алгоритма, представленного на рисунке 2.3. Если условие блока 3.6 не выполняется, то в блоках 3.7 и 3.8 повышают коэффициент противодействия K и проверяют условие $\gamma < Z$, оптимизируя расход энергоресурсов. Если условие блока 3.6 выполняется, то осуществляют переход в четвертый модуль (М4).

В блоке 4.1 определяют величину фактической температуры $T_{\text{к}j}$ рабочей кромки кольцевого выступа в момент начала сборки заготовок по формуле (2.21), затем находят предел прочности металла $\sigma_{\text{вк}j} = f(T_j)$ (блок 4.2) по формуле (2.22) и проверяют условие $\sigma_{\text{вк}j} > 1,3\sigma_{\text{тс}}$ (блок 4.3).

В случае невыполнения условия блока 4.3 повышают температуру нагрева (T_j) головной заготовки на один шаг (блок 4.4). Если условие блока 4.3 выполняется, то в блоке 4.7 по формуле (2.23) находят сопротивление деформации ($\sigma_{кв}$) при формировании кольцевого выступа и в блоках 4.8 и 4.9 определяют площадь основания ($S_{кв}$) кольцевого выступа и находят усилие ($P_{кв}$) формирования кольцевого выступа по формулам (2.24) и (2.25).

В блоке 4.10 проверяют условие $P_{вд} > P_{кв}$. Если условие выполняется, то в блоке 4.13 результаты регистрируются, и функционирование алгоритма завершается.

Если условие блока 4.10 не выполняется, то в блоках 4.11 и 4.12 варьируют ширину b_γ кольцевого выступа, добиваясь снижения сопротивления деформации $\sigma_{кв}$ (см. формулу (2.23)), и проводят перерасчет, начиная с блока 4.7. Затем выполняют печать результатов (блок 4.13).

Варьирование температуры нагрева головной заготовки позволяет оптимизировать энергосиловые параметры процесса сборки заготовок и повысить, тем самым, эффективность получения составных стержневых изделий, а использование обдирочного выступа для глубокой зачистки контактных поверхностей существенно повышает прочность неразъемного соединения сборной заготовки и качество составного изделия.

2.2.3 Технология получения составных стержневых изделий на основе градиентного нагрева заготовок

Предложенная в работе [25] технология получения составных стержневых изделий посредством вдавливания нагретой до ковочной температуры головной заготовки в холодную стержневую заготовку с одновременной сборкой этих заготовок, требующая несколько переходов, невозможна без дополнительного нагрева. Это обусловлено тем, что после выравнивания температур заготовок за счет теплопередачи от головной заготовки температуры металла обеих заготовок становятся ниже ковочных. Дополнительный нагрев сборной заготовки для

формообразования составного изделия вызывает вероятность разрыва металлических связей между контактными поверхностями собранных заготовок вследствие разности их тепловых масс и последующее их окисление, что снижает прочность получаемого неразъемного соединения, а значит, и качество составного изделия. Кроме того, получение составных изделий с дополнительным нагревом не допускает введение совмещенной операции сборки и формообразования составного изделия. Особенно это невозможно при получении тонкостенных оболочек на составном изделии (см. главу 4).

Разработана технология получения составных стержневых изделий сложной формы, требующих два и более переходов, с использованием градиентного нагрева заготовок [29].

При реализации процесса вдавливаемый участок стержневой заготовки подвергают градиентному нагреву, нагревая его большую часть до ковочной температуры, а торцевую часть – за счет теплопередачи. Использование градиентного нагрева стержневой заготовки дает возможность получать низкую температуру торцевой части участка вдавливания стержневой заготовки, необходимую для обеспечения высокой прочности торца стержневой заготовки, работающего при сборке заготовок в качестве прошивня. В то же время можно нагревать до максимально высокой температуры большую часть участка высадки, что обеспечивает после теплопередачи от головной заготовки ковочную температуру металла для последующего деформирования собранных заготовок с соблюдением условий продольной устойчивости стержневой заготовки, описанных в разделе 2.1.

Температуры нагрева головной заготовки 2 и элементов стержневой заготовки 3 определяют с использованием соотношения (рисунок 2.6):

$$\sigma_{\text{вк}}(T_{\text{к}}) > \sigma_{\text{вс}}(T_{\text{с}}) > \sigma_{\text{вг}}(T_{\text{г}}), \quad (2.27)$$

где $\sigma_{\text{вк}}$ – предел прочности металла концевой части $l_{\text{к}}$ участка высадки $l_{\text{в}}$ стержневой заготовки 3, нагреваемой за счет теплопередачи до температуры $T_{\text{тк}}$, МПа;

T_{TK} – температура нагрева металла концевой части l_k участка высадки l_b стержневой заготовки 3 за счет теплопередачи, °С;

σ_{bc} – предел прочности металла нагреваемой до температуры T_c части l_c участка высадки l_b стержневой заготовки, МПа;

T_{cj} – варьируемая температура металла нагреваемой части l_c участка высадки l_b стержневой заготовки, °С; $j=1, m$;

σ_{br} – предел прочности металла головной заготовки 2 при варьируемой ковочной температуре T_{rs} , МПа; $s = 1, p$.

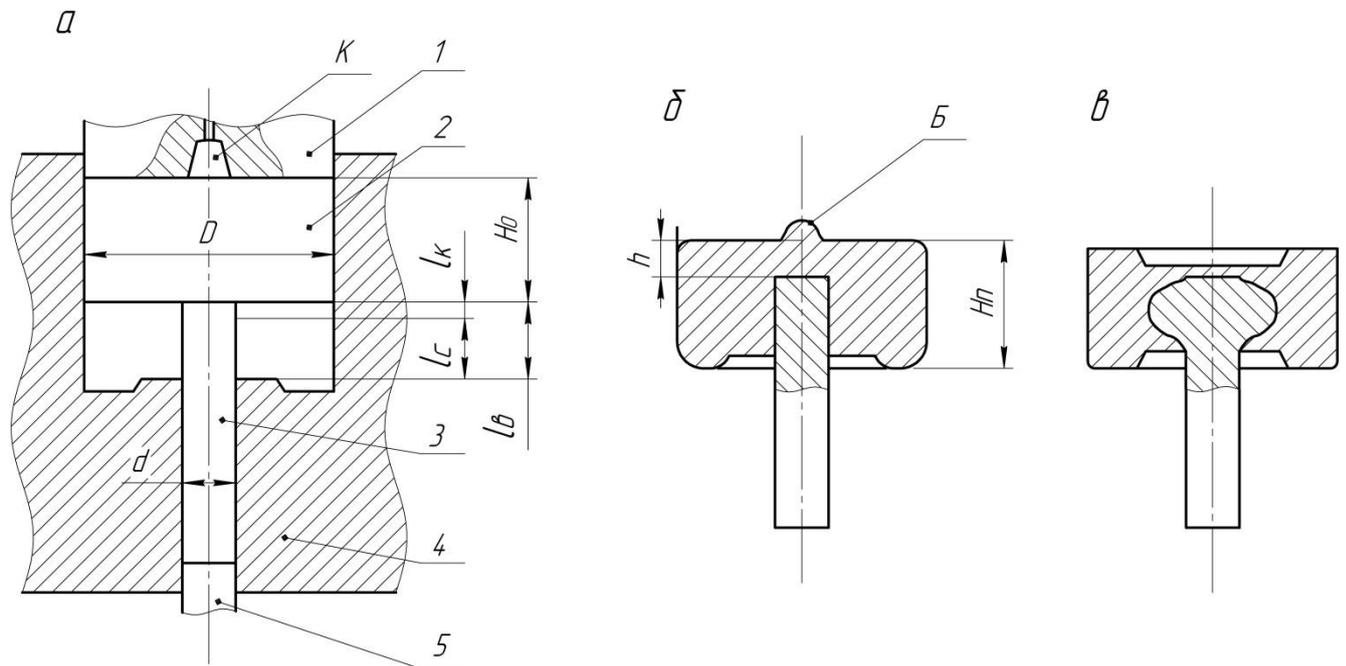


Рисунок 2.6 – Схема двухпереходного формирования составного стержневого изделия с использованием градиентного нагрева заготовок:

а – исходное положение штампа; б – сборная заготовка после первой стадии процесса (первый переход); в – составное изделие после второй стадии процесса (второй переход): 1 – пуансон; 2 – головная заготовка; 3 – стержневая заготовка; 4 – матрица; 5 – выталкиватель; К – компенсационная полость; Б - бобышка

В случае использования градиентного нагрева заготовок при получении составных стержневых изделий в два и более переходов возникают проблемные задачи: 1) необходимость обеспечить условие продольной устойчивости

внедряемого в головную заготовку 2 нагретого участка высадки l_b стержневой заготовки 3 (рисунок 2.6, а) и 2) установить рациональные термомеханические параметры процесса штамповки [41].

Для выполнения первой задачи используют соотношения (2.16) ÷ (2.18) и (2.27).

При решении второй задачи в технологическом процессе с использованием градиентного нагрева стержневой заготовки оптимизируют теплофизические и механические свойства деформируемого металла обеих заготовок. Моделирование процесса оптимизации проведено на примере получения составного зубчатого колеса с осью (рисунок 2.6), которое может быть использовано в качестве поковки ведущего колеса дифференциала автомобиля [42].

Получение составного изделия типа зубчатого колеса с осью с одним нагревом исходных заготовок осуществляют в два перехода (рисунок 2.6): первый переход – получение сборной заготовки (рисунок 2.6, б) с удалением избытка металла в компенсационную полость К (рисунок 2.6, а) с образованием бобышки Б (рисунок 2.6, б) и второй переход – формообразование составного изделия (рисунки 2.6, в).

Реализация градиентного нагрева связана с выполнением ряда жестких условий.

Во-первых, необходим высокий нагрев участка l_c стержневой заготовки 3, (рисунок 2.6, а), чтобы обеспечить достижение ковочной температуры участка высадки l_b (рисунок 2.6, а) перед формообразованием поковки (второй переход процесса) за счет теплопередачи от головной заготовки 2 (рисунок 2.6, б).

Однако, повышенная температура нагрева участка l_c стержневой заготовки 3 вызывает: а) риск потери продольной устойчивости стержневой заготовки 3, работающей в первой стадии процесса в качестве прошивня; б) вероятность возникновения пластической деформации и смятия кромок торца нагреваемого за счет теплопередачи участка l_k стержневой заготовки 3 в процессе ее внедрения в головную заготовку, что также недопустимо (рисунок 2.6, б).

Во-вторых, головная заготовка 2 с целью экономии энергии и снижения степени окисления контактных поверхностей при повышенном нагреве, должна нагреваться перед сборкой заготовок (первый переход) до минимальной температуры, но превышающей температуру рекристаллизации, так как высоколегированные стали имеют повышенное сопротивление деформации и пониженный, как правило, ресурс пластичности, и, в то же время, иметь достаточный температурный потенциал для нагрева участка l_b стержневой заготовки 3 до ковочной температуры в составе сборной заготовки (рисунок 2.6, б) за счет теплопередачи перед второй стадией процесса (рисунок 2.6, в).

Для практических расчетов примем, что повышение температуры нагрева участка высадки (l_b) стержневой заготовки 3 за счет теплопередачи соответствует примерно величине падения температуры (ΔT_r) головной заготовки 2 за время $\tau_{ц}$, предшествующее второй стадии процесса формообразования поковки.

Процесс оптимизации термомеханических параметров получения составных стержневых поковок может быть описан иерархической гибридной моделью.

Построение математической модели осуществляется в следующем порядке [43].

В начале процесса моделирования определяют объем высаживаемой части (V_b) стержневой заготовки по формуле (2.18).

Далее рассчитывают длину l_b , внедряемого в головную заготовку 2 участка стержневой заготовки 3, по формуле (2.17) и находят относительную длину высадки Ψ_i по формуле (2.16), учитывая соотношение (2.27).

Допустимую относительную длину высадки (Ψ_d) при угле (β) скоса торца заготовки от 2° до 6° определяют по формуле (2.19), принимая $\Psi_d \leq 2,7$.

Затем устанавливают время (τ_n) нагрева стержневой заготовки и время (τ_t) транспортировки заготовки после нагрева, включая время вылеживания в штампе до момента внедрения ее в головную заготовку, и рассчитывают время ($\tau_{ц}$) цикла штамповки

$$\tau_{ц} = \tau_n + \tau_t. \quad (2.28)$$

Условием качественной сборки исходных заготовок 2 и 3 является соотношение (2.27).

При решении второй задачи моделирования процесса – оптимизации термомеханических параметров градиентного нагрева заготовок – вначале определяют величину смещения l_k зоны нагрева от торца концевой участка с учетом времени нагрева и транспортировки $\tau_{ц}$ заготовок к штампу при условии получения необходимой температуры торца стержневой заготовки. Для большинства конструкционных сталей температура установлена в пределах 350-450 °С. В этом диапазоне температура незначительно снижает предел прочности конструкционных сталей [44], что обеспечивает необходимое для внедрения в головную заготовку сопротивление деформации металла в приконтактной с головной заготовкой области l_k стержневой заготовки. Кроме того, при $T_k \leq 350$ °С для большинства конструкционных сталей пластичность очень низка, температурная зависимость пластичности при 350 °С имеет минимум [37].

При бóльшем нагреве ($T_k > 450$ °С) прочность сталей существенно уменьшается, что повышает вероятность смятия кромок торца l_k стержня в связи с резким снижением сопротивления деформирования торцевого слоя металла заготовки.

Ниже приведен расчет теплофизических параметров нагрева заготовок. Вначале определяют параметры температурного поля.

При $l_c \gg l_k$ решение для температурного поля имеет вид [40]:

$$T = T_c - \frac{T_c}{2} \left(\operatorname{erf} \frac{l_c + l_k}{2\sqrt{a\tau_{ц}}} - \operatorname{erf} \frac{l_c - l_k}{2\sqrt{a\tau_{ц}}} \right), \quad (2.29)$$

где T – изменение температуры по длине заготовки, °С,

a – температуропроводность, м²/с.

Для торца заготовки при $l_c = 0$ и $T = T_k$ (350+450 °С – по условию) с учетом $\operatorname{erf}(-z) = -\operatorname{erf}(z)$ и выражения (2.27) находят температурный параметр θ :

$$\theta = \frac{T_c - T_k}{T_c} = \operatorname{erf} \frac{l_k}{2\sqrt{a\tau_{ц}}} = \Phi \left(\frac{l_k}{2\sqrt{a\tau_{ц}}} \right), \quad (2.30)$$

где $\Phi(z)$ – интеграл вероятности, табулированная функция.

Задавая T_c и T_k , определяют θ и получают значение выражения $\frac{l_k}{2\sqrt{a\tau_{ц}}}$.

Далее, задавая a и $\tau_{ц}$, рассчитывают величину смещения зоны нагрева l_k от торца заготовки.

На основании полученных данных с точностью до 10% в диапазоне

$$0,56 < \theta < 0,83 \quad (2.31)$$

величину l_k можно рассчитывать по простой аппроксимации

$$l_k = 1,5\sqrt{2a\tau_{ц}} \cdot \frac{T_c - T_k}{T_c} = 1,5\sqrt{2a\tau_{ц}} \cdot \theta \quad [45]. \quad (2.32)$$

Однако, без обоснованного расчета технологических параметров процесса, учитывающего теплофизические и механические свойства штампуемого металла, при градиентном нагреве невозможно получить удовлетворительные результаты.

Поэтому вначале определяют значение $\tau_{н}$ по формуле:

$$\tau_{н} = c \cdot \rho \cdot \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \cdot \frac{l_b}{W_{н}} \cdot (T_c - T_0) = c \cdot \frac{M}{W_{н}} \cdot (T_c - T_0), \quad (2.33)$$

где c – теплоемкость стали в интервале температур от $T_0 = 20$ °С до T_c ;

ρ – плотность стали, кг/м³;

M – масса утолщения, кг;

$W_{н}$ – мощность нагревателя, кВт.

Затем, с целью упрощения практического использования зависимости (2.32) расчетную схему нагрева стержневой заготовки представляют в виде номограммы [45], в которую внесены корректировки соответственно материалам, используемым для составных изделий. В частности, включены теплофизические параметры жаропрочных и нержавеющей сталей (рисунок 2.7).

По номограмме, используя значение $\tau_{ц}$, a и θ , определяют величину смещения l_k при нагреве участка l_c до температуры T_c без учета охлаждения заготовки и передачи тепла к торцу за время нагрева $\tau_{н}$ (см. ключ на рисунке 2.7).

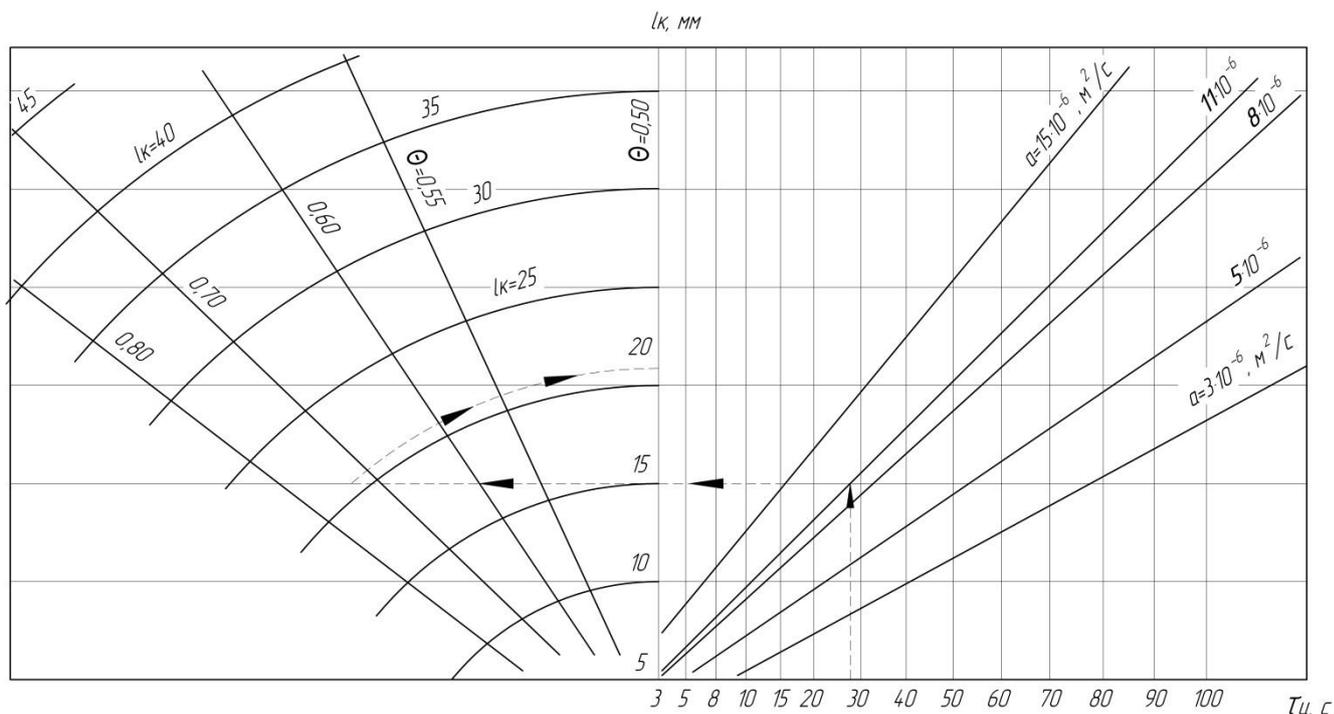


Рисунок 2.7 – Номограмма для определения тепловых параметров нагрева заготовок

Для повышения точности расчета в формулу (2.32) введены поправочные коэффициенты, учитывающие особенности теплообмена в заготовке в зависимости от параметров процесса:

$$l_k' = K_{\text{тн}} \cdot K_{l_c} \cdot K_{\text{охл}} \cdot l_k, \quad (2.34)$$

где l_k' – величина смещения участка нагрева с учетом поправочных коэффициентов; $K_{\text{тн}}$, K_{l_c} , $K_{\text{охл}}$ – аналитические поправочные коэффициенты, учитывающие соответственно время нагрева заготовки, длину нагреваемого участка и охлаждения заготовки с поверхности. Коэффициенты $K_{\text{тн}}$ и K_{l_c} представлены в виде номограммы (рисунок 2.8), коэффициент $K_{\text{охл}}$ рассчитывают по формуле [45]:

$$K_{\text{охл}} = 1 - 2 \cdot \frac{\alpha \cdot \tau_{\text{ц}}}{c \cdot \rho \cdot d_i}, \quad (2.35)$$

где α – коэффициент теплопередачи.

На основании полученных зависимостей управления процессом заполнения полости штампа (см. раздел 2.2) и оптимизации термомеханических параметров

градиентного нагрева стержневых заготовок, спроектирована обобщенная модель управления процессом двухпереходной штамповки составных стержневых изделий, которая имеет практическую направленность.

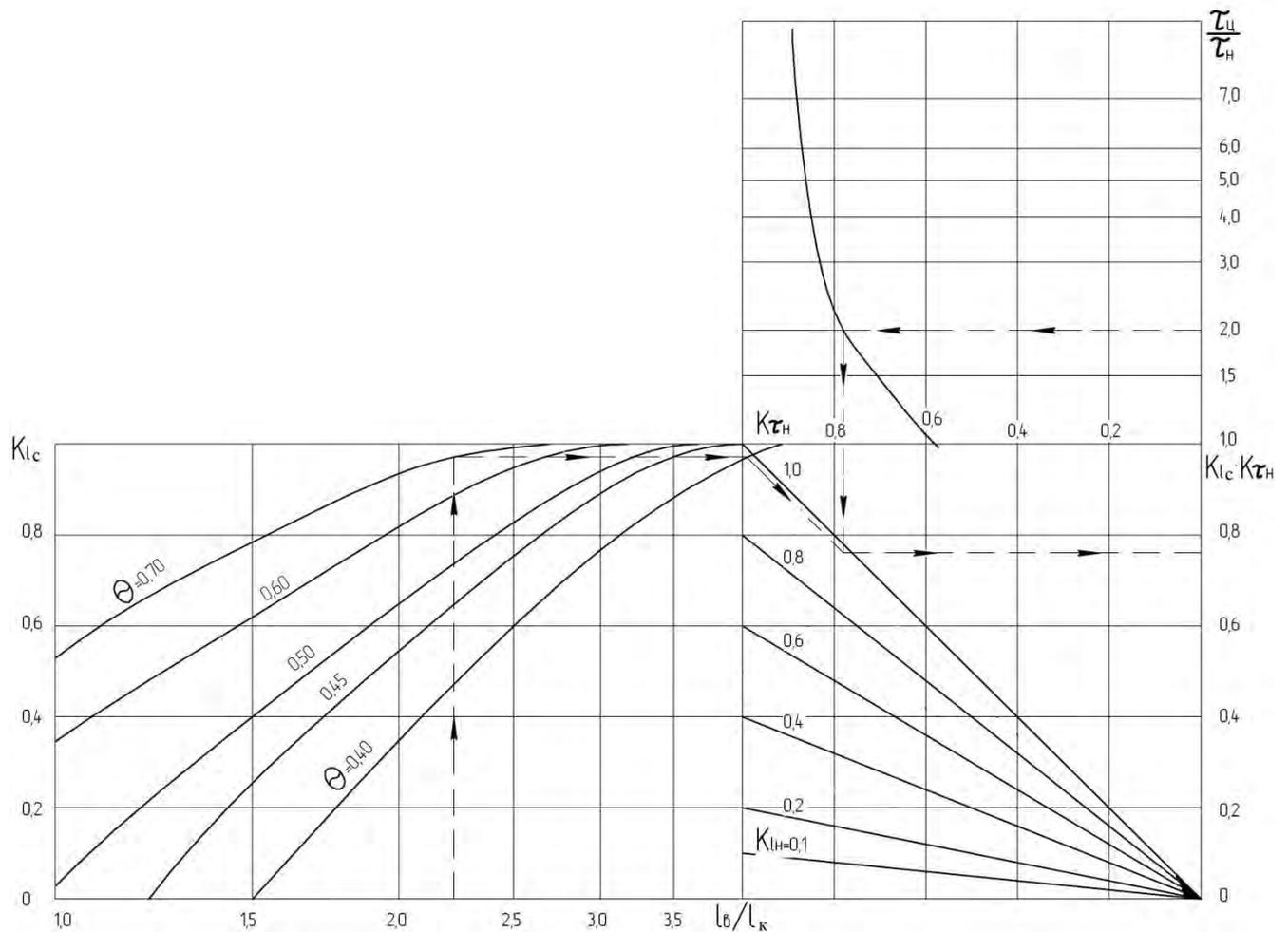


Рисунок 2.8 – Номограмма для определения параметров нагрева стержневой заготовки с учетом теплообмена

Для выполнения условия (2.27) рассчитывают сопротивление деформации ($\sigma_{пр}$) при глухой прошивке головной заготовки 2, используя выражение [46]:

$$\sigma_{пр} = \sigma_{вр} \left(1 + \frac{\mu \cdot d_i}{3h} + \beta \cdot \ln \frac{D}{d_i} \right), \quad (2.36)$$

где $\sigma_{вр}$ – предел прочности материала головной заготовки 2 при температуре окончания прошивки, МПа;

$\mu = 0,5$ – показатель трения при горячей штамповке;

d_i – диаметр прошивня (стержневой заготовки 3), мм;

h – толщина дна полости в головной заготовке 2, мм;

$\beta=1,15$ – коэффициент Лодэ;

D – диаметр головной заготовки 2, мм.

Монотонность течения металла головной 2 и участка l_b стержневой заготовки 3, гарантирующая качественное соединение заготовок по контактными поверхностям при их совместном деформировании в процессе формообразования поковки, обеспечивается в первом приближении равенством сопротивлений деформации металлов заготовок [47, 48], т.е.

$$\sigma'_{вг}(T'_г, ^\circ\text{C}; \varepsilon_г, \%) = \sigma'_{вс}(T'_с, ^\circ\text{C}; \varepsilon_с, \%), \quad (2.37)$$

где $\sigma'_{вг}$ и $\sigma'_{вс}$ – соответственно сопротивление деформации металла головной заготовки 2 и металла высаживаемого участка (l_b) стержневой заготовки 3, МПа;

$T'_г, ^\circ\text{C}$ и $T'_с, ^\circ\text{C}$ – соответственно температуры нагрева металла головной заготовки 2 и участка высадки l_b стержневой заготовки 3 к моменту выполнения второй стадии процесса;

$\varepsilon_г$ и $\varepsilon_с$ – соответственно степени деформации заготовки 2 и участка l_b стержня 3.

Для выполнения условия (2.37) вначале оценивают величину падения температуры нагрева металла головной заготовки 2 за время выполнения первой стадии процесса и повышения температуры металла участка высадки (l_b) стержня 3 за счет теплопередачи, используя, например, эмпирическую зависимость Я.М. Охрименко:

$$\Delta T = \frac{\tau'_{ц}}{0,006D}, ^\circ\text{C}, \quad (2.38)$$

где ΔT – временной градиент изменения температуры металла за период выполнения первой стадии ($\tau'_{ц}$, с).

По найденным значениям температуры нагрева металла головной заготовки 2 и участка высадки l_b стержня 3 и степени деформации металла этих элементов сборной заготовки, обеспечивающим условие (2.37), определяют сопротивление деформации поковки, например, по формуле [44]:

$$\sigma_{B_i} = \sigma_{B_0} + 1,6\varepsilon_i^{0,76}, \quad (2.39)$$

где σ_{B_i} – сопротивление деформации металла поковки, соответствующее в данном случае значениям σ'_{BF} и σ'_{BC} ;

σ_{B_0} – сопротивление деформации металла заготовок, соответствующее моменту окончания сборки заготовок или начальному моменту формообразования поковки.

Согласно закону Курнакова Н.С. температурную зависимость сопротивления деформации ($\sigma_{п.в.}$) описывают показательной функцией [45]:

$$\sigma_{B_i} = \sigma_{B_0} \cdot e^{\alpha(T_n - T)}, \quad (2.40)$$

где σ_{B_i} и σ_{B_0} – сопротивления деформации (предел прочности) металла соответственно в текущий и начальный моменты времени, МПа;

α – температурный коэффициент; для одно- и многофазных систем $\alpha = 0,0085$, для твердых сплавов $\alpha = 0,008 \div 0,012$;

T и T_n – температура металла соответственно в текущий и начальный моменты времени, °С.

Формулу (2.40) обычно выражают уравнением:

$$\sigma_{B_i} = \sigma_{B_0} \cdot e^m = \sigma_{B_0} \cdot \left(1 + m + \frac{m^2}{2}\right), \quad (2.41)$$

где $m = \alpha (T_n - T)$.

Однако, более точные результаты расчетов можно получить, если соотношение термомеханических параметров (2.41) аппроксимировать параболической зависимостью:

$$\sigma_{B_i} = \sigma_{B_0} \cdot \left(1 + \frac{m}{3}\right)^2. \quad (2.42)$$

Обобщенная математическая модель управления процессом двухпереходной штамповки составных стержневых изделий реализована пятимодульным алгоритмом, представленным на рисунке 2.9.

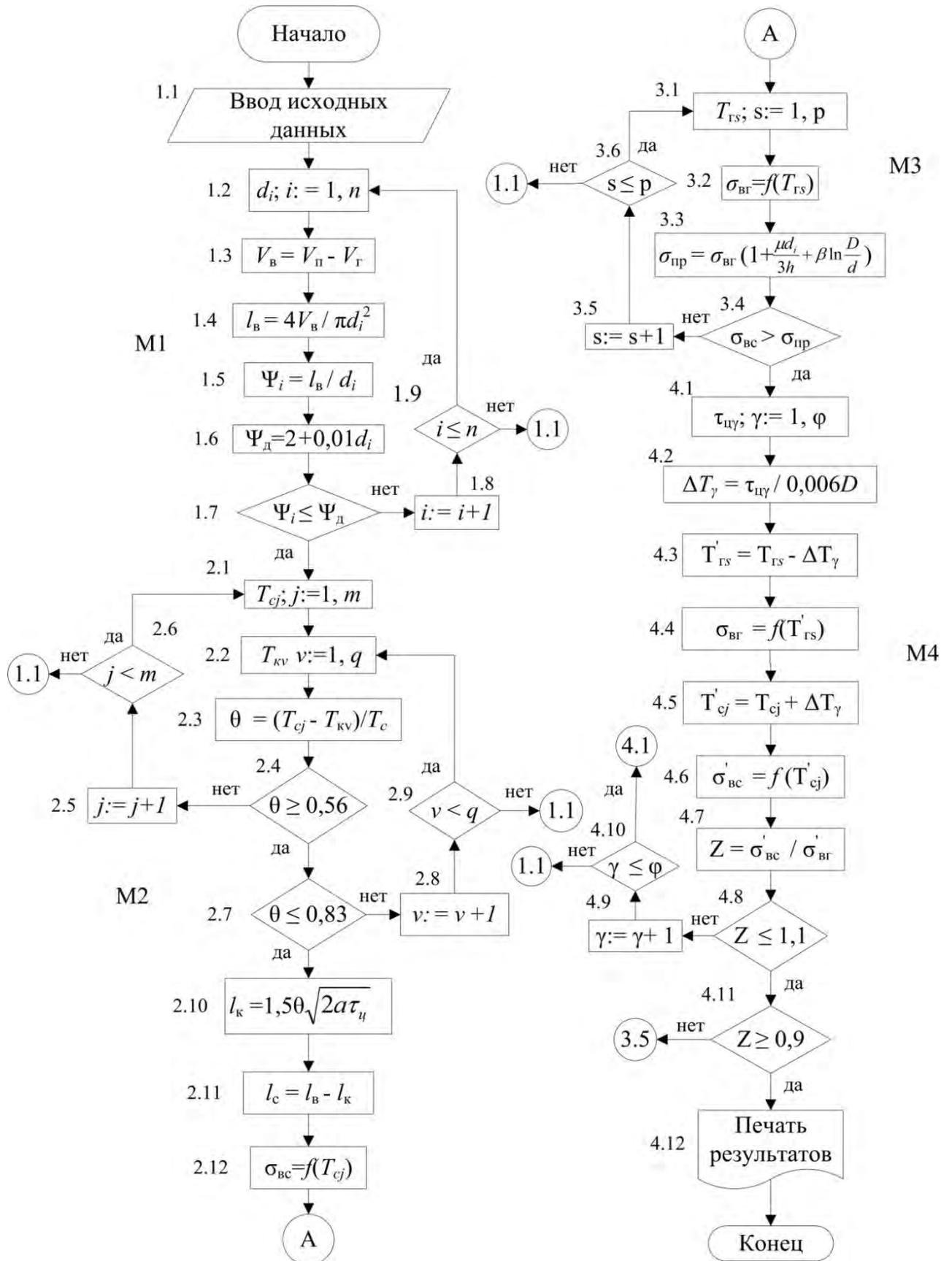


Рисунок 2.9 – Оптимизационный алгоритм управления процессом двухпереходной штамповки составного изделия на основе градиентного нагрева исходных заготовок

Первый модуль (М1) – информационный, второй модуль (М2) оптимизирует теплофизические параметры градиентного нагрева заготовок, третий модуль (М3) обеспечивает условие продольной устойчивости стержня и оптимизирует силовые условия сборки исходных металлических заготовок на основе их градиентного нагрева, четвертый модуль (М4) обеспечивает выравнивание сопротивлений деформации металлов головной и стержневой заготовок при совместном их деформировании в процессе формирования составного изделия.

В первом модуле в блок 1.1 вводят исходную информацию: D , H , V_{Γ} – соответственно диаметр, высота и объем головной заготовки; D_{Π} , H_{Π} и V_{Π} – соответственно диаметр, высота и объем поковки; d_i и l , – варьируемый диаметр и длина стержневой заготовки; μ , α , c и ρ – соответственно показатель трения, температуропроводность, удельная теплоемкость и плотность металла заготовок при температурах нагрева; T_c – варьируемая температура нагрева участка l_c стержневой заготовки, T_k – варьируемая температура концевой части стержня; и T_{Γ} – варьируемая температура нагрева головной заготовки; M_c и M_{Γ} – марки стали стержневой и головной заготовок [51]; $\tau_{\text{цв}}$ – время цикла штамповки.

В блоках 1.2 ÷ 1.4 задают возможный для конкретного изделия диапазон размеров диаметра (d_i) стержневой заготовки, определяют объем (V_B) высаживаемой (внедряемой) части стержня по формуле (2.18) и находят длину (l_B) высаживаемой части стержня по формуле (2.17).

Далее определяют фактическую (ψ_i) (формула (2.16)) и допустимую (ψ_d) (формула (2.19)) относительные длины высадки и проверяют условие продольной устойчивости высаживаемой части стержневой заготовки (блоки 1.5 ÷ 1.7). Если условие блока 1.7 не выполняется, то берут следующий, бóльший по размеру диаметр стержневой заготовки (блок 1.8) и осуществляют после проверки условия $i < n$ (блок 1.9) пересчет в блоках 1.2 ÷ 1.7. Если условие 1.7 выполняется, то в модуле М2 переходят к оптимизации теплофизических параметров градиентного нагрева заготовок.

В блоках 2.1 ÷ 2.3 устанавливают вариации ($j:=1, m$ и $v:=1, q$) температур нагрева участков $l_c (T_c)$ и $l_k (T_k)$ стержневой заготовки и находят температурный параметр θ по формуле (2.30).

В блоках 2.4 и 2.7 проверяют условие (2.31).

В зависимости от полученного результата повышают температуру нагрева участка l_c или концевой части l_k (блоки 2.5 и 2.8) стержневой заготовки и пересчитывают температурный параметр θ (блоки 2.1 – 2.3).

Если температурный параметр θ удовлетворяет условию (2.31), то переходят к расчету величины смещения l_k зоны нагрева от торца концевого участка по формуле (2.32) (блок 2.10), затем определяют длину нагреваемого участка l_c по формуле (блок 2.11):

$$l_c = l_b - l_k. \quad (2.43)$$

В блоке 2.12 находят предел прочности ($\sigma_{вс}$) стержневой заготовки в момент начала деформации.

В блоках 3.1 и 3.2 модуля М3 вводят информацию о температуре (T_r) нагрева головной заготовки и о возможных ее вариациях ($s = 1, p$) в допустимом диапазоне, затем по температуре T_r находят предел прочности ($\sigma_{вг}$).

В блоках 3.3 и 3.4 рассчитывают сопротивление деформации ($\sigma_{пр}$) по формуле (2.36) и проверяют условие:

$$\sigma_{вс} > \sigma_{пр}. \quad (2.44)$$

Если условие блока 3.4 не выполняется, то повышают температуру нагрева головной заготовки (блок 3.5) и проводят перерасчет параметров в блоках 3.1 ÷ 3.3 до выполнения условия продольной устойчивости стержневой заготовки (блок 3.4).

При выполнении условия блока 3.4 переходят к выравниванию сопротивлений деформации металлов головной и стержневой заготовок в модуле М4.

В блоке 4.1 вводят вариацию величины временного градиента ($\gamma:=1, \phi$) и определяют величину падения температуры металла (ΔT_γ) головной заготовки при выполнении первой стадии процесса с помощью эмпирической формулы

Я.М. Охрименко (блок 4.2). Затем, в блоке 4.3 находят фактическую температуру металла ($T_{гс}$) головной заготовки с учетом градиента изменения температуры ΔT_{γ} за период выполнения первой стадии процесса.

Далее, в блоках 4.4 ÷ 4.6 определяют предел прочности ($\sigma'_{вг}$) металла головной заготовки с учетом падения ее температуры нагрева ($T'_{гс}$) при выполнении первой стадии процесса, находят температуру нагрева ($T'_{сj}$) металла стержневой заготовки в поковке с учетом теплообмена с головной заготовкой и предел прочности ($\sigma'_{вс}$) металла стержневой заготовки в зависимости от температуры нагрева ($T'_{сj}$) к моменту выполнения второй стадии процесса.

Затем, в блоках 4.7 ÷ 4.11 определяют показатель (Z) равенства сопротивлений деформации металла стержневой ($\sigma'_{вс}$) и головной ($\sigma'_{вг}$) заготовок (с 10-ти процентным колебанием) как одно из условий создания монотонного течения металла при формировании составного изделия, и проверяют выполнение показателя Z :

$$0,9 < Z < 1,1. \quad (2.45)$$

Если условие блоков 4.8 и 4.11 не выполняется, то повышают время выполнения первой стадии ($\tau_{щ}$) (блок 4.10) или температуру нагрева ($T_{гс}$) головной заготовки (блок 3.5) и осуществляют перерасчет. Если условие блоков 4.8 и 4.11 выполняется, то технологические параметры, обеспечивающие качественное формирование составного изделия, отправляются на печать.

Выводы

1. Разработаны оптимизационные математические модели управления инновационными процессами штамповки составных изделий из сборных заготовок, получаемых совместным пластическим деформированием, на основе использования противодействия, градиентного нагрева и глубокой зачистки исходных заготовок.

2. Модели представлены многомодульными оптимизационными алгоритмами управления поиском рациональных термомеханических параметров штамповки с целью обеспечения качества составных изделий и минимизации энергоемкости процессов; алгоритмы реализованы компьютерными программами, которые успешно прошли апробацию.

3. Предварительные металлографические исследования образцов составных поковок стержневого зубчатого колеса показали удовлетворительное качество сварных соединений.

Глава 3 Экспериментальное исследование процессов сборки металлических заготовок и формообразования составного изделия

3.1 Постановка задач исследования

Для оптимизации производства составных изделий из сборных заготовок, получаемых совместным пластическим деформированием исходных заготовок, необходимо построить математическую модель процесса на основе результатов экспериментальных исследований.

Как известно, математические модели могут быть детерминированными и вероятностными. В детерминированных моделях каждый фактор может принимать определенные фиксированные значения в любых заданных условиях. Реальные условия отражают вероятностные модели, в которых допускается неопределенность значений входных величин (факторов) и выходных параметров, а также ограничений (допустимых значений факторов). Поэтому вероятностные модели являются наиболее предпочтительными [50,51].

Для исследования многофакторного технологического процесса сборки заготовок по результатам эксперимента построена вероятностная математическая модель с использованием статистических методов планирования эксперимента [52].

Построение вероятностной модели проведено в следующей последовательности:

- 1) сделан анализ исследуемого процесса;
- 2) формализована структура и содержание процесса сборки исходных заготовок;
- 3) выбраны параметр оптимизации и ключевые управляемые величины (факторы), влияющие на изменение параметра оптимизации процесса;
- 4) принято в общем виде уравнение регрессии (модель процесса);
- 5) установлены ограничения;
- 6) выбран план факторного эксперимента;

- 7) разработана и изготовлена экспериментальная установка;
- 8) проведена наладка экспериментальной установки;
- 9) проведена экспериментальная работа;
- 10) обработаны результаты экспериментов;
- 11) проведена проверка полученной модели на адекватность.

При организации эксперимента установлено необходимое минимальное число опытов и условий их проведения, выбран метод математической обработки результатов опытов и принятия решений.

С использованием теории планирования проведено планирование экстремального эксперимента, когда выбор числа и условий проведения опытов, минимально необходимых для нахождения экстремальных значений, осуществляли с помощью метода Бокса-Уилсона, называемого методом крутого восхождения.

Метод Бокса-Уилсона предусматривает проведение опытов небольшими сериями. В каждой серии одновременно варьировали все факторы по определенным правилам. Опыты проводили так, чтобы после математической обработки результатов предыдущей серии можно было спланировать следующую серию опытов [52].

Планирование экспериментов начато с выбора параметра оптимизации, по которому оптимизирован процесс сборки исходных металлических заготовок. При этом учтено, что параметр оптимизации должен быть однозначным, т.е. заданному набору значений факторов должно соответствовать одно значение параметра оптимизации с точностью до ошибки эксперимента. В то же время параметр оптимизации должен быть универсальным или полным, т.е. способным всесторонне охарактеризовать исследуемый процесс сборки заготовки. Универсальностью обладает, например, обобщенный параметр оптимизации, который строят как функцию от нескольких частных параметров. Необходимо, чтобы параметр оптимизации был практически значимым, был простым и легко вычисляемым по совокупности факторов, принимающих определенные значения,

воздействуя на процесс сборки металлических заготовок совместным пластическим деформированием.

В результате анализа процесса сборки и формализации его содержания параметром оптимизации (объектом исследования) выбран показатель качества сборки металлических заготовок совместным пластическим деформированием, равный отношению площадей прочного соединения контактных поверхностей исходных заготовок к общей площади их контакта (λ):

$$\lambda = S_k / S_o, \quad (3.1)$$

где S_k и S_o – соответственно площадь полученного прочного соединения заготовок и общая площадь контакта.

С целью упрощения расчета показателя λ отношение площадей контакта заменено отношением длин участков прочного соединения заготовок к общей длине их контакта в диаметральной плоскости разреза сборной заготовки, т.е.

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^m l_{сб_i}}{\sum_{j=1}^n l_{об_j}}, \quad (3.2)$$

где m и n – соответственно количество участков схватывания металлов заготовок ($l_{сб}$) и общее количество участков контакта заготовок ($l_{об}$);

i и j – номера участков контакта.

Показатель качества сборки (λ) зависит от ряда ключевых технологических параметров и может быть представлен в общем виде уравнением:

$$\lambda = f(T_r, d_i, D, P_{вд}, P_{пд}), \quad (3.3)$$

где T_r – температура нагрева головной заготовки, °С;

d_i и D – соответственно диаметры стержневой и головной заготовок, мм;

$P_{вд}$ и $P_{пд}$ – соответственно усилие вдавливания головной заготовки в стержневую и усилие противодействия, МН.

Тогда математическую модель процесса сборки металлических заготовок с достаточной точностью можно аппроксимировать полиномом второй степени:

$$\lambda = C \cdot T^\alpha \cdot W^\beta \cdot Q^\gamma, \quad (3.4)$$

где C – свободный коэффициент полинома;

T – температурный фактор, °C;

$W = d_i/D$ – геометрический фактор, мм;

$Q = P_{\text{пд}} / P_{\text{вд}}$ – силовой фактор, МН;

α , β и γ – показатели степени полинома.

После логарифмирования уравнение регрессии (3.4) линеаризуется:

$$\ln\lambda = \ln C + \alpha \ln T + \beta \ln W + \gamma \ln Q. \quad (3.5)$$

Возможность аппроксимации уравнения (3.3) полиномом (3.4) устанавливается проверкой гипотезы адекватности линейной модели при выражении результатов эксперимента линейным полиномом

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{13}x_1x_3 + \dots \quad (3.6)$$

где $y = \ln\lambda$; $b_0 = \ln C$; $b_{1,2,3}$ – коэффициенты факторов; x_1 , x_2 и x_3 – кодированные значения факторов.

С целью минимизации числа опытов принят план эксперимента 2^{3-1} (полуреплика плана 2^3), предусматривающий проведение четырех опытов. Определяющим контрастом полуреплики является соотношение

$$1 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3, \quad (3.7)$$

где $x_3 = x_1 \cdot x_2$ – третий фактор, принятый вместо малозначимого эффекта взаимодействия.

Принятые уровни факторов приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Факторы и их уровни

Факторы	Кодовое обозначение факторов	Уровни факторов		
		верхний +1	основной 0	нижний -1
$T, \text{ }^\circ\text{C}$	x_1	1200	1000	800
W	x_2	0,60	0,40	0,20
Q	x_3	0,90	0,50	0,10

Кодированное значение факторов определяли по выражению:

$$x_i = \frac{2(\ln \bar{x}_i - \ln \bar{x}_i^6)}{\ln \bar{x}_i^6 - \ln \bar{x}_i^H} + 1, \quad (3.8)$$

где x_i – кодированное значение i -го фактора; \bar{x}_i – натуральное значение i -го фактора; \bar{x}_i^6 – натуральное значение верхнего уровня i -го фактора; \bar{x}_i^H – натуральное значение нижнего уровня i -го фактора.

Таблица 3.2 – Матрица планирования эксперимента

№ опыта	x_0	x_1 T	x_2 W	x_3 Q
1	+	-	-	+
2	+	+	-	-
3	+	-	+	-
4	+	+	+	+

Значения факторов в каждом опыте даны в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Значения факторов в каждом опыте

Значения факторов	Номер опыта			
	1	2	3	4
T/ x_1	800/6,8	1200/7,0	800/6,8	1200/7,0
W/ x_2	0,2/-1,61	0,2/-1,61	0,6/-0,51	0,6/-0,51
Q/ x_3	0,9/-0,1	0,1/-2,3	0,1/-2,3	0,9/-0,1

3.2 Условия проведения опытов

3.2.1 Материалы, образцы, оборудование

Для проведения эксперимента взяты стали, принадлежащие к разным классам. Стержневые заготовки были изготовлены из углеродистой стали обыкновенного качества Ст3 по ГОСТ 380-2005 (прокат по ГОСТ 2590-2006),

головные заготовки из нержавеющей стали (коррозионно-стойкая мартенситного класса) 40X13 по ГОСТ 5632-72 (прокат по ГОСТ 2590-2006).

Физические и механические свойства применяемых сталей найдены в работе [49].

Размеры головной заготовки: $D = 39$ мм; $H = 20$ мм; стержневой заготовки: $d = 7,8$ мм и $23,4$ мм; длина $l = 65$ мм соответственно таблице 3.1.

При проведении эксперимента использовали гидравлический пресс модели П-250 усилием 2,5 МН (ДБ2436 усилием 4 МН). Микроскоп МБС-9.

3.2.2 Экспериментальная установка, устройство и наладка

Для проведения экспериментального исследования процесса сборки металлических заготовок пластическим деформированием разработана и изготовлена универсальная лабораторная установка, представленная на рисунке 3.1 [53].

Установка смонтирована на опорной плите 10, связанной резьбовым соединением с обоймой 6. В обойме 6 размещен упругий элемент 8 в виде жесткой спиральной пружины, на который опирается упорная вставка 5.

Сверху в обойму 6 ввинчивается матрица 3, заходящая нижней торцевой частью в зазор между стенкой обоймы 6 и уступом упорной вставки 5. Стержневая заготовка 7 размещается в полости упорной вставки 5 с упором в торец регулировочного винта 9, ввинченного в центральное резьбовое отверстие опорной плиты 10.

Нагретая до ковочной температуры головная заготовка 4 укладывается в матрицу 3 на верхний торец упорной вставки 5, нагретой до температуры $400\div 450$ °С, во избежание резкого охлаждения нижнего торца головной заготовки. Сверху на головную заготовку 4 опускается компенсационная плита 2 с компенсационной полостью для выхода металла при вдавливании головной заготовки 4 в стержневую заготовку 7 посредством пуансона 1.

На лабораторной установке можно осуществлять не только сборку металлических заготовок путем вдавливания головной заготовки в стержневую, но и выполнять прямое и обратное выдавливание, высадку и другие операции. Сопряжения элементов установки обеспечивают хорошее центрирование заготовки и формируемого изделия в матрице.

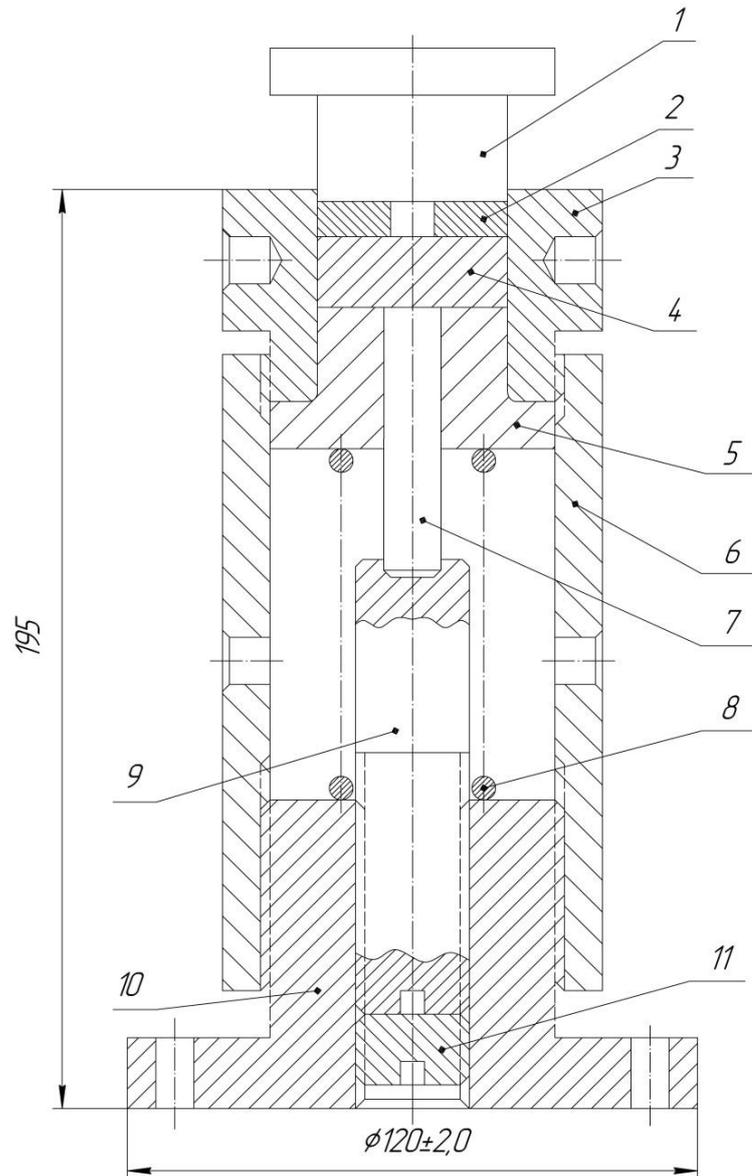


Рисунок 3.1 – Схема лабораторной установки для сборки заготовок пластическим деформированием: 1 – пуансон; 2 – компенсационная плита; 3 – матрица; 4 – головная заготовка; 5 – упорная вставка; 6 – обойма; 7 – стержневая заготовка; 8 – упругий элемент; 9 – регулировочный винт; 10 – опорная плита; 11 – контргайка

Перед началом проведения эксперимента лабораторную установку настраивают в следующем порядке (рисунок 3.1):

- 1) устанавливают обойму 6, обеспечивая зазор с плитой 10, равный 10 мм;
- 2) опускают в обойму 6 упругий элемент 8 и упорную вставку 5;
- 3) ввинчивают матрицу 3 в обойму 6;
- 4) ввинчивают в плиту 10 регулировочный винт 9;
- 5) по величине зазора б устанавливают расчетное усилие предварительного сжатия пружины 8;
- 6) опускают стержневую заготовку 7 в матрицу 3 через упорную вставку 5 до упора в регулировочный винт 9, которым совмещают торец стержневой заготовки 7 с плоскостью вставки 5;
- 7) ставят установку на плиту пресса (рисунок 3.2).

Для обеспечения качества сборки заготовок при проведении опытов необходимо выполнить силовое условие [54]:

$$P_{cp} < P_{пд} < P_{вд}, \quad (3.9)$$

где P_{cp} – усилие среза при вдавливании головной заготовки в стержневую заготовку, МН;

$P_{вд}$ – усилие вдавливания головной заготовки в стержневую заготовку, МН;

$P_{пд}$ – усилие противодействия, МН (соответственно таблице 3.1);

Для наладки лабораторной установки проведены следующие расчеты [55].

1. Определяют максимальное усилие сжатия упругого элемента 8 с учетом глубины вдавливания головной заготовки в стержневую, равной 15 мм:

$$P_{max} = \frac{\pi \cdot d_{пр}^3}{8KD_{п}} \cdot \tau_s. \quad (3.10)$$

Размеры пружины:

$d_{пр}$ – диаметр проволоки, принято $d_{пр} = 5$ мм;

$D_{п}$ – диаметр пружины по осям проволок, принято $D_{п} = 30$ мм;

τ_s – допускаемое напряжение сдвига для марки стали 60С2 $\tau_s = 0,58 \cdot \sigma_B = 0,58 \cdot 1300 = 754$ МПа; здесь σ_B – предел прочности стали 60С2 после термообработки;

K – поправочный коэффициент, равный

$$K = \frac{4c+2}{4c-3} = \frac{4 \cdot 6+2}{4 \cdot 6-3} = \frac{26}{21} = 1,24,$$

где c – индекс пружины, равный $c = D_{\text{п}} / d_{\text{пр}} = 30 / 5 = 6$;

$$P_{\text{max}} = \frac{3,14 \cdot 5^3}{8 \cdot 1,24 \cdot 30} \cdot 754 = 995,3 \text{ Н} \approx 1,0 \text{ кН.}$$

2. Находят максимальную величину сжатия (z) пружины:

$$z_{\text{max}} = z_1 + z_2 + z_3 + \dots + z_n, \quad (3.11)$$

z_1 – предварительное сжатие пружины; $z_1 = 15 \div 25$ мм;

остальные z_i – целевые.

3. Рассчитывают длину пружины до соприкосновения витков:

$$H_{\text{min}} = (n - 0,5) d_{\text{пр}}, \quad (3.12)$$

где n – число витков ($n = 10$);

$$H_{\text{min}} = (10 - 0,5) 5 = 47,5 \text{ мм.}$$

4. Определяют длину пружины после предварительного сжатия

$$H_{\text{пр}} = H_0 - z_1, \quad (3.13)$$

где $H_0 = 95$ мм – длина пружины в свободном состоянии; принимают $z_1 = 20$ мм. Тогда $H_{\text{пр}} = 95 - 20 = 75$ мм.

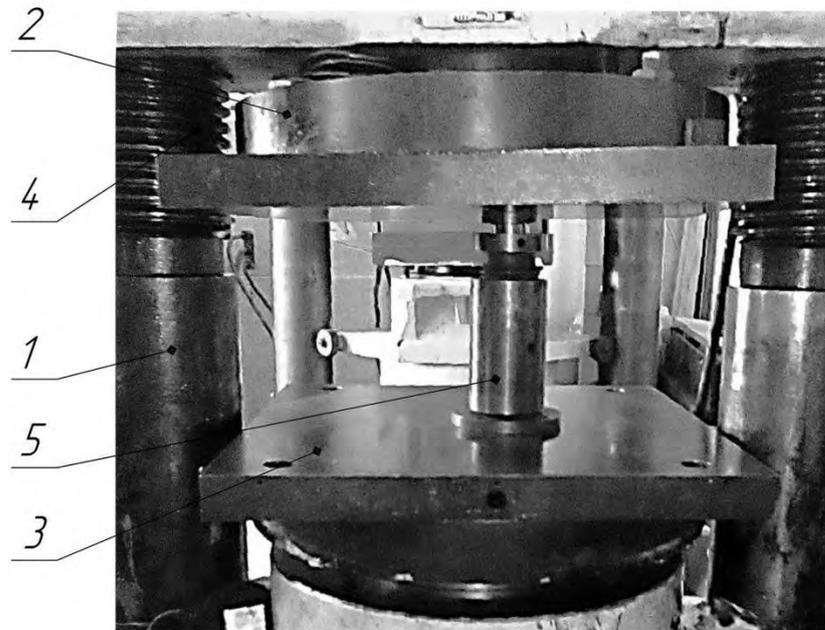


Рисунок 3.2 – Фотография лабораторной установки на гидравлическом прессе

ДБ2436: 1 – станина пресса; 2 – ползун; 3 – стол; 4 – приводной винт;

5 – лабораторная установка

5. Находят рабочий ход сжатия пружины

$$H_p = H_{пр} - H_{min} + m, \quad (3.14)$$

где $m = 2,5$ мм – суммарный гарантированный зазор между витками после полного сжатия пружины.

$$H_p = 75 - 47,5 + 2,5 = 25 \text{ мм}$$

3.3 Проведение эксперимента

Проведение эксперимента осуществляли, используя таблицы 3.1 ÷ 3.3, в следующем порядке.

Головную заготовку 4 из стали 40X13 нагревали в индукторе до температуры согласно таблице 3.1 и укладывали в матрицу 3 (рисунок 3.1) на нагретую до температуры 400-405 °С упорную вставку 5 и торец стержневой заготовки 7. Далее на головную заготовку 4 кладут компенсационную плиту 2, затем посредством пуансона 1 вдавливают головную заготовку 4 в стержневую заготовку 7 на установленную величину 15 мм.

Расчетное давление прессы составило 255,26 кН. При этом фактическое давление было равно 312,5 кН.

В ходе экспериментов проводили три параллельных опыта с равномерным дублированием опытов.

После проведения трех серий экспериментов определяют качество «схватывания» соединяемых заготовок. Для этого каждый образец подвергался механической резке по продольной оси и на макрошлифах измерялись общая длина контакта ($l_{об}$) и длины участков ($l_{сб}$) получившегося неразъемного соединения. На рисунках 3.3 и 3.4 представлены фотографии образцов. На торце стержневой заготовки схватывание происходит в меньшей степени, чем на боковой контактной поверхности, потому что удаление адсорбатов с торцевой поверхности затруднено в процессе сборки металлических заготовок, что препятствует хорошей схватываемости металлов.

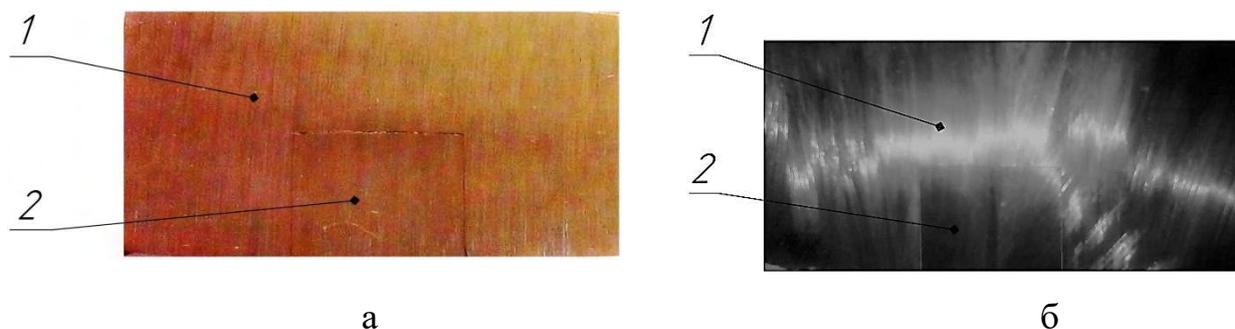


Рисунок 3.3 – Макрошлиф сборной металлической заготовки: а – макрошлиф образца №1; б – макрошлиф образца №2: 1 – головная заготовка; 2 – стержневая заготовка

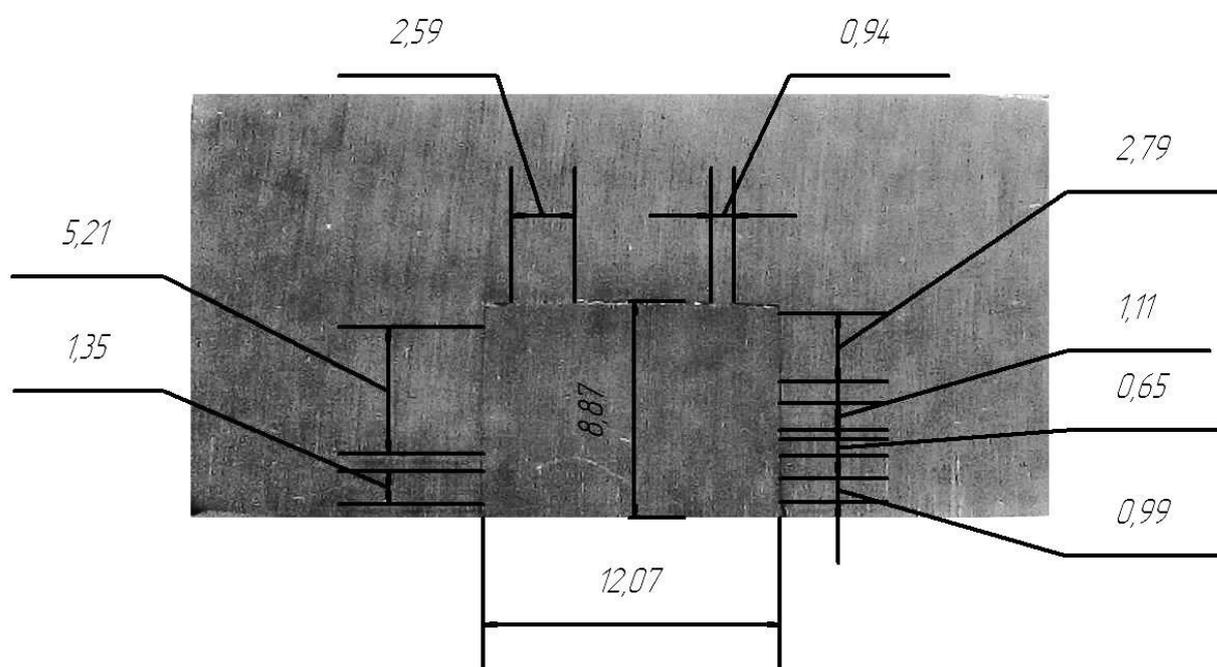


Рисунок 3.4 – Схема определения участков схватывания к расчету показателя качества сборки (λ); числа показывают длины (мм) участков контурных линий соединения заготовок

На боковых поверхностях большая часть адсорбатов, особенно при наличие противодействия, снимается в момент внедрения стержневой заготовки в головную, поэтому площадь прочного соединения заготовок относительно велика (рисунок 3.3 а, б).

После обмера контурных линий неразъемного соединения заготовок (линий схватывания металлов) на макрошлифах по формуле (3.2) рассчитаны значения показателя качества сборки (λ).

Матрица планирования эксперимента и результаты расчета сведены в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 – Матрица планирования и результатов эксперимента

№ опыта	x_0	x_1 Т	x_2 W	x_3 Q	$\lambda_{ju}/Y_{ju}^{*})$			$\bar{\lambda}_{j2}/\bar{Y}_j$
					$\frac{\lambda_{j1}}{Y_{j1}}$	$\frac{\lambda_{j2}}{Y_{j2}}$	$\frac{\lambda_{j2}}{Y_{j2}}$	
1	+	-	-	+	72/4,28	76/4,33	67/4,20	71.6/4,27
2	+	+	-	-	60/4,09	65/4,17	58/4,06	61/4,11
3	+	-	+	-	56/4,03	59/4,08	51/3,39	55.3/4,01
4	+	+	+	+	68/4,22	79/4,37	76/4,33	74.3/4,31

^{*)}Здесь: j – номер опыта; u – номер параллельного опыта

3.4 Обработка результатов эксперимента

При обработке результатов эксперимента проведены расчет коэффициентов уравнения регрессии (модели процесса) и проверка полученной модели на адекватность.

Вначале определяют среднее арифметическое значение параметра оптимизации в каждом опыте по формуле (3.15) (см. таблицу 3.4), после чего находят коэффициенты модели по формулам (3.16).

Среднее арифметическое значение параметра оптимизации в j -м опыте (\bar{Y}_j) рассчитывают по выражению:

$$\bar{Y}_j = \frac{1}{n} \sum_{u=0}^n Y_{ju}, \quad (3.15)$$

n – число параллельных опытов, Y_{ju} – значение параметра в u -м параллельном опыте j -го номера опыта.

Коэффициенты b_0 и b_i определяют по формулам:

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^N \bar{Y}_j \quad \text{и} \quad b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^N x_{ij} \bar{Y}_j \quad (3.16)$$

где N и j – соответственно количество опытов и номер опыта.

$$b_0 = \frac{1}{4}(4,27 + 4,11 + 4,01 + 4,31) = 4,175;$$

$$b_1 = \frac{1}{4}(-4,27+4,11-4,01+4,31) = 0,035;$$

$$b_2 = \frac{1}{4}(-4,27-4,11+4,01+4,17) = -0,015;$$

$$b_3 = \frac{1}{4}(4,27-4,11-4,01-4,17) = 0,115;$$

$$y = 4,175 + 0,035x_1 - 0,015x_2 + 0,115x_3; \quad (3.17)$$

Затем проведена проверка полученной модели на адекватность.

После потенцирования уравнения (3.17) получена экспериментальная модель для оценивания качества неразъемной сборки исходных заготовок посредством совместного их пластического деформирования при варьировании ключевых параметров процесса:

$$\lambda = 63,2 \cdot T^{0,035} \cdot Q^{0,115} / W^{0,015}. \quad (3.18)$$

С использованием полученной модели проведены оценочные расчеты показателя λ и построены графические зависимости.

Расчет 1. Исходные параметры (рисунок 3.5): 1) $d_i / D = 0,2$ и $P_{\text{пд}} / P_{\text{вд}} = 0,9$ (кривая 1); 2) $d_i / D = 0,4$ и $P_{\text{пд}} / P_{\text{вд}} = 0,5$ (кривая 2); 3) $d_i / D = 0,6$ и $P_{\text{пд}} / P_{\text{вд}} = 0,1$ (кривая 3).

На основе анализа графических зависимостей (рисунок 3.5) можно сделать выводы:

- 1) температурный фактор оказывает слабое влияние на качество сборки;
- 2) лучшее качество сборки получено при высоком противодавлении и меньшем соотношении диаметров (d_i / D), что, вероятно, объясняется лучшей зачисткой контактных поверхностей от адсорбатов вследствие существенного уменьшения утяжины и, кроме того, повышением гидростатического давления в зоне взаимодействия контактных поверхностей (кривая 1, рисунок 3.5);
- 3) при использовании средних значений $d_i / D = 0,4$ и $P_{\text{пд}} / P_{\text{вд}} = 0,5$ наблюдается незначительное снижение показателя качества сборки λ по сравнению с графиком 1 (кривая 2, рисунок 3.5);
- 4) худший показатель λ оказался при малом значении противодавления $P_{\text{пд}} / P_{\text{вд}} = 0,1$ и большом отношении $d_i / D = 0,6$ (кривая 3, рисунок 3.5).

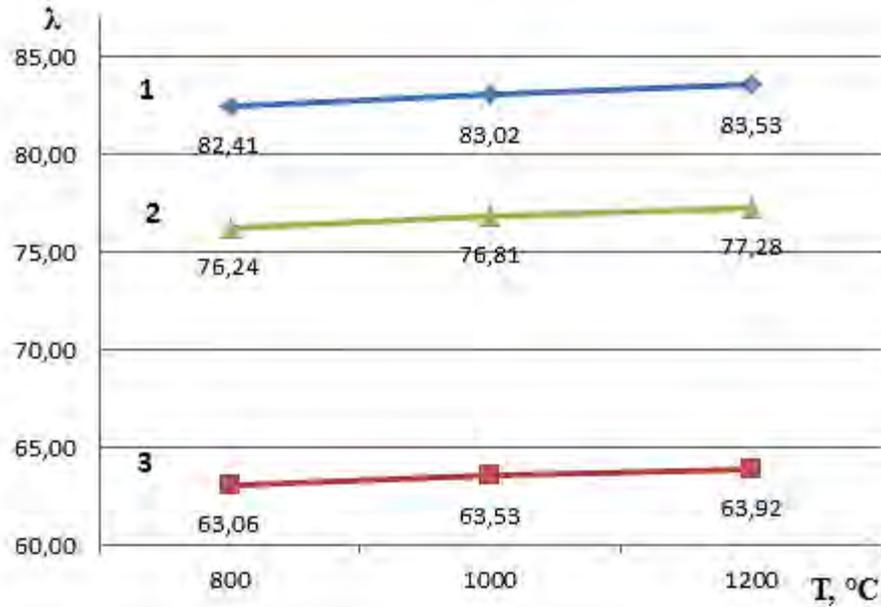


Рисунок 3.5 – Графические зависимости показателя качества сборки металлических заготовок совместным пластическим деформированием от температуры нагрева головной заготовки ($\lambda = f(T, ^\circ\text{C})$)

Расчет 2. Исходные параметры (рисунок 3.6): 1) $T = 1200 ^\circ\text{C}$ и $P_{\text{пд}} / P_{\text{вд}} = 0,9$ (кривая 1); 2) $T = 1000 ^\circ\text{C}$ и $P_{\text{пд}} / P_{\text{вд}} = 0,5$ (кривая 2); 3) $T = 800 ^\circ\text{C}$ и $P_{\text{пд}} / P_{\text{вд}} = 0,1$ (кривая 3).

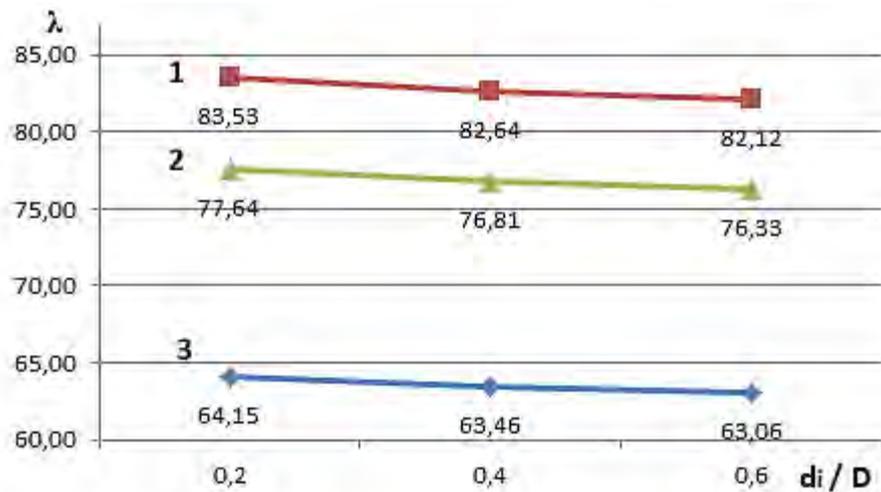


Рисунок 3.6 – Графические зависимости показателя качества сборки металлических заготовок совместным пластическим деформированием от соотношения диаметров стержневой и головной заготовок ($\lambda = f(d_i / D)$)

Как видно из графиков, с увеличением отношения диаметра стержневой заготовки к головной заготовке происходит снижение показателя качества λ , если неизменны другие параметры, что согласуется с предыдущим выводом.

В результате анализа графических зависимостей можно сделать выводы:

- 1) геометрический фактор (отношение d_i/D) оказывает заметное влияние на качество сборки;
- 2) повышению качества сборки способствует высокое противодавление как отмечено выше;
- 3) худший показатель λ оказался при высоком значении отношения d_i/D и низкой температуре нагрева головной заготовки $T = 800$ °С (кривая 3, рисунок 3.6), что объясняется образованием бóльшей утяжины, ухудшающей качество зачистки контактных поверхностей, и низкой температурой металла, снижающей способность металлов к образованию металлических связей.

Расчет 3. Исходные параметры (рисунок 3.7): 1) $d_i/D = 0,2$ и $T = 1200$ °С (кривая 1); 2) $d_i/D = 0,4$ и $T = 1000$ °С (кривая 2); 3) $d_i/D = 0,6$ и $T = 800$ °С (кривая 3).

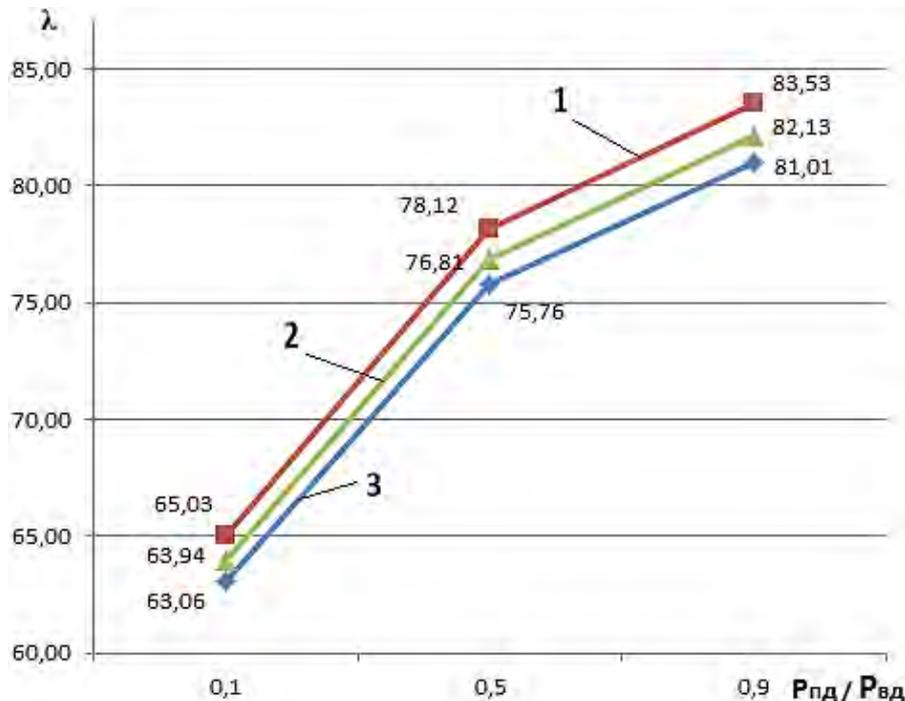


Рисунок 3.7 – Графические зависимости показателя качества сборки металлических заготовок совместным пластическим деформированием от соотношения усилия противодавления и усилия вдавливания ($\lambda = f(P_{пд}/P_{вд})$)

Как видно из графиков, с увеличением относительного значения противодавления показатель качества λ резко возрастает, если неизменны другие параметры.

На основе анализа графических зависимостей можно сделать выводы:

- 1) повышение относительного значения противодавления существенно улучшает качество сборки;
- 2) заметное влияние на повышение качества сборки оказывает малое соотношение диаметра стержневой заготовки к головной заготовке в сочетании с высокой температурой нагрева головной заготовки, что способствует лучшему схватыванию металлов (кривая 1, рисунок 3.7), но показатели λ достаточно близки, чтобы сделать вывод о преимущественном влиянии высокого противодавления и силового параметра в целом, в отличие от температурного и геометрического параметров.

3.5 Компьютерное моделирование сборки заготовок совместным пластическим деформированием в программе DEFORM-3D

Для компьютерного моделирования процесса сборки исходных заготовок спроектированы модели матрицы, пуансона, головной и стержневой заготовок в программе SolidWorks.

Введены следующие данные: материалы головной и стержневой заготовок соответственно сталь 40X13 и сталь 45, диаметры $D = 39$ и $d = 16$ мм. Высота головной заготовки $H = 20$ мм, толщина дна полости $h = 5$ мм.

После окончания процесса моделирования сборки исходных заготовок совместным пластическим деформированием было получено распределение напряжений и деформаций, представленное на рисунке 3.8.

Как видно из рисунка, максимальная концентрация напряжений и деформаций сосредоточена в областях головной заготовки, примыкающих к угловой и боковой поверхностям стержневой заготовки. На этих поверхностях, как показали эксперименты, наиболее полно снимаются оксиды и другие

адсорбаты в процессе сборки исходных заготовок и длина участков прочного соединения контактных поверхностей относительно велика (рисунок 3.4).

Расположенная над торцом стержневой заготовки зона затрудненной деформации полностью охвачена пластической деформацией в связи с малой толщиной дна полости, что согласуется с результатами теоретических исследований, представленных в работах [36, 56]. Относительная высота очага деформации в нашем случае $h/d = 5/16 = 0,31$ при отношении диаметров $d/D = 0,40$ существенно меньше значения $h/d = 0,60$ (при том же соотношении диаметров), полученного при закрытой прошивке [52].

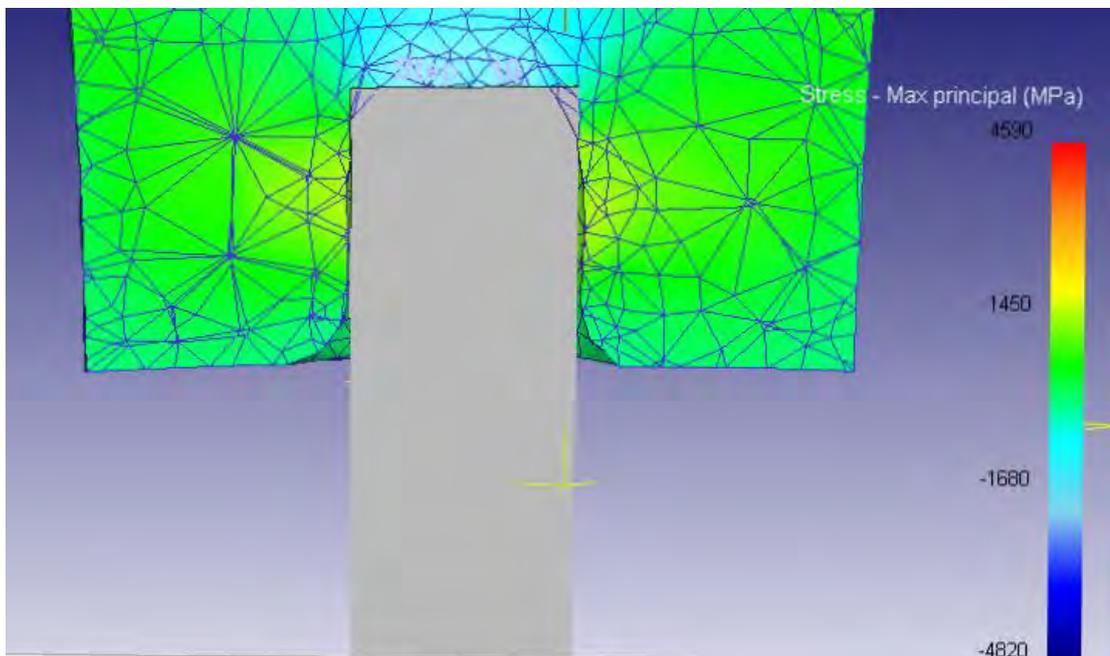


Рисунок 3.8 – Максимальные напряжения, возникающие в процессе сборки заготовок

Однако, в связи с отсутствием сдвиговой деформации в приконтактном слое металла в зоне затрудненной деформации и наличием адсорбатов на торце стержневой заготовки, активация контактных поверхностей в этой зоне невелика.

На рисунке 3.9 видно, что скорость деформации в разных областях металла головной заготовки различна. Максимальная – в области, приконтактной с боковой поверхностью стержневой заготовки, минимальная – в области,

прилегающей к торцу стержневой заготовки, где наблюдается зона затрудненной деформации металла в связи с отсутствием контактных скольжений и сдвиговой деформации металла.

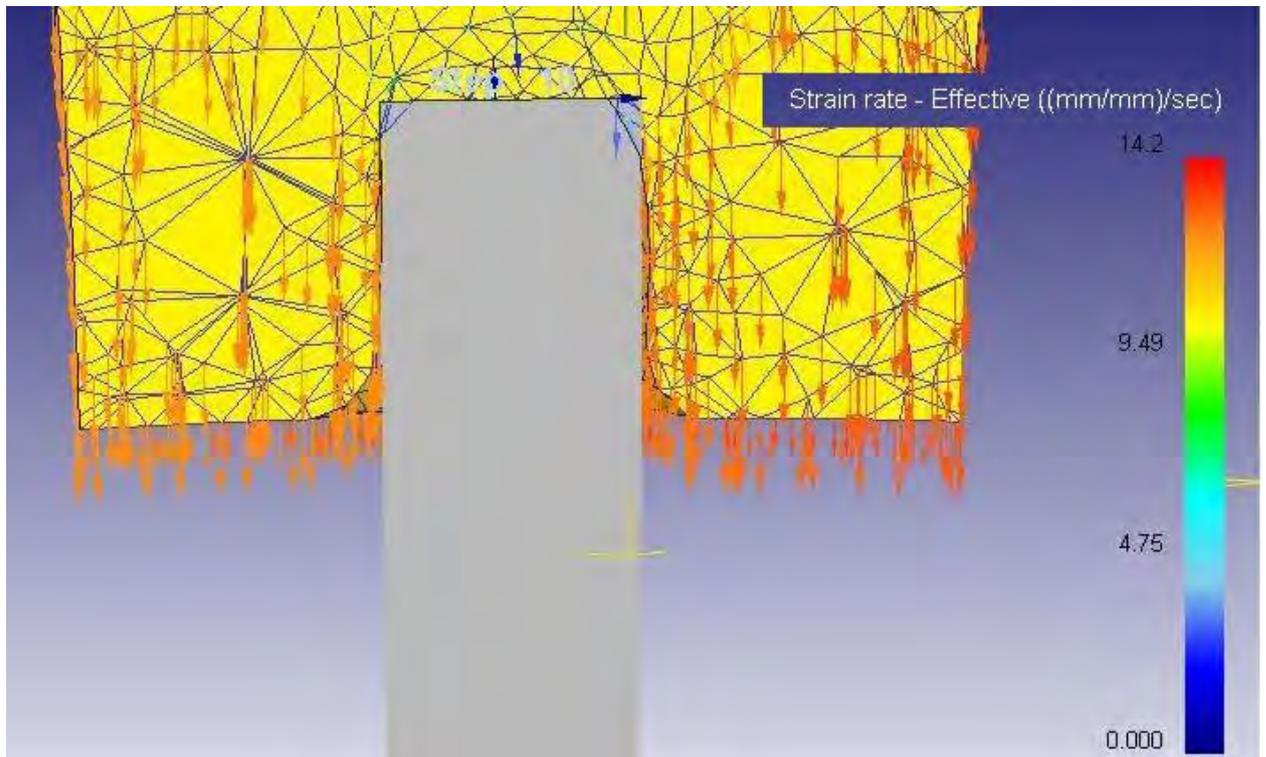


Рисунок 3.9 – Распределение скоростей деформации на разных участках металла головной заготовки

Выводы

1. Лучшее качество сборки исходных заготовок совместным пластическим деформированием ($\lambda = 83,5$) наблюдается при высоком относительном давлении ($P_{\text{пд}} / P_{\text{вд}} = 0,9$) и меньшем соотношении диаметров стержневой и головной заготовок ($d_i / D = 0,2$).

2. Температурный фактор оказывает слабое влияние на качество сборки при нагреве только охватывающей заготовки при прочих неизменных значениях параметров процесса.

3. Худший показатель качества ($\lambda = 0,63$) сборки наблюдался при низком относительном значении противодавления ($P_{\text{пд}} / P_{\text{вд}} = 0,1$) и наибольшем соотношении диаметров ($d_i / D = 0,6$).

4. Наибольшая сдвиговая деформация при сборке заготовок наблюдается в приконтактных областях объема головной заготовки, примыкающих к угловой и боковой поверхностям стержневой заготовки.

5. Расположенная над торцом стержневой заготовки зона затрудненной деформации также испытывает значительную пластическую деформацию под действием преимущественно сжимающих напряжений при незначительной деформации сдвига.

6. Полученные результаты исследований посредством компьютерного моделирования процесса сборки согласуются с результатами металлографических исследований макрошлифов сборных заготовок (раздел 3.3) и исследований напряженно-деформированного состояния металла при закрытой прошивке цилиндрических заготовок [36].

Глава 4 Оптимизационная система управления процессами неразъемной СМЗ СПД и формообразования составных стержневых изделий (ССИ)

4.1 Теоретические предпосылки к созданию моделей управления процессами сборки заготовок и формообразования составного изделия

Для получения качественного составного стержневого изделия необходимо, как отмечено в главе 2, выполнить ряд технологических требований сборки исходных заготовок: 1) использовать нагружающую систему пресс-штамп достаточно высокой жесткости; 2) обеспечить продольную устойчивость стержневой заготовки при вдавливании в нее головной заготовки; 3) обеспечить тщательное удаление оксидов и других адсорбатов с контактных поверхностей собираемых заготовок [57].

При выполнении этих требований возникают условия для стабильного вязкого разрушения металла головной заготовки при вдавливании ее в стержневую заготовку, способствующие образованию ювенильных контактных поверхностей с высокой атомной активностью, благоприятных для проявления схватывания металлов заготовок при образовании их неразъемного соединения [17].

Процесс формирования составного изделия из сборной заготовки должен протекать в условиях монотонного течения металла в очаге деформации (рисунок 4.1), в противном случае возникает вероятность разрыва межатомных (металлических) связей между контактными поверхностями собранных заготовок А и В (рисунок 4.1), что ведет к снижению качества неразъемного соединения заготовок или вовсе к браку изделия [58, 41].

Условия монотонного протекания процесса деформации сформулированы А.А. Ильюшиным, Г.А. Смирновым-Аляевым и развиты В.Л. Колмогоровым [47, 48, 37]:

- 1) совпадение главных осей скоростей деформации с одними и теми же материальными частицами волокон металла в течение всего процесса;
- 2) неизменность за весь процесс вида малой деформации при переходе из предшествующей стадии в текущую.

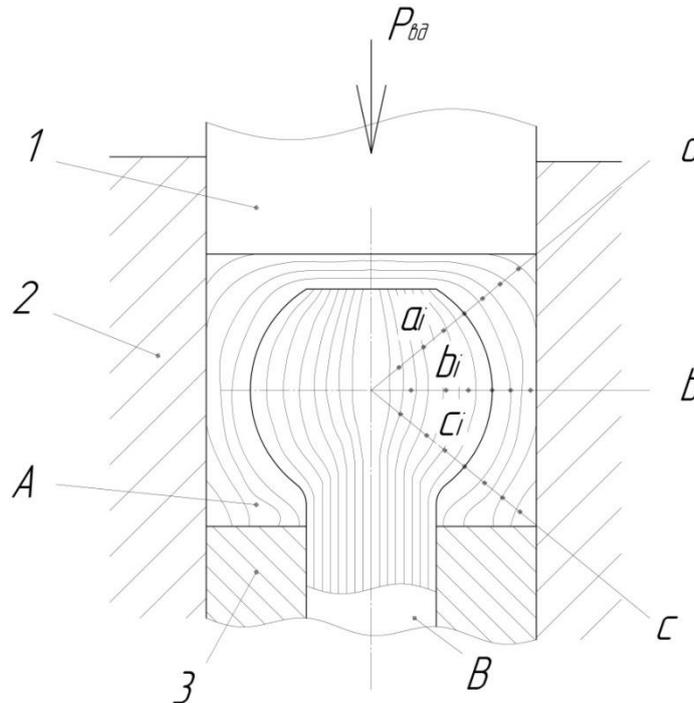


Рисунок 4.1 – Схема формообразования составного стержневого изделия из сборной заготовки (А – головная заготовка; В – стержневая заготовка): 1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – опорная плита

В этом случае, если известны направления главных осей напряженного состояния, то можно установить непосредственно связь напряжений с компонентами результирующей (логарифмической) деформации, так как из теории пластичности известно допущение: разности главных напряжений пропорциональны соответствующим по индексам разностям главных компонентов скоростей деформации:

$$\frac{2 \cdot \sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 - \sigma_2} = \frac{2 \cdot \xi_3 - \xi_1 - \xi_2}{\xi_1 - \xi_2}, \text{ т.е. } \mu_\sigma = \mu_\xi. \quad (4.1)$$

Здесь μ_σ и μ_ξ – соответственно параметры вида напряженного и деформированного состояний металла;

σ_1, σ_2 и σ_3 – главные напряжения;

ξ_1, ξ_2 и ξ_3 – главные компоненты скоростей деформации.

Из второго условия монотонности процесса вытекает: главные компоненты результирующей (логарифмической) деформации должны быть пропорциональны соответствующим компонентам скоростей деформации, т.е.

$$\frac{\varepsilon_1}{\xi_1} = \frac{\varepsilon_2}{\xi_2} = \frac{\varepsilon_3}{\xi_3}, \quad (4.2)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ и ε_3 – главные компоненты результирующей деформации.

В случае монотонного течения металла в процессе формообразования составного изделия (рисунок 4.1) материальные точки (элементарные объемы волокон металла) a_i, b_i и c_i , расположенные на линиях a, b и c , перпендикулярных контуру высаживаемой части стержневой заготовки, должны быть на этих прямых и в предшествующие и в последующие моменты времени.

Названные требования обеспечивают реализацию монотонного течения металла в очаге деформации при формообразовании составного изделия. Они создают теоретические предпосылки для построения модели управления процессами сборки металлических заготовок пластическим деформированием и формообразования составного изделия из сборной заготовки на основе градиентного нагрева деформируемой части стержневой заготовки с целью оптимизации ключевых технологических параметров, учитывающих теплофизические и механические свойства обрабатываемого металла.

В процессе формообразования составного стержневого изделия из сборной заготовки возникает сложный по структуре очаг деформации, характеризуемый девиатором напряжений, видами напряженного (μ_σ) и деформированного (μ_ε) состояний. При этом решающее значение имеет равенство сопротивлений деформации металлов головной заготовки ($\sigma_{вг}$) и деформируемой части стержневой заготовки ($\sigma_{вс}$) (рисунок 4.1) [59]:

$$\sigma_{вг} = \sigma_{вс}. \quad (4.3)$$

Математическая зависимость, обеспечивающая выполнение этого условия, приведена в главе 2, формула (2.37).

Для ориентировочного оценивания монотонности течения металла в верхней и нижней частях очага деформации при формообразовании составного изделия можно использовать соотношение (см. рисунок 4.1):

$$\frac{a_i}{a_{i+1}} = \frac{b_i}{b_{i+1}} = \frac{c_i}{c_{i+1}} = const, \quad (4.4)$$

где a_i , b_i и c_i – величины расстояний между волокнами соответственно в верхней (линия a), средней (линия b) и нижней (линия c) частях поковки;

$i = 1, n$ – номера отрезков между волокнами; n – количество отрезков.

Тогда идентификацию симметричности волокон в верхней и нижней частях поковки можно осуществить по соотношению:

$$Z = \frac{1}{n} \sum_1^n \left(\frac{a_i}{c_i} \right) \rightarrow 1, \quad (4.5)$$

где Z – показатель монотонности заполнения очага деформации; при монотонном течении металла показатель $Z \rightarrow 1$.

Как показали опыты, показатель Z колеблется в пределах $Z = 0,89 \div 1,12$, и зависит от степени выполнения условия (4.3). Так, при высадке стержневого составного изделия при малой степени деформации (рисунок 4.1) при температуре 1100 °С (после выравнивания температур) из стали 40Х13 для головной заготовки (нагрев до 1180 °С) и стали 35 для стержневой заготовки, величины сопротивлений деформации сталей примерно равны (40 МПа) с учетом разупрочнения стали 40Х13 в результате рекристаллизации ее в процессе сборки.

4.2 Проектирование оптимизационной системы управления технологическими процессами (ОСУ ТП) сборки заготовок пластическим деформированием и формообразования составных стержневых изделий

Структура проектируемой оптимизационной системы управления процессом получения составных стержневых изделий пластическим деформированием состоит из ряда подсистем и модулей, которые можно объединять в различных вариантах или применять автономно с использованием

иерархического модульного принципа построения программных и технических средств при решении сложных технологических задач.

Модульный принцип структурирования оптимизационной системы заключается в том, что при алгоритмизации сложного технологического процесса (ТП) из системы выделяют некоторые ее части (модули), имеющие относительную смысловую и функциональную самостоятельность. Модули проходят автономно этапы анализа и алгоритмирования, после чего их используют для создания оптимизационной системы ТП в целом, в которой они взаимодействуют посредством управляемых параметров процесса для достижения оптимальных значений переменных факторов.

При построении ОСУ ТП вначале формируют параметрическую характеристику состояния и развития системы. Затем выбирают управляемые параметры системы, способные воздействовать на ее состояние, и устанавливают математические зависимости между параметрами состояния и управления в виде целевой функции.

$$F(N, X, Y) = F(N; X_1, X_m; Y_1, Y_n), \quad (4.6)$$

где N – параметры состояния системы (чертеж изделия (поковки); размеры заготовок, марки сталей, механические и теплофизические параметры и др.);

$X(X_1, X_m)$ – независимые переменные параметры состояния (относительная длина высадки заготовки (Ψ); температурный параметр (θ); соотношение напряжений противодавления и вдавливания (Z) и др.);

Y – управляемые параметры состояния (температура нагрева металла; размеры заготовок, объем избытка металла; время нагрева металла и штамповки и др.).

Реализуемость технологического процесса обеспечивается с учетом ограничений на параметры X_i и Y_i , которые можно задать в алгоритмическом виде (G) [51, 60]:

$$G = (N, X, Y) \in D, \quad (4.7)$$

где D – допустимая область ограничений параметров.

Для оптимизации процессов получения составных изделий посредством пластического деформирования сборных заготовок целесообразно использовать методы системного анализа, основанные на построении и исследовании иерархических систем как совокупностей взаимосвязанных подсистем и моделей, подчиненных единой целевой задаче. Тогда процесс получения составных изделий может быть представлен в виде технологической системы, состоящей из управляющих и управляемых подсистем. В общем виде модель управляющей подсистемы можно представить как совокупность взаимосвязанных параметров [61].

$$S = \langle X; Y; Z, t_i; D; V_0; V; W_0; W; S_j \rangle, \quad (4.8)$$

где X, Z – входные и выходные параметры систем;

Y – параметры внутреннего состояния системы;

t_i – моменты времени;

D – операторы активного преобразования;

V_0, V – задающие и управляющие воздействия;

W_0, W – сигналы прямой и обратной связи;

S_j – операторы иерархических упорядоченных связей между перечисленными параметрами.

Описанная структура технологической системы и принципы ее функционирования использованы при проектировании оптимизационных модулей и подсистем управления процессами сборки и формообразования составных изделий.

С этой целью проводится:

- 1) системный анализ информационного материала о процессах получения составных изделий пластическим деформированием и описание их состояния;
- 2) структуризация и формализация информационного материала о процессах;
- 3) построение функциональных и объектно-ориентированных задач технологического процесса получения составных изделий в виде автономных модулей различного назначения;

4) алгоритмизация функционирования системы управления технологическим процессом на основе оптимизации целевых технико-экономических показателей объекта, скомпонованного из автономных модулей;

5) программная реализация обобщенного алгоритма; апробация программы и анализ полученных результатов функционирования оптимизационной системы;

6) оценивание эффективности спроектированной оптимизационной системы управления процессами получения составных изделий;

7) обоснование выбора проектных решений по функциональной структуре технологических задач и процесса и их информационному обеспечению.

Если множество Z содержит основные параметры процесса получения составного изделия, характеризующие его состояние как систему, то функционирование процесса можно описать выражением [61]:

$$Y(X) \in Z,$$

$$\text{где } Y = \begin{pmatrix} y_{11} & \dots & y_{1m} \\ \dots & \dots & \dots \\ y_{n1} & & y_{nm} \end{pmatrix}, X = \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1m} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & \dots & x_{nm} \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

Здесь $Y(y_i)$ – множество целевых показателей, характеризующих эффективность процесса; $X(x_i)$ – множество управляемых показателей, изменяемых в области $D(x_i \in D)$, которые создают управляющую подсистему; $i = 1, m$ – номера показателей, m – количество показателей.

Воздействие подсистемы $X \in D$ на систему Z должно привести к улучшению целевых показателей $y_i = f(x_i)$ и системы в целом, т.е. к повышению качества составных изделий.

ОСУ ТП неразъемной сборки металлических заготовок и формообразование составного изделия разработана по принципу построения иерархической гибридной модели, позволяющей выстраивать в иерархической последовательности рациональное взаимодействие технологических модулей различного назначения, составляющих оптимизационную систему процесса как единое целое [50].

ОСУ ТП получения ССИ, спроектированная по иерархическому гибриднему принципу на основе автономизированных модулей, реализована алгоритмом рационализации выбора целевых модулей конкретного назначения, представленным на рисунке 4.2. Информационной основой функционирования алгоритма ОСУ ТП служит параметрическая характеристика изделия, сформированная согласно чертежу, техническим требованиям к изделию и годовой программе выпуска.

Перечень автономизированных целевых модулей:

- 1) модуль М1. Обоснование объемов исходных заготовок;
- 2) модуль М2. Рационализация выбора сортового проката для исходных заготовок: $(N_\gamma; \gamma=1, \rho, \nu)$;
- 3) модуль М3. Определение параметров глубокой зачистки контактных поверхностей заготовок;
- 4) модуль М4. Обоснование параметров противодавления при штамповке ССИ;
- 5) модуль М5. Обоснование количества переходов штамповки изделия из сборной заготовки;
- 6) модуль М6. Обоснование однопереходной штамповки ССИ без градиентного нагрева стержневой заготовки;
- 7) модуль М7. Обеспечение условия продольной устойчивости стержневой заготовки без градиентного нагрева;
- 8) модуль М8. Оптимизация теплофизических и механических параметров ТП при градиентном нагреве стержневой заготовки;
- 9) модуль М9. Обеспечение условий продольной устойчивости стержневой заготовки при ее градиентном нагреве.

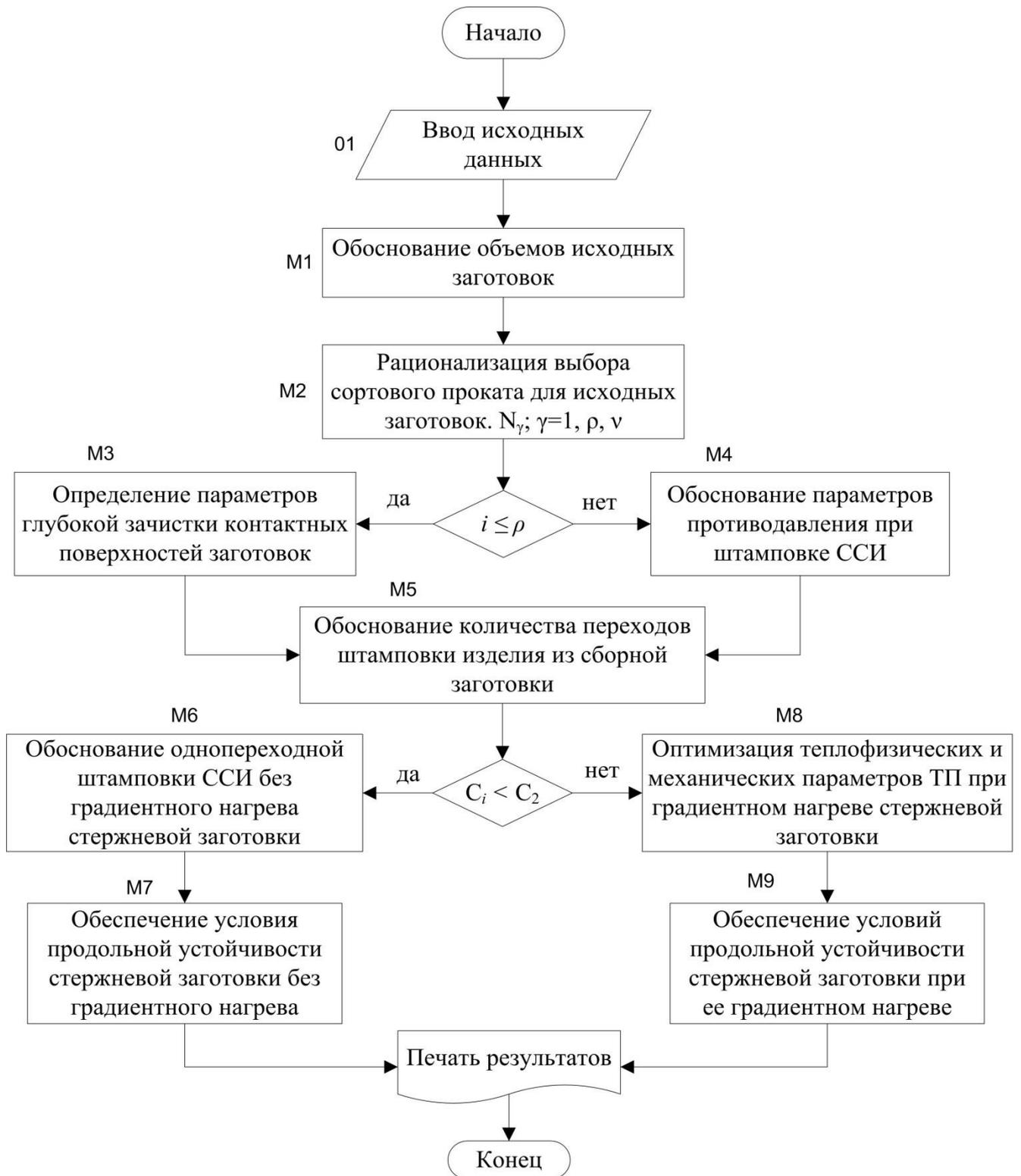


Рисунок 4.2 – Обобщенный оптимизационный алгоритм системы проектирования ТП получения составного стержневого изделия пластическим деформированием

Модуль М1. Обоснование объемов исходных заготовок

По чертежу стержневого изделия с утолщением (головкой) и тонкостенной оболочкой на стержневом элементе (например, ведущая шестерня дифференциала), полученного согласно запатентованному способу [53], и исходных данных, введенных в блок 01 обобщенного алгоритма (рисунок 4.2), проведена оптимизация соотношения объемов исходных заготовок на основе условий прочности и жесткости составного стержневого изделия, получаемого пластическим деформированием.

Вначале определяют объемы головки ($V_{\text{ги}}$) и оболочки ($V_{\text{об}}$) изделия (рисунок 4.3):

$$\begin{aligned} V_{\text{ги}} &= \pi(d_{\text{ги}}^2 \cdot h_{\text{ги}})/4, \\ V_{\text{об}} &= \pi(d_{\text{об}}^2 - d_i^2)l_{\text{сэ}}/4, \end{aligned} \quad (4.10)$$

где $d_{\text{ги}}$, $d_{\text{об}}$ и d_i – соответственно диаметры головки изделия, стержневого элемента с оболочкой и без оболочки, мм;

$h_{\text{ги}}$ – высота головки изделия, мм;

$l_{\text{сэ}}$ – длина стержневого элемента, мм.

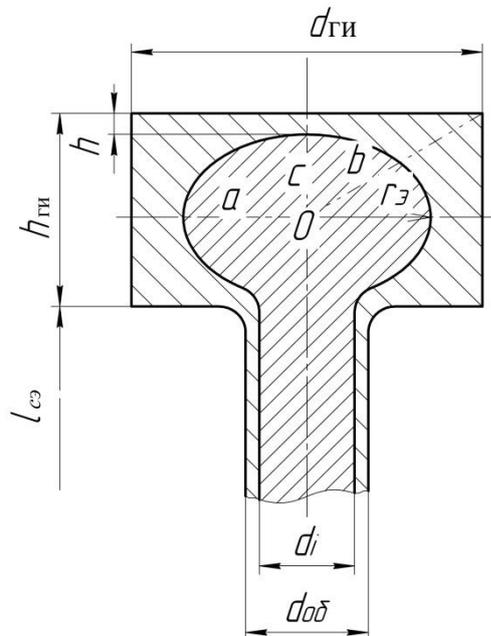


Рисунок 4.3 – Составное стержневое изделие с тонкостенной оболочкой на стержневом элементе

Далее находят составляющие объема головки изделия из соотношения:

$$V_{\text{ги}} = V'_{\text{гз}} + V_{\text{вж}}, \quad (4.11)$$

где $V'_{\text{гз}}$ и $V_{\text{вж}}$ – соответственно объемы металла головной и стержневой заготовок, входящие в головку изделия, мм^3 ; причем $V_{\text{вж}}$ – варьируемый объем участка высадки стержневой заготовки.

Определение объемов $V'_{\text{гз}}$ и $V_{\text{вж}}$ осуществляют из условий прочности и жесткости составного стержневого изделия, работающего на кручение (ведущая шестерня дифференциала и др.). Варьируемый объем $V_{\text{вж}}$ участка высадки рассчитывают, кроме того, на продольную устойчивость с учетом конструктивных требований к изделию.

После сборки исходных заготовок и высадки утолщения, высаженная часть стержневой заготовки ($V_{\text{вж}}$) приобретает форму эллипсоида (рисунок 4.3), равного:

$$V_{\text{эл}} = V_{\text{вж}} = \frac{4}{3} \pi \cdot a \cdot b \cdot c, \quad (4.12)$$

где $V_{\text{эл}}$ – объем эллипсоида, мм^3 ;

a , b и c – полуоси эллипсоида, причем $a = b = r_{\text{э}}$, $c = (h_{\text{ги}} - h) / 2$. Здесь $r_{\text{э}}$ – радиус участка поверхности эллипсоида в плоскости осей a и b , на котором возникают наибольшие напряжения сдвига.

Тогда

$$V_{\text{вж}} = \pi d_{\text{э}}^2 (h_{\text{ги}} - h) / 6. \quad (4.13)$$

Отсюда, при начально установленном значении объема высадки, находят диаметр ($d_{\text{э}}$) эллипсоида в плоскости осей a и b (рисунок 4.3):

$$d_{\text{э}} = \sqrt{6V_{\text{вж}} / \pi(h_{\text{ги}} - h)}. \quad (4.14)$$

Известное из сопромата условие прочности изделия при кручении имеет вид [62]:

$$\tau_{\text{кр}} = (M_{\text{кр}} / W_{\text{р}}) \leq \tau_{\text{кр}}^{\text{max}}, \quad (4.15)$$

где $\tau_{\text{кр}}$ – напряжение сдвига при кручении МПа;

$\tau_{кр}^{\max}$ - максимально допустимое напряжение сдвига при кручении, принимаемое $\tau_{кр}^{\max} = 0,6\sigma_{в}$, МПа; $\sigma_{вс}$ – предел прочности металла стержневой заготовки, МПа;

$M_{кр}$ – крутящий момент, действующий на изделие, Нм;

W_p – полярный момент сопротивления сечения (m^3) в плоскости осей a и b , равный

$$W_p = \pi d_{э}^3 / 32. \quad (4.16)$$

С использованием уравнений (4.15) и (4.16) находят необходимый по условию прочности изделия диаметр эллипсоида ($d_э$) в плоскости осей a и b (рисунок 4.3) на участке наибольших напряжений сдвига ($\tau_{кр}^{\max}$), где наиболее вероятно разрушение неразъемного соединения исходных заготовок:

$$d_э = 2 \cdot \sqrt[3]{4M_{кр} / \pi \tau_{кр}^{\max}}. \quad (4.17)$$

По полученному значению $d_э$ рассчитывают объем $V_в$ (см. формула (4.13)) высаживаемой части стержневой заготовки, необходимый для формирования головки изделия из условия его прочности:

$$V_в = 2\pi(h_{гн} - h)(4M_{кр} / \pi \tau_{кр}^{\max})^{2/3} / 3. \quad (4.18)$$

Затем, с использованием зависимости (4.18) из формулы

$$V_в = \pi d_i^2 \cdot l_в / 4 \quad (4.19)$$

находят искомую длину высадки ($l_в$) стержневой заготовки при заданном по чертежу изделия диаметре (d_i) и проверяют условие продольной устойчивости стержневой заготовки по выражению (2.16).

Кроме выполнения условия прочности необходимо также обеспечить условие жесткости конструкции составного стержневого изделия, определяемое зависимостью [62]:

$$\Theta = M_{кр} / GJ_p \leq \Theta_{доп} \quad (4.20)$$

где Θ – жесткость конструкции изделия, 1/м;

$G \cdot J_p$ – жесткость сечения при кручении, Н·м²;

G – модуль сдвига, МПа; для стали $G = 8 \cdot 10^4$, МПа;

$$J_p = (\pi/32) \cdot d_{об}^4 - \text{полярный момент инерции сечения, мм}^4. \quad (4.21)$$

Из формулы (4.21) определяют минимально допустимый по условию жесткости сечения при кручении диаметр стержневого элемента с оболочкой ($d_{об}$), обладающего сечением наименьшей жесткости:

$$d_{об} = \sqrt[4]{2M_{кр} / \pi G \Theta_{доп}} \geq d_{об}^{\min}. \quad (4.22)$$

Методика описания первого модуля реализована алгоритмом (рисунок 4.4).

Функционирование алгоритма по определению объемов металла головной и стержневой заготовок, входящих в головку изделия, и оптимизации соотношения объемов исходных заготовок осуществляют следующим образом.

Исходные данные для модуля М1: $V_{п}; l_{сэ}; h_{ги}; d_i; d_{об}; h; M_{кр}; \Psi_{доп}$.

В блоке 1.1 принимают значения диаметра стержневой заготовки (d_i) в диапазоне (1, m), а в блоке 1.2 – максимальное напряжение сдвига при кручении ($\tau_{кр}$) по формуле (4.15).

Далее по формуле (4.17) в блоке 1.3 рассчитывают радиус участка поверхности эллипсоида. Принимая во внимание равенство полуосей a и b радиусу ($r_э$), а полуоси $c = (h_{ги} - h)$ (блок 1.4) по формулам (4.12) и (4.13) находят объем эллипсоида ($V_{эл}$) в блоке 1.5, после чего в блоке 1.6 принимают объем высаженной части стержневой заготовки ($V_{вi}$) равным объему эллипсоида.

Затем в блоке 1.7 по формуле (4.18) оптимизируют объем ($V_{в}$) высаживаемой части стержневой заготовки, необходимый для формирования головки изделия из условия его прочности. В блоке 1.8 определяют искомую длину высадки ($l_{в}$) стержневой заготовки по формуле (2.17):

Далее в блоке 1.9 находят длину стержня (l_c), состоящую из длины высадки ($l_{в}$) и длины стержневого элемента ($l_{сэ}$). В блоке 1.10 определяют объем стержневой заготовки:

$$V_c = \pi d_i^2 \cdot l_c. \quad (4.23)$$

В блоке 1.11 определяют объем головки ($V_{ги}$) изделия по формуле (4.10)

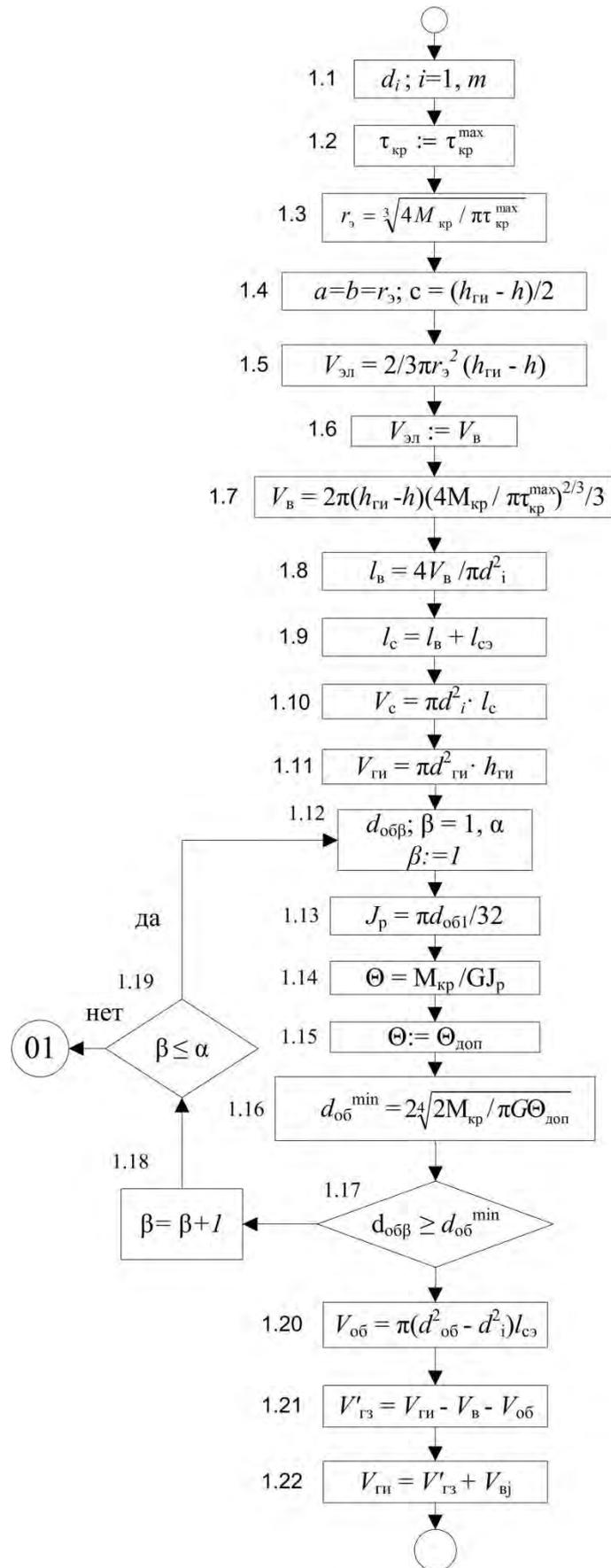


Рисунок 4.4 – Алгоритм модуля М1 расчета и обоснования объемов исходных заготовок

После переходят к определению диаметра оболочки ($d_{об}$) в блоке 1.16, исходя из условия (4.22). Для этого в блоках 1.12 принимают минимально необходимый диаметр оболочки. Если планируется изделие без оболочки, то принимают $d_{об} = 0$, и в блоках 1.13-1.15 по формулам 4.20 и 4.21 обеспечивают условие жесткости конструкции изделия. Затем в блоке 1.17 проверяют условие (4.22), если оно не выполняется, то меняют диаметр оболочки в пределах допуска на один шаг (блоки 1.18 и 1.19) и производят перерасчет, начиная с блока 1.12, или изменяют исходные данные в блоке 01 обобщенного алгоритма (рисунок 4.2).

В блоке 1.20 определяют объем оболочки ($V_{об}$) изделия по формуле (4.10), а в блоке 1.21 находят объем металла головной заготовки ($V'_{гз}$), входящей в головку изделия

$$V'_{гз} = V_{гн} - V_{в} - V_{об} \quad (4.24)$$

В блоке 1.22 определяют объем головной заготовки ($V_{гз}$) по формуле (4.11).

После чего результаты оптимизированного расчета отправляют в печать функционирование алгоритма завершается.

Модуль М2. Рационализация выбора сортового проката для исходных заготовок

По стандарту установлено пять классов точности горячештампованных поковок (ГОСТ 7505). Введем обозначения классов

$$T_n = T_1, \dots, T_5 \quad (4.25)$$

в порядке возрастания их точности.

Согласно техническим требованиям на поковку (например, ведущей шестерни дифференциала) необходимо получить составное стержневое изделие повышенной точности. Принимаем

$$T_n := T_4. \quad (4.26)$$

Для получения поковки повышенной точности используем закрытую штамповку с высадкой утолщения.

Имеется набор видов проката (N_γ):

$$N_\gamma; \gamma = 1, \rho, \nu, \quad (4.27)$$

где γ – номера видов проката в порядке возрастания их точности; ρ – номер последнего вида проката удовлетворительной точности ($\gamma = 1, \rho$); ν – номер последнего вида проката высокой точности ($\gamma = \rho+1, \nu$).

Выбирают прокат N_γ высокой точности ($\gamma \geq \rho+1$) и рассчитывают максимальное положительное отклонение ($\delta_{c\gamma}$) объема стержневой заготовки диаметром $d_i = d_1$:

$$\delta_{c\gamma} = \pi[(d_i + \Delta d_i)^2 \cdot (l_b + \Delta l_b) - d_i^2 \cdot l_b] / 4, \quad (4.28)$$

где Δd_i и Δl_b – соответственно максимальные положительные отклонения диаметра и длины мерной стержневой заготовки после ее рубки, мм.

Проверяем условие

$$\delta_{c\gamma} \leq V_p, \quad (4.29)$$

где $V_p = (0,01 \div 0,05) V_b$ – рекомендуемый максимальный избыток металла заготовки при закрытой штамповке.

Принимаем $V_p = 0,03 V_b$. Если условие (4.29) не выполняется, то выбирают прокат более высокой точности и осуществляют перерасчет $\delta_{c\gamma}$ по формуле (4.28). После выполнения условия (4.29) переходят к следующему модулю согласно алгоритму модуля М2, представленному на рисунке 4.2.

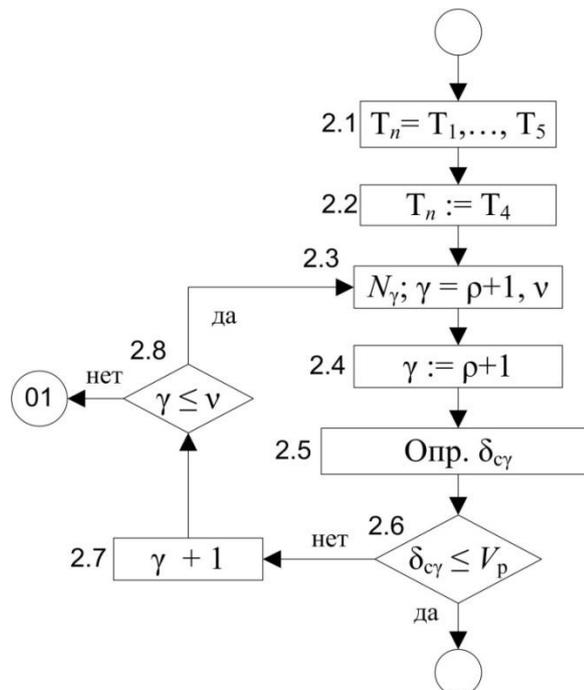


Рисунок 4.5 – Алгоритм модуля М2 рационализации выбора сортового проката для исходных заготовок составного изделия

Функционирование алгоритма модуля М2 (рисунок 4.5) осуществляют в следующем порядке.

Исходными данными для реализации алгоритма модуля М2 являются результаты, полученные на выходе из модуля М1, и сведения из ГОСТ 7505.

В блоке 2.1 вводят обозначения классов в соответствии с ГОСТ 7505 формулой (4.25). В блоке 2.2 принимают конкретное значение T_n (формула (4.26)). В блоке 2.3 вводят диапазон видов проката N_γ по формуле (4.27). После чего, в блоке 2.4 принимают значение номера видов проката и в блоке 2.5 рассчитывают максимальное положительное отклонение (δ_{cy}) по формуле (4.28). В блоке 2.6 проверяют условие (4.29), если оно не выполняется, то повышают точность проката (блок 2.7) и проверяют условие блока 2.8. Если условие блока 2.8 выполняется, то осуществляют пересчет, начиная с блока 2.3, если нет – изменяют исходные данные в блоке 01 обобщенного алгоритма (рисунок 4.2).

При выполнении условия в блоке 2.6 расчет модуля М2 завершается, результаты передаются в печать и переходят к модулю М3.

Модуль М3. Определение параметров глубокой зачистки контактных поверхностей заготовок

Оптимизацию геометрических параметров клинового выступа для глубокой зачистки контактных поверхностей перед сборкой заготовок, описанного в разделе 2.2.2, осуществляют согласно алгоритму (рисунок 4.6).

Исходными данными для реализации алгоритма является: выбранный класс точности сортового проката в модуле М2 (T_4).

В начале по формуле (2.21) определяют температуру T_{kj} металла в вершине рабочей кромки кольцевого выступа (блок 3.3) при температуре T_{rj} головной заготовки, варьируемой в диапазоне $T_{rj} \in [T_1; T_d]$, °С (блок 3.1). Затем, по соотношению $\sigma_{вк} = f(T_{kj})$, находят предел прочности $\sigma_{вкj}$ металла в вершине рабочей кромки клинового выступа при варьируемой температуре T_{rj} (блок 3.4) и в блоке 3.5 проверяют условие (2.22).

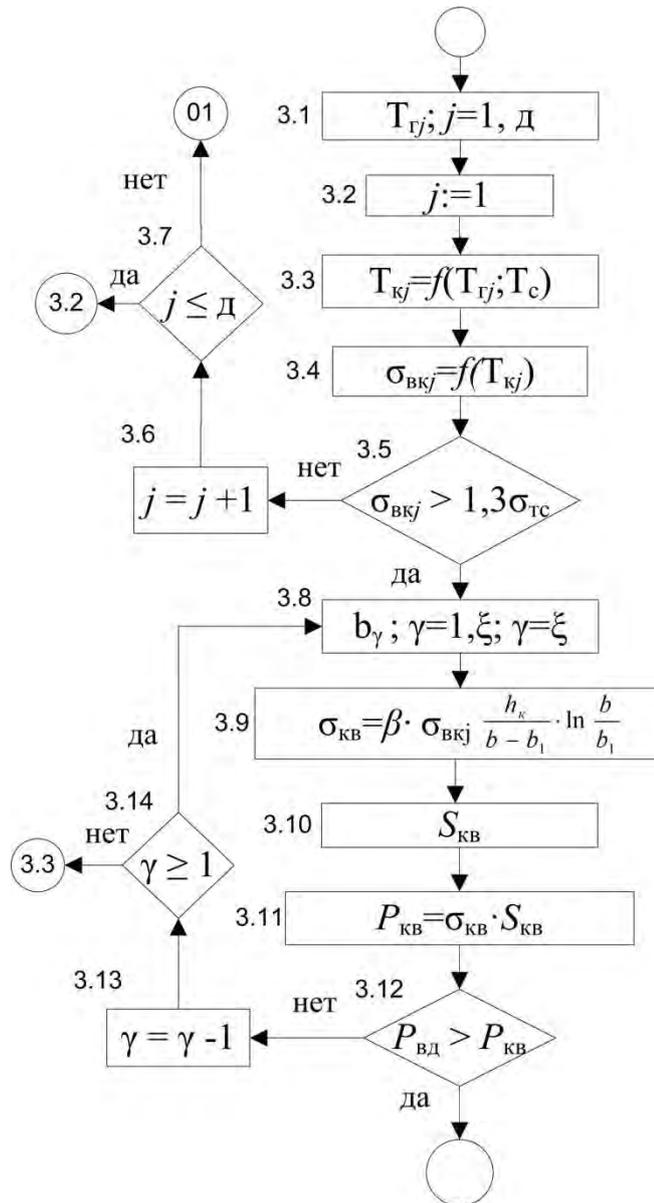


Рисунок 4.6 – Алгоритм модуля МЗ определения геометрических параметров клинового выступа для зачистки контактных поверхностей

Если условие (2.22) выполняется, то устанавливают ширину клиновой канавки (блок 3.8) и определяют напряжение $\sigma_{кв}$ при затекании металла в клиновую канавку (блок 3.9) по формуле (2.23). В случае невыполнения условия блока 3.5 повышают температуру нагрева ($T_{гj}$) головной заготовки на один шаг (блок 3.6), не превышая допустимую температуру нагрева (блок 3.7). Иначе переходят к блоку 01 обобщенного алгоритма (рисунок 4.2).

После этого в блоках 3.10 и 3.11 определяют площадь ($S_{кв}$) и усилие $P_{вд}$ по формулам (2.25) и (2.26) соответственно.

Затем проверяют условие $P_{вд} > P_{кв}$ (блок 3.12). Если условие выполняется, то осуществляется переход в следующий модуль. Если условие блока 3.12 не выполняется, то в блоках 3.13 и 3.14 варьируют температуру нагрева головной заготовки и проводят перерасчет, начиная с блока 3.8.

После передачи результатов расчета в печать переходят к следующему целевому модулю соответственно структуре технологического процесса получения составного изделия.

Модуль М4. Обоснование параметров противодавления при штамповке ССИ

Расчет силовых условий деформирования для зачистки контактных поверхностей с использованием напряжения противодавления осуществляют в следующем порядке (рисунок 4.7).

Исходными данными для реализации алгоритма является: выбранный класс точности T_4 сортового проката в модуле М2.

В блоке 4.1 устанавливают диапазон варьируемых температур нагрева (T_{Tj} , $j = 1, д$) головной заготовки, принимают $j = 1$ (блок 4.2) и переходят к выбору предела прочности ($\sigma_{вг}$) металла при температуре (T_{Tj}) деформации головной заготовки (блок 4.3).

Затем, по формуле (2.14) находят сопротивление деформации при вдавливании головной заготовки в стержневую (блок 4.4), площадь ($S_{вд}$) вдавливания $S_{вд} = \pi d_n^2 / 4$ (блок 4.5) и усилие ($P_{вд}$) вдавливания (блок 4.6) по формуле (2.26). В блоке 4.7 определяют напряжение среза ($\sigma_{ср}$) по формуле (2.15) и проверяют условие (2.12) (блок 4.8). Если условие не выполняется, то в блоке 4.9 повышают температуру нагрева головной заготовки, проверяют условие допустимости температуры нагрева (блок 4.10) и возвращаются в блок 4.2 или в блок 01 обобщенного алгоритма (рисунок 4.2) и меняют исходные данные.

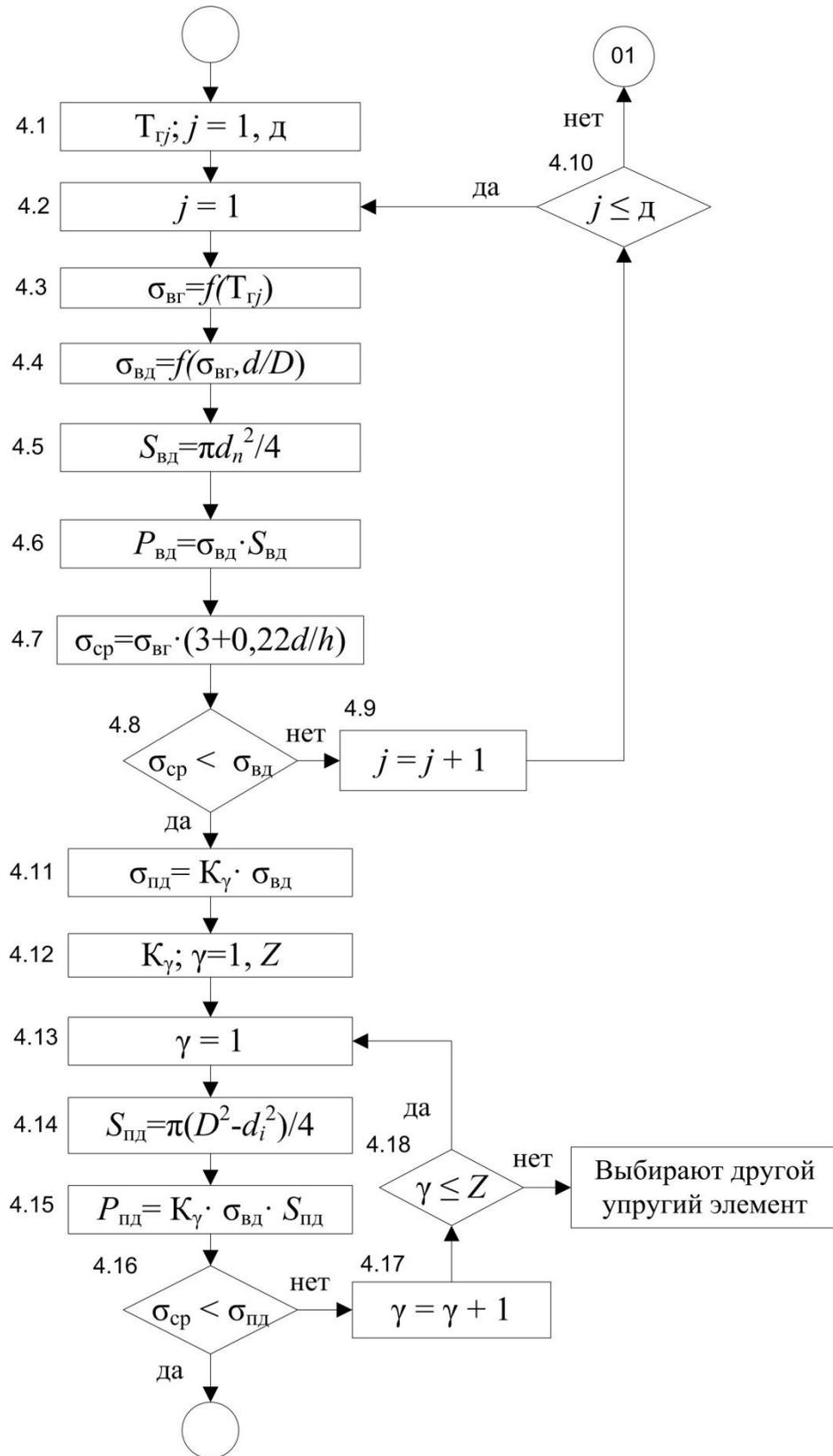


Рисунок 4.7 – Алгоритм модуля М4 зачистки контактных поверхностей с использованием напряжения противодействия

Если условие в блоке 4.8 выполняется, то переходят к следующему блоку (4.11) в котором устанавливают напряжение противодействия ($\sigma_{\text{пд}}$) по формуле $\sigma_{\text{пд}} = K_{\gamma} \cdot \sigma_{\text{вд}}$, при варьировании $\gamma = 1$, Z в диапазоне $K = 0,80 \div 0,95$; принимают $\gamma = 1$, определяют площадь приложения противодействия ($S_{\text{пд}}$) и рассчитывают усилие противодействия (блоки 4.12 ÷ 4.15).

В блоке 4.16 проверяют условие $\sigma_{\text{ср}} < \sigma_{\text{пд}}$.

Если условие блока 4.16 выполняется, то происходит переход в следующий модуль, если условие блока 4.16 не выполняется, то в блоках 4.17 и 4.18 повышают коэффициент противодействия K и начинают расчет с блока 4.13 или выбирают другой упругий элемент.

Модуль М5. Обоснование количества переходов штамповки изделия из сборной заготовки

Установлены четыре степени сложности горячештампованных поковок (ГОСТ 7505), номера которых примерно соответствуют количеству переходов при штамповке высадкой, например, на горизонтально-штамповочной машине [11]

$$C_{\phi} = C_1, \dots, C_4, \quad (4.30)$$

где C_{ϕ} – степени сложности поковок в порядке ее возрастания, номер которой соответствует количеству переходов (n) штамповки:

$$C_{\phi} = M_{\text{п.р.}} / M_{\text{о.ф.}}, \quad (4.31)$$

где $M_{\text{п.р.}}$ и $M_{\text{о.ф.}}$ – соответственно расчетная масса поковки и масса геометрической фигуры, описывающей поковку, мм³.

После расчета C_{ϕ} устанавливают номер степени сложности поковки и требуемое количество переходов для формообразования поковки.

Модуль реализован алгоритмом, представленным на рисунке 4.8.

Исходными данными для реализации алгоритма являются: данные, полученные в модулях М3 или М4, М1 и М2.

В блоке 5.1 вводят обозначения количества переходов в соответствии с формулой (4.30) и существующими степенями сложности поковки. В блоке 5.2 определяют расчетную массу поковки ($M_{\text{п.р.}}$), а в блоке 5.3 массу геометрической фигуры, описывающей поковку ($M_{\text{о.ф.}}$).

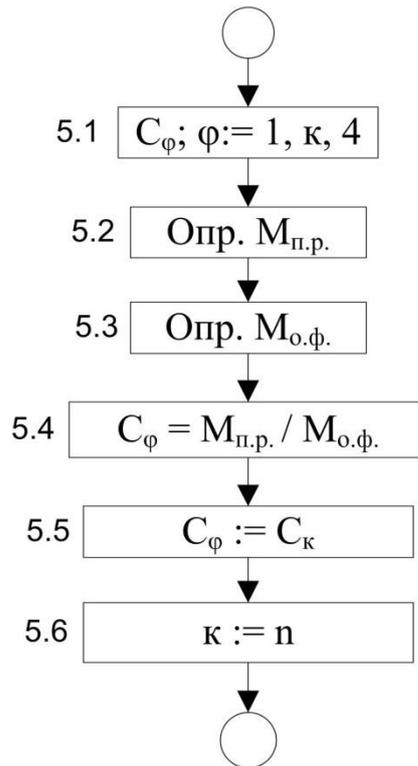


Рисунок 4.8 – Алгоритм модуля М5 обоснования количества переходов штамповки изделия из сборной заготовки

В блоке 5.4 определяют степень сложности поковки по формуле (4.31). После в блоке 5.5 принимают номер сложности поковки и в блоке 5.6 принимают количество переходов, необходимое для формообразования поковки. В зависимости от полученного результата, осуществляют переход в модуль М6 или М8.

Модуль М6. Обоснование однопереходной штамповки ССИ без градиентного нагрева стержневой заготовки

Интервал значений степени сложности C_1 условно разбивают на два диапазона. Первый диапазон: $C_{1a} \in [1,0-0,85]$ – поковка имеет простую конфигурацию, поэтому градиентный нагрев не требуется, и второй диапазон: $C_{1b} \in [0,84-0,63]$ – поковка имеет более глубокие впадины, выступы; поэтому сопротивление деформации металла при формировании головки составного изделия будет повышенным, и требуется градиентный нагрев стержневой заготовки, обеспечивающий после выравнивания температур среднюю ковочную температуру металлов обеих заготовок (рисунок 4.9).

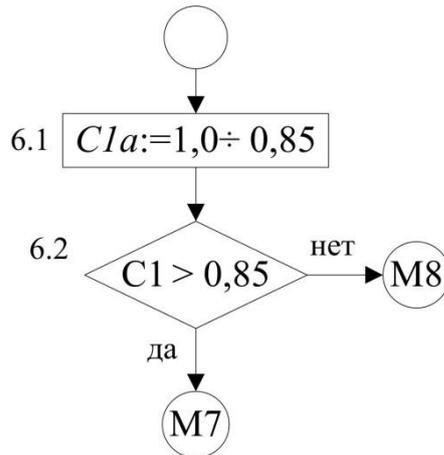


Рисунок 4.9 – Алгоритм модуля М6 обоснования однопереходной штамповки стержневого изделия без градиентного нагрева стержневой заготовки

В блоке 6.1. принимают интервал значений степени сложности $C1$ в диапазоне от 1,0 до 0,85. В блоке 6.2 проверяют условие

$$C1 > 0,85, \quad (4.32)$$

где $C1$ – значение степени сложности поковки, полученное в модуле М5.

Если условие (4.32) не выполняется, то, после занесения результатов расчета в печать, переходят в модуль М8. Если условие выполняется – в модуль М7.

Модуль М7. Обеспечение условия продольной устойчивости стержневой заготовки без градиентного нагрева

Модуль М7 реализован алгоритмом, представленным на рисунке 4.10.

В блоке 7.1 принимают диаметр стержневой заготовки, равным исходному, т.е. $d_i = d_1$. В блоке 7.2 определяют объем (V_B) высаживаемой (внедряемой) части стержня по формуле (4.18). Затем, с использованием найденного значения объема высадки (V_B) по выражению

$$l_B = 4V_B / \pi d_i^2. \quad (4.33)$$

определяют длину высадки стержневой заготовки.

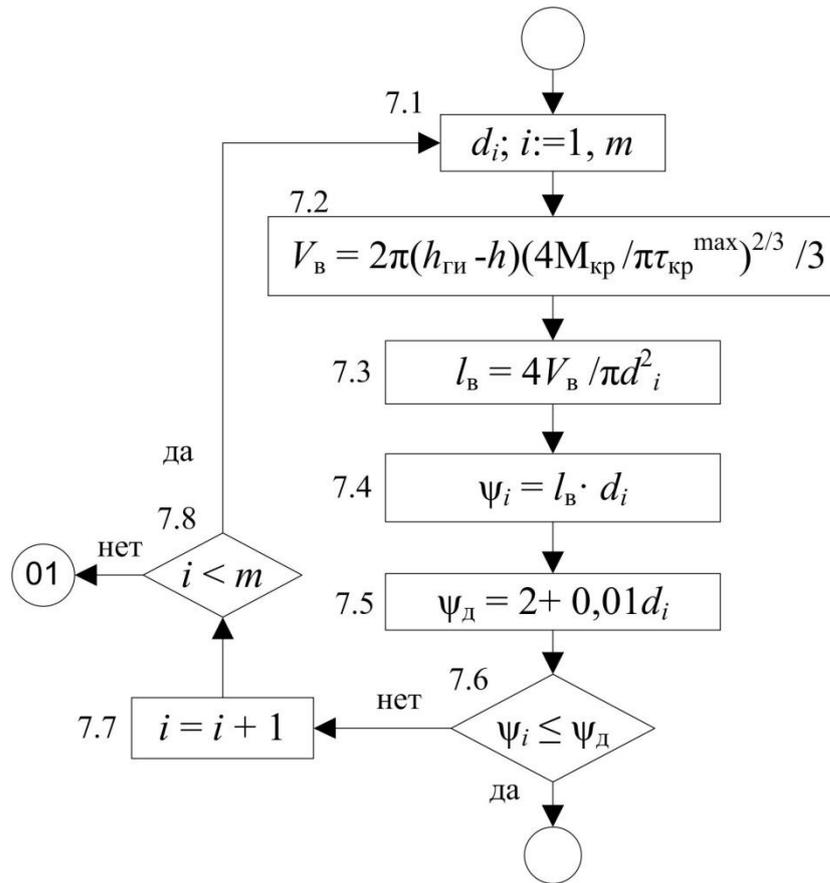


Рисунок 4.10 – Алгоритм модуля М7 обеспечения продольной устойчивости стержневой заготовки без градиентного нагрева

Затем в блоке 7.3 находят длину (l_B) высаживаемой части стержня по формуле (4.33).

Далее определяют фактическую (ψ_i) и допустимую (ψ_d) относительные длины высадки и проверяют условие продольной устойчивости высаживаемой части стержневой заготовки в допустимом интервале размеров (блоки 7.4÷7.6) по формулам (2.16) и (2.19).

Если условие блока 7.6 не выполняется, то увеличивают диаметр стержневой заготовки (блоки 7.1), проверяют условие блока 7.8 и осуществляют пересчет в блоках 7.1÷7.5.

После подачи результатов расчета в печать, переходят к следующему модулю.

Модуль М8. Оптимизация теплофизических и механических параметров ТП при градиентном нагреве стержневой заготовки [63]

Алгоритм оптимизации теплофизических и механических параметров технологического процесса при градиентном нагреве стержневой заготовки представлен на рисунке 4.11.

Исходной информацией являются μ , α , c и ρ – соответственно показатель трения, температуропроводность, удельная теплоемкость и плотность металла заготовок при температурах нагрева; T_c – варьируемая температура нагрева участка l_c стержневой заготовки, T_k – варьируемая температура концевой части стержня; и T_r – варьируемая температура нагрева головной заготовки; M_c и M_r – марки стали стержневой и головной заготовок; $\tau_{цв}$ – время цикла штамповки.

В блоках 8.1 ÷ 8.3 устанавливают вариации ($j:=1, m$ и $v:=1, q$) температур нагрева участков l_c (T_c) и l_k (T_k) стержневой заготовки и находят температурный параметр θ по формуле (2.30).

В блоках 8.4 и 8.7 проверяют условие (2.31).

В зависимости от полученного результата повышают температуру нагрева участка l_c или концевой части l_k (блоки 8.5 и 8.8) стержневой заготовки и пересчитывают температурный параметр θ (блоки 8.1 – 8.3).

Если температурный параметр θ удовлетворяет условию (2.31), то переходят к расчету величины смещения l_k зоны нагрева от торца концевого участка по формуле (2.32) (блок 8.10), затем определяют длину нагреваемого участка l_c по формуле (2.43) в блоке 8.11.

В блоке 8.12 находят предел прочности ($\sigma_{вс}$) стержневой заготовки в момент начала деформации.

В блоке 8.13 вводят информацию о температуре (T_r) нагрева головной заготовки и о возможных ее вариациях ($s = 1, p$) в допустимом диапазоне, затем в блоке 8.14 по температуре T_r находят предел прочности ($\sigma_{вр}$).

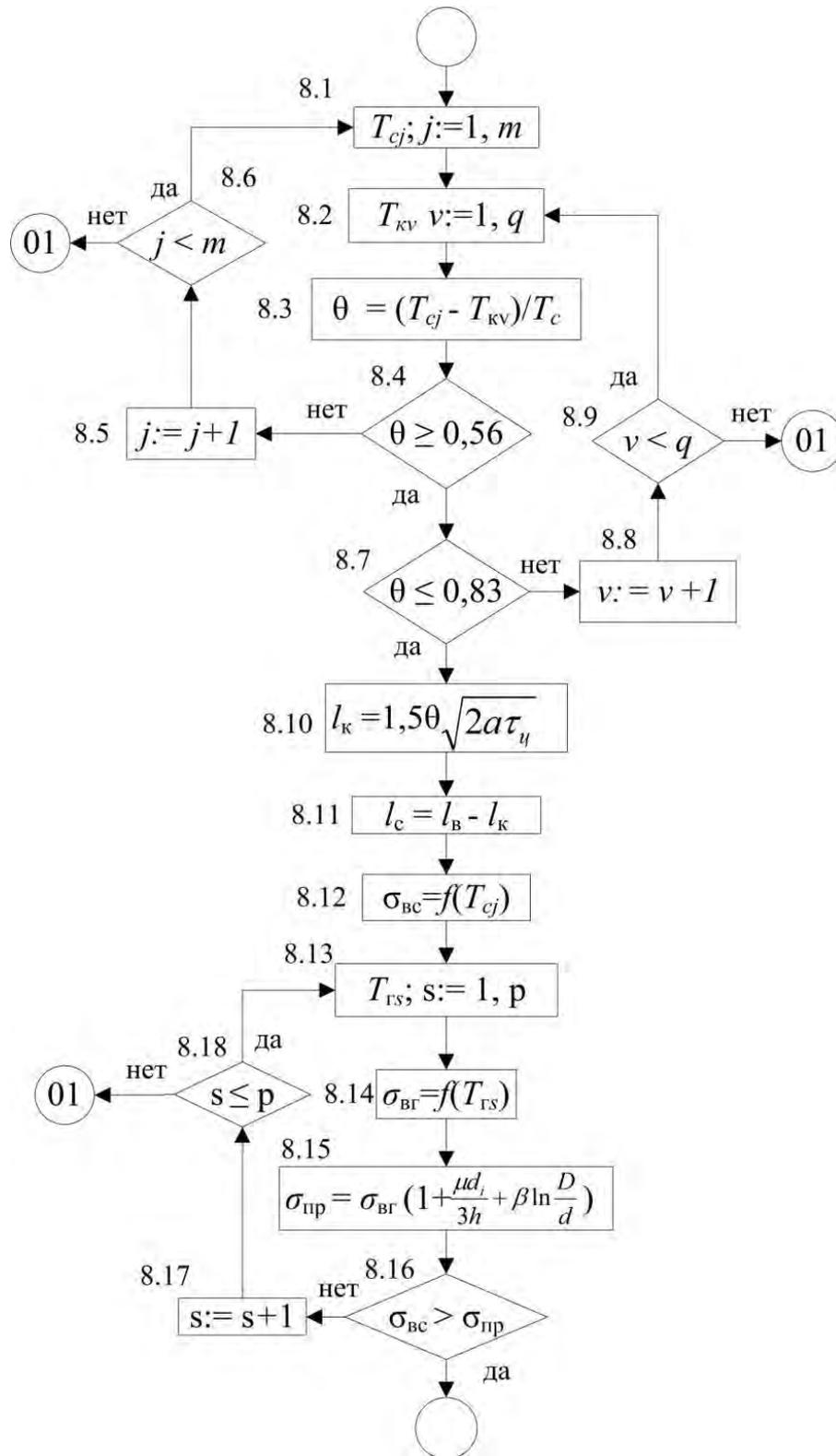


Рисунок 4.11 – Алгоритм модуля М8 обеспечения оптимальных технологических параметров процесса получения ССИ на основе градиентного нагрева стержневой заготовки

В блоке 8.15 рассчитывают сопротивление деформации ($\sigma_{пр}$) по формуле (2.36) и проверяют условие (2.44) в блоке 8.16.

Если условие блока 8.16 не выполняется, то повышают температуру нагрева головной заготовки (блок 8.17) и проводят перерасчет параметров в блоках 8.13 ÷ 8.15 до выполнения условия продольной устойчивости стержневой заготовки (блок 8.16).

При выполнении условия блока 8.16 подают результаты в печать и переходят к следующему модулю.

Модуль М9. Обеспечение условий продольной устойчивости стержневой заготовки при ее градиентном нагреве

Алгоритм обеспечения условий продольной устойчивости стержневой заготовки при ее градиентном нагреве представлен на рисунке 4.12.

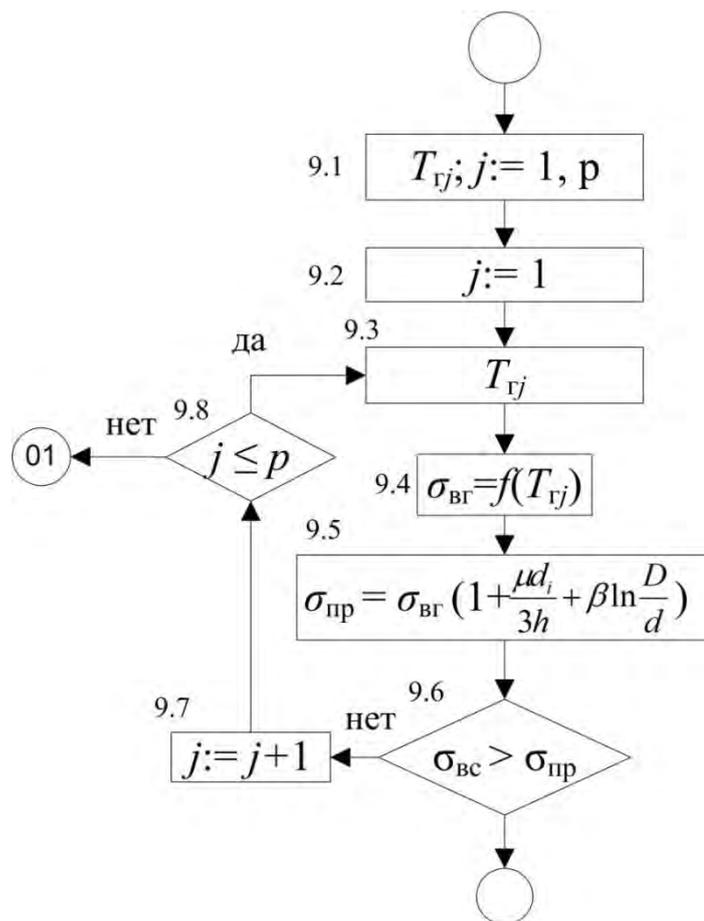


Рисунок 4.12 – Алгоритм модуля М9 обеспечения продольной устойчивости стержневой заготовки при ее градиентном нагреве

В блоках 9.1 – 9.3 модуля вводят информацию о температуре (T_r) нагрева головной заготовки и о возможных ее вариациях ($j = 1, p$) в допустимом диапазоне. Затем в блоке 9.4 по температуре T_{rj} находят предел прочности ($\sigma_{вг}$).

В блоке 9.5 рассчитывают сопротивление деформации ($\sigma_{пр}$) при глухой прошивке по формуле (2.36) и в блоке 9.6 проверяют условие (2.44).

Если условие блока 9.6 не выполняется, то повышают температуру нагрева головной заготовки (блоки 9.7 и 9.8) и проводят перерасчет параметров в блоках 9.1÷9.5 до выполнения условия продольной устойчивости стержневой заготовки (блок 9.6).

После регистрации результатов расчетов по всем целевым модулям, составляющим структуру конкретного технологического процесса получения составного стержневого изделия, переходят к оформлению проекта производственного технологического процесса.

4.3 Инновационный технологический процесс получения ССИ с тонкостенной оболочкой

На основе способа [53] разработана технология получения составных стержневых изделий с формированием тонкостенной оболочки на поверхности стержневого элемента с использованием оптимизационной системы проектирования и банка автономных модулей целевого назначения (рисунок 4.13).

При проектировании технологии штамповки составного стержневого изделия решают следующие задачи [7]:

- 1) разрабатывают схему штамповки изделия в окончательном ручье; устанавливают вид штамповочного оборудования;
- 2) конструируют поковку изделия;
- 3) проектируют технологический процесс штамповки;
- 4) оценивают эффективность выбранного технологического процесса [64, 65].

Схема штамповки стержневого составного изделия с тонкостенной оболочкой на стержневом элементе приведена в работе [53]. В качестве оборудования выбран гидравлический пресс высокой жесткости модели ДБ 2436 усилием 4,0 МН.

Согласно предложенному способу [53] перед сборкой металлических заготовок в штампе предусматривается зазор между поперечными размерами стержневой полости матрицы и диаметром соосно размещаемой в стержневой полости стержневой заготовки, равный толщине оболочки, которую формируют на поверхности стержневой заготовки в процессе совместного деформирования головной и стержневой заготовок (рисунок 4.13).

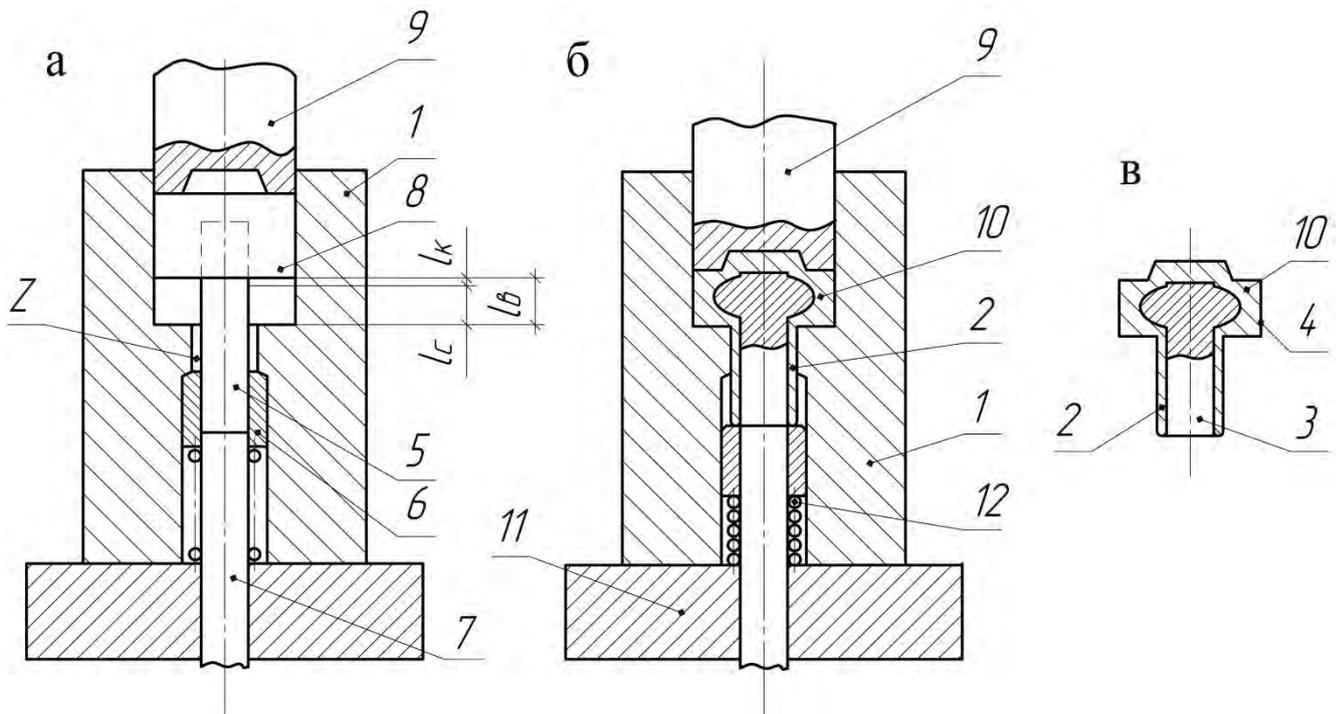


Рисунок 4.13 – Схема формирования составных стержневых изделий с тонкостенной оболочкой: в начале процесса сборки заготовок (а) и в момент завершения формообразования изделия (б), в – составное стержневое изделие с тонкостенной оболочкой: 1 – матрица; 2 – тонкостенная оболочка; 3 – стержневой элемент изделия 4; 5 – стержневая заготовка; 6 – направляющая втулка; 7 – выталкиватель; 8 – головная заготовка; 9 – пуансон; 10 – головная часть изделия 4; 11 – опорная плита; 12 – пружина

Это позволяет закрытой штамповкой получить головную часть изделия и путем выдавливания сформировать оболочку на поверхности стержневого элемента, что обеспечивает снижение трудоемкости процесса и энергоресурсов при формообразовании составной стержневой детали высокого качества с тонкостенной оболочкой.

При реализации процесса участок высадки стержневой заготовки подвергают градиентному нагреву, нагревая его бóльшую часть до ковочной температуры, а торцевую часть – за счет теплопередачи, что дает возможность получать низкую температуру торцевой части участка вдавливания стержневой заготовки, необходимую для обеспечения высокой прочности торца стержневой заготовки, работающего при сборке заготовок в качестве прошивня. В то же время бóльшую часть участка высадки можно нагревать до максимально высокой температуры с соблюдением условия его продольной устойчивости, что обеспечивает после теплопередачи от головной заготовки ковочную температуру металла сборной заготовки для последующего формирования составного изделия.

Температуры нагрева головной заготовки и участков стержневой заготовки определяют с использованием соотношения (2.27).

Схема реализации технологии получения составных стержневых с тонкостенной оболочкой изделий представлена на рисунке 4.13.

Диаметр стержневой полости матрицы 1 выполняют размером, обеспечивающим зазор Z , равный толщине оболочки 2, которую необходимо сформировать на поверхности стержневого элемента 3 изделия 4 после размещения стержневой заготовки 5 в стержневой полости (рис. 4.13, а, в).

Вначале осуществляют градиентный нагрев длины высадки l_b стержневой заготовки 5, нагревая участок l_c до варьируемой технологической температуры T_c согласно условию (2.27), а торцевой участок l_k до температуры T_k за счет теплопередачи. Нагретую стержневую заготовку 5 подают в стержневую полость и направляющую втулку 6 с упором в торец выталкивателя 7 (рис. 4.13, а, б). При этом нагреваемый участок (l_c) длины высадки l_b должен быть смещен от дна матрицы 1 на величину, равную толщине оболочки 2, чтобы избежать перекрытия

стержневой полости при ее раздаче в процессе сборки стержневой 5 и головной 8 заготовок (рис. 4.13, а).

Посредством пуансона 9 головную заготовку 8 вдавливают в стержневую заготовку 5 до упора в дно матрицы 1, выполняя, тем самым, глухую прошивку отверстия в головной заготовке 8 и одновременную сборку ее со стержневой заготовкой 5 (рис. 4.13, б).

При дальнейшем перемещении пуансона 9 формируют головную часть 10 и оболочку 2 составного стержневого изделия 4 путем выдавливания металла головной заготовки 8 через зазор Z (рис. 4.13, а, б). При скольжении металла вдоль поверхности стержневой заготовки 5 в условиях всестороннего объемного сжатия с поверхности стержневой заготовки 5 снимают оксиды и другие адсорбаты, создавая высокоактивные ювенильные контактные поверхности (рис. 4.13, б), чем обеспечивают прочное сварное соединение оболочки 2 с поверхностью стержневого элемента 3 изделия 4 (рис. 4.13, в). Этому способствует также быстрое охлаждение металла оболочки 2, которая плотно охватывает стержневой элемент 3. По мере удлинения оболочки 2 направляющая втулка 6 смещается в сторону опорной плиты 11, сжимая пружину 12. Полученное составное стержневое изделие 4 выталкивателем 7 удаляют из матрицы 1 (рис. 4.13, б).

Согласно чертежу составного стержневого изделия с тонкостенной оболочкой на стержневом элементе (например, ведущая шестерня дифференциала автомобиля), техническим требованиям к детали и годовой программы выпуска проведено конструирование поковки изделия в следующей последовательности [7]:

- 1) установлена точность штамповки и группа стали, рассчитана степень сложности изделия (ГОСТ 7505);
- 2) определена поверхность разъема штампа;
- 3) найден исходный индекс;
- 4) по таблицам ГОСТ 7505 найдены припуски и допуски на размеры поковки;

- 5) установлены кузнечные напуски;
- 6) установлены технические требования на поковку;
- 7) оформлен чертеж поковки.

На основании анализа исходных данных на изделие (блок 01 обобщенного алгоритма, рисунок 4.2) проведена структуризация и формализация отдельных этапов технологического процесса штамповки.

Для реализации отдельных этапов технологического процесса из обобщенного алгоритма оптимизационной системы (рисунок 4.2) выбран набор целевых модулей конкретного назначения: М1, М2, М4, М5, М8 и М9, алгоритмы выполнения которых представлены соответственно на рисунках 4.4, 4.5, 4.7, 4.8; 4.11 и 4.12. Итоговый результат представлен на рисунке 4.14. В модуле М1 происходит обоснование объемов исходных заготовок; в модуле М2 – рационализация выбора сортового проката для исходных заготовок; в модуле М3 – обоснование параметров противодавления при штамповке ССИ; в модуле М4 – обоснование количества переходов штамповки изделия из сборной заготовки; в модуле М8 – оптимизация теплофизических и механических параметров ТП при градиентном нагреве стержневой заготовки; в модуле М9 – обеспечение условий продольной устойчивости стержневой заготовки при ее градиентном нагреве.

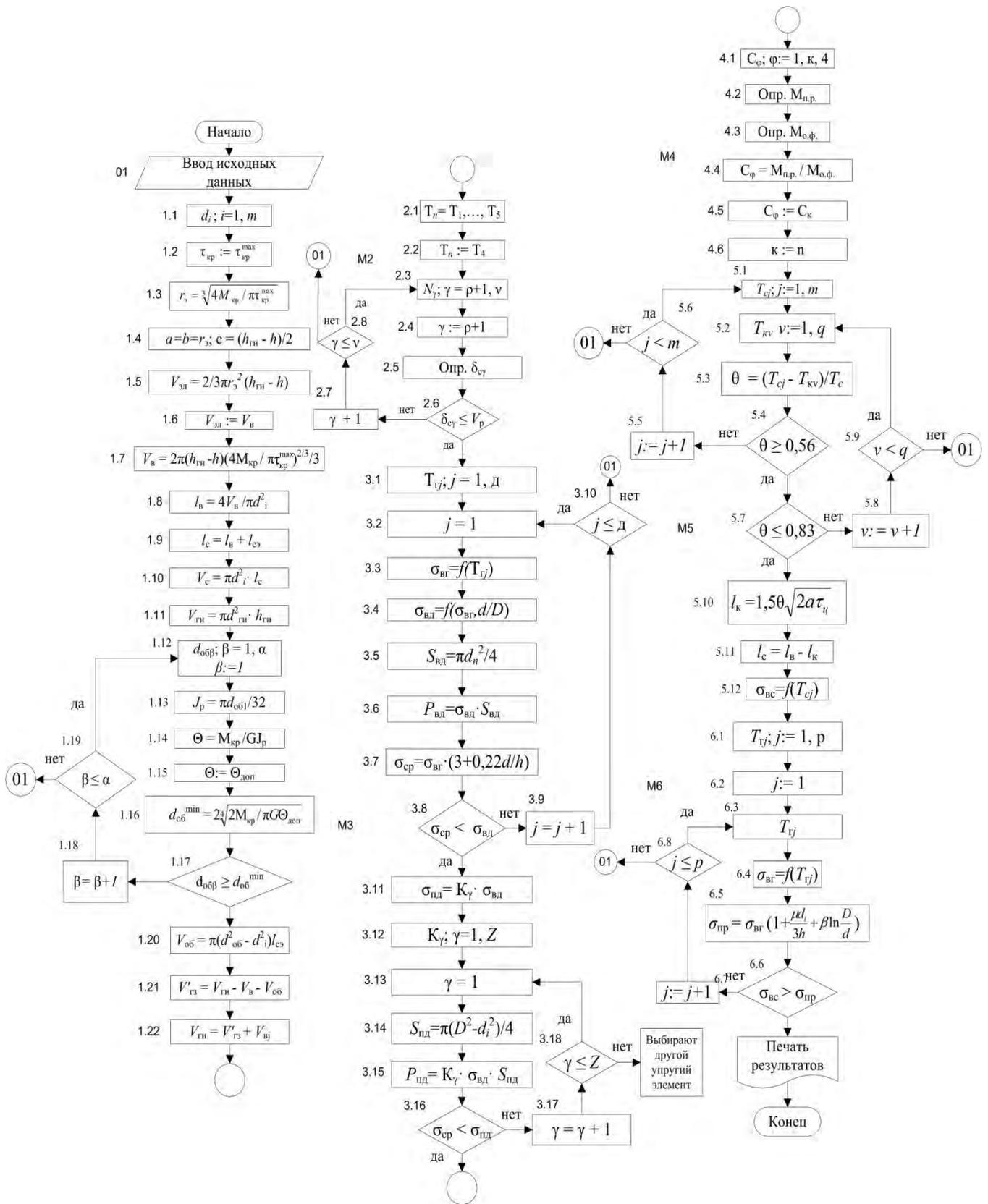


Рисунок 4.14 – Алгоритм оптимизации параметров процесса получения составного стержневого изделия с тонкостенной оболочкой

Выводы

1. Установлены теоретические предпосылки для создания моделей управления процессами сборки заготовок пластическим деформированием и формообразования составного стержневого изделия на основе условий монотонного течения металла в очаге деформации.

2. Спроектирована ОСУ ТП сборки заготовок пластическим деформированием и формообразования составного стержневого изделия на основе методов системного анализа и иерархического модульного принципа ее структурирования.

3. Разработан банк целевых технологических модулей конкретного назначения для построения ОСУ ТП, реализованных алгоритмами.

4. Обобщенный алгоритм ОСУ ТП и модульные алгоритмы конкретного назначения служат основой для автоматизации проектирования процесса штамповки составного изделия из сборной заготовки, получаемой совместным деформированием исходных заготовок.

Заключение

Итоги выполненной работы

1. В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что процесс штамповки составных изделий из сборных заготовок, получаемых совместным пластическим деформированием исходных металлических заготовок, обладает достаточной технологичностью и высокой эффективностью.

2. В результате экспериментальных исследований установлено:

1) наилучший показатель качества сборки ($\lambda = 83,5$) исходных заготовок совместным пластическим деформированием наблюдается при высоком относительном значении противодействия ($P_{\text{пл}} / P_{\text{вд}} = 0,9$) и наименьшем соотношении диаметров стержневой и головной заготовок ($d_i / D = 0,2$);

2) в результате компьютерного моделирования процесса сборки выявлено крайне неравномерное распределение напряжений и деформации: наибольшая сдвиговая деформация наблюдается в приконтактных областях объема головной заготовки, примыкающих к угловой и боковой поверхностям стержневой заготовки.

3. Разработанные иерархические гибридные модели управления процессами штамповки составных стержневых изделий, реализованные оптимизационными алгоритмами, могут стать основой для создания новых ресурсосберегающих технологических процессов производства составных изделий.

4. Разработанный банк информационно-логических целевых модулей, реализованных алгоритмами, служит основой для создания оптимизационной системы управления технологическими процессами и разработки инновационных технологий получения составных изделий различной формы конкретного назначения.

5. Обобщенный алгоритм оптимизационной системы управления технологическими процессами и целевые модульные алгоритмы служат основой для автоматизации проектирования процессов штамповки составных изделий из

сборных заготовок, получаемых совместным пластическим деформированием исходных заготовок.

6. Теоретические предпосылки, используемые для создания целевых модулей и подсистем управления процессами сборки металлических заготовок совместным пластическим деформированием и формообразования составных изделий, обеспечивают условия монотонного течения металла при штамповке составных поковок повышенного качества.

7. Оптимизационная система управления технологическими процессами формообразования составных изделий, спроектированная на основе методов системного анализа и иерархического модульного принципа ее структурирования, обеспечивает оптимизацию термомеханических параметров как отдельных этапов выполнения технологического процесса получения составного изделия, так и всего процесса в целом.

8. Запатентованные способы формообразования составных изделий из сборных заготовок, получаемых совместным пластическим деформированием исходных заготовок, приняты к внедрению на промышленных предприятиях края (Приложение А).

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы

Выполненная работа по повышению эффективности штамповки составных изделий из сборных заготовок, получаемых пластическим деформированием, весьма актуальна, представляет большой практический интерес и имеет следующие перспективы:

- разработка инновационных технологий производства ответственных составных изделий, работающих в тяжелых термомеханических условиях;
- создание прикладного программного обеспечения на основе оптимизационной системы управления технологическими процессами с целью автоматизации проектирования штамповки;
- создание оборудования повышенной жесткости, обеспечивающего условия штамповки составных изделий высокого качества.

Список литературы

1. Пичкалев, А. В. Обобщенная функция желательности Харрингтона для сравнительного анализа технических средств [Текст] / А. В. Пичкалев // Исследования наукограда. – 2012. – №1. – С. 25-28.
2. Сварка. Резка. Контроль [Текст] : справочник : в 2 т. / под общ. ред. Н. П. Алешина, Г. Г. Чернышева. – М. : Машиностроение, 2004. – Т.1 / Н. П. Алешин, Г. Г. Чернышов, Э. А. Гладков и др. – 624 с. : ил.
3. Банов, М. Д. Специальные способы сварки и резки [Текст] : учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / М. Д. Банов, В. В. Масаков, Н. П. Плюснина. – М. : Издательский центр «Академия», 2009. – 208 с.
4. Николаев, Г. А. Специальные методы сварки [Текст] : учебное пособие для студентов вузов. Изд. 2-е, испр. и доп. / Г. А. Николаев, Н. А. Ольшанский. – М. : «Машиностроение», 1975. – 232 с.
5. Герман, С. В. К вопросу повышения качества составных изделий, полученных пластическим деформированием [Текст] / С. В. Герман, М. И. Поксеваткин, Е. А. Иванайская и др. // Ползуновский альманах. – 2016. – №4. – С. 150-153.
6. Поксеваткин, М. И. Особенности формообразования составного изделия из сборной заготовки [Текст] / М. И. Поксеваткин, С. В. Герман, Е. М. Басова // Заготовительные производства в машиностроении. – 2015. – №8. – 20-23.
7. Поксеваткин, М. И. Проектирование и оптимизация процессов малоотходной горячей штамповки [Текст] / М. И. Поксеваткин. – Барнаул : Изд. АлтГТУ. – 2009. – 160 с.
8. Герман, С. В. Особенности образования составных клапанов ДВС пластическим деформированием [Электронный ресурс] / С.В. Герман, Е. М. Басова, М. И. Поксеваткин и др. // Горизонты образования. – Электрон. науч. журнал. - [Барнаул], 2015. – Вып. 17. – Приложения : 12-ая Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь – 2015» (НиМ-2015) Секция «Машиностроение». Подсекция

«Машиностроительные технологии и оборудование». – Режим доступа: <http://edu.secna.ru/publication/5/release/108/>. – Загл. с экрана.

9. А. с. 1316740 СССР, МПК В 21 К 1/74; В 21 J 1/04 Способ изготовления деталей с утолщениями на конце [Текст] / А. И. Осколков, М. И. Поксеваткин, Е. М. Пузырев. – №401249/30-27 ; заявл. 04.02.86 ; опубл. 15.06.87. Бюл. №22.

10. Перетяцько, В.Н. Развитие теории и практики металлургических технологий [Текст]: монография: в 3 т.; под ред. В.Н. Перетяцько: Пластичность и разрушение стали в процессе нагрева и обработки давлением / В.Н. Перетяцько, М.В. Темлянцев, М.В. Филиппова. – М.: Теплотехник, 2010. – Т. 2. – 351 с.

11. Ковка и штамповка [Текст] : справочник : в 2 т. Т. 2 : Горячая объемная штамповка / под общ. ред. Е. Н. Семенова : 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2010. – 720 с.: ил.

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

13. Герман, С. В. Алгоритмизация термомеханических параметров процесса сборки составных поковок [Текст] / С. В. Герман, Е. М. Басова, М. И. Поксеваткин // Инженерные исследования и достижения – основа инновационного развития: материалы IV Всероссийской научно-технической конференции 27-28 ноября 2014. – Под ред. к.ф.-м.н., доцента Е.А. Дудник. – Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2014. – С. 141-145.

14. Поксеваткин, М. И. Проектирование модели монотонного течения металла в процессе формообразования изделия из сборной заготовки [Текст] / М. И. Поксеваткин, С. В. Герман, Е. М. Басова // Ползуновский вестник. – 2015. – №3. – С. 12-14.

15. Крук, А. Т. Разработка научно обоснованных технических решений по повышению точности поковок, создание на их основе и промышленное внедрение тяжелых кривошипных горячештамповочных прессов [Текст] : дис. ... докт. техн. наук / А. Т. Крук. – Воронеж, 2000. – 435 с.

16. Дмитриев, А. М. Улучшение эксплуатационных и технологических свойств элементов конструкций пластическим деформированием [Текст] : монография / А. М. Дмитриев, А. Т. Крук, А. Д. Хван. – Воронеж : Изд-во Воронежского гос. ун-та, 2011. – 213 с.

17. Бэкофен, В. А. Процессы деформации [Текст] : пер. с англ. / В. А. Бэкофен. – М. : Metallurgia, 1977. – 288 с.

18. Пат. 2304487 Российская Федерация, МПК В 22 F 7/04 В 21 С 23/24 Способ изготовления биметаллических изделий [Текст] / Александров А.Б., Куликовских П.Д., Литвинов А. П., Труфанов М. А., Детцель А. Э.; заявитель и патентообладатель ОАО «Новосибирский завод химконцентратов». – №2006112360/02 ; заявл. 13.04.2006 ; опубл. 20.08.2007, Бюл. №23.

19. Пат. 2368482 Российская Федерация, МПК В 23 Р 11/02 Способ неразъемного соединения [Текст] / Галиуллов Р. Ш., Кочетов А. А.; заявитель и патентообладатель Галиуллов Р.Ш. – №2007139844/02 ; заявл. 30.10.2007 ; опубл. 27.09.2009, Бюл. №27.

20. Пат. 2327554 Российская Федерация, МПК В 23 К 20/12 Способ изготовления сваркой трением деталей, преимущественно, типа болт [Текст] / Плихунов В. В., Штрикман М. М.; заявитель и патентообладатель ОАО «Национальный институт авиационных технологий» (ОАО «НИАТ»). – №2006130217/02 ; заявл. 22.08.2006 ; опубл. 27.06.2008, Бюл. №18.

21. Герман, С. В. К вопросу получения неразъемного соединения металлических заготовок пластическим деформированием [Текст] / С. В. Герман, Е. М. Басова, М. И. Поксеваткин // Молодежь – Барнаул: материалы XVI научно-практической конференции молодых ученых / 17-25 ноября 2014 г. – Барнаул: Изд-во ГБОУ ВПО «Алтайский государственный медицинский университет», 2014. – С.418-419.

22. DE 3929534 Verfahren zur Herstellung eines Ventils; В 21 К1/22; Keck, Volker, Dipl.-Ing., 7000 Stuttgart, DE; Hora, Pavel, Dipl.-Ing., 7014 Kornwestheim, DE; Conradt, Walter, Dipl.-Ing., 7160 Gaildorf, DE; Anmelder Mercedes-Benz

Aktiengesellschaft, 7000 Stuttgart, DE; P 3929534.6; Anmeldetag 06.09.89; Offenlegungstag 28.03.91

23. Пат. 2091943 Российская Федерация, МПК Н 01 Т 21/02 Способ изготовления биметаллического центрального электрода искровой свечи зажигания двигателя внутреннего сгорания [Текст] / Рябинин С. Ю., Медведев Е. Б.; заявитель и патентообладатель Рябинин С. Ю., Медведев Е. Б. – №93045094/06 ; заявл. 23.09.1993 ; опубл. 27.09.1997.

24. А. с. 1697973 СССР, МПК В 21 К 1/22; В 21 К 25/00. Способ неразъемного соединения деталей [Текст] / А. И. Осколков, Ю. А. Гуляев, Б. В. Сопов; заявитель и патентообладатель Научно-производственное объединение «АНИТИМ». – №4773187/27 ; заявл. 25.12.89 ; опубл. 15.12.91. Бюл. №46.

25. Пат. 2056209 Российская Федерация, МПК В 21 К 1/22 Способ получения составных деталей [Текст] / Поксеваткин М. И., Осколков А. И., Гуляев Ю. А., Кузнецов Л. П., Перетяцько В. Н.; заявитель и патентообладатель Поксеваткин М. И., Осколков А. И., Гуляев Ю. А., Кузнецов Л. П., Перетяцько В. Н. - № 925042359 ; заявл. 18.05.1992. Опубл. 20.03.96. Бюл. №8.

26. Симонова, Л. А. Управление технологическим процессом сборки составных изделий металлических изделий прошивкой [Текст] / Л. А. Симонова, А. М. Валиев, Д. Л. Панкратов, С. Ф. Сарваров // Фундаментальные исследования. – 2014. – №9. – С. 1693-1696.

27. Симонова, Л. А. Автоматизированная система проектирования и технологической подготовки производства составных металлических изделий прошивкой [Текст] / Л. А. Симонова, А. М. Валиев, Д. Л. Панкратов, Р. Ф. Валиева // Фундаментальные исследования. – 2014. – №9. – С. 1697-1702.

28. Пат. 2589963 Российская Федерация: МПК В 21 К 1/22 В 21 К 25/00 Способ получения составной детали типа поковки тарельчатого клапана двигателя внутреннего сгорания [Текст] / Поксеваткин М. И., Герман С. В., Басова Е. М.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО АлтГТУ. – №2014146158/02 ; заявл. 17.11.2014 ; опубл. 10.07.2016, Бюл. №19.

29. Пат. 2623515 Российская Федерация, МПК В 21 К 25/00 Способ сборки металлических заготовок пластическим деформированием [Текст] / Поксеваткин М. И., Герман С. В., Иванайская Е. А., Басова Е. М.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО АлтГТУ. – №2015155875 ; заявл. 24.12.2015 ; опубл. 27.06.2017, Бюл. №18.

30. Багамутов, В. П. Элементы расчетов на устойчивость: учебное пособие / В. П. Багамутов, А. А. Белов, А. С. Столярчук. – Волгоград : ИУНЛ ВолГТУ. 2010. – 56 с.

31. Смуров, А. М. Практика и перспективы штамповки в закрытых (безоблойных) штампах [Текст] / А. М. Смуров. – М. : НИИНавтопром, 1967. – 336 с.

32. Губкин, С. И. Пластическая деформация металлов [Текст] / С. И. Губкин. – М.: Metallurgizdat, 1960. – 416 с.

33. Тихонов, А. С. Эффект сверхпластичности металлов и сплавов [Текст] / А. С. Тихонов. – М. : Наука, 1978. – 142 с.

34. Тарновский, И.Я. Контактные напряжения при пластической деформации [Текст] / И.Я. Тарновский, А.Н. Леванов, М.И. Поксеваткин. - М.: Metallurgiya. - 1966. - 220 с.

35. Поксеваткин, М. И. Повышение эффективности процессов получения тонкостенных полых деталей на основе активизации контактных сил трения [Текст] / М. И. Поксеваткин, С. В. Герман, Е. М. Басова // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – №7. – 2015. – С. 3-8.

36. Теория обработки металлов давлением [Текст] / И. Я. Тарновский [и др.] – М. : Metallurgizdat, 1963. – 672 с.

37. Колмагоров, В. Л. Напряжения, деформация, разрушение [Текст] / В. Л. Колмагоров. – М. : Metallurgiya, 1970. – 229 с.

38. Поксеваткин, М. И. Алгоритмизация технологических параметров закрытой объемной штамповки [Текст] / М. И. Поксеваткин, С. В. Герман, Е. А.

Иванайская и др. // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. – №7. – С. 44-47.

39. Атрошенко, А. П. Горячая штамповка труднодеформируемых материалов [Текст] / А. П. Атрошенко, В. И. Федоров. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979. – 287 с.

40. Пехович, А. И. Расчеты теплового режима твердых тел [Текст] / А. И. Пехович, В. М. Жидких. – М. : Энергия, 1976. – 300 с.

41. Герман, С. В. Условия формирования монотонного течения металла при получении изделий из сборной заготовки пластическим деформированием [Текст] / С. В. Герман, Е. М. Басова // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы: материалы V Всероссийской научно-практической конференции 26-27 ноября 2015 г. – Под ред. к.т.н., доцента В.В. Гриценко; к.т.н., доцента И.В. Курсова. – Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2015. – С.114-117.

42. Герман, С. В. Моделирование процесса получения неразъемного соединения металлических заготовок с помощью программы QFORM деформированием [Текст] / С. В. Герман, Е. М. Басова // Металлообрабатывающие комплексы и робототехнические системы – перспективные направления научно-исследовательской деятельности молодых ученых и специалистов [Текст]: сборник научных статей II Международной научно-технической конференции (17-18 июня 2016 года), в 2-х т. Т. 1. – Юго-западный гос. ун-т, Курск, 2016. – С. 81-83.

43. Поксеваткин, М. И. Моделирование процесса получения составных изделий пластическим деформированием [Текст] / М. И. Поксеваткин, А. А. Иванайский, С. В. Герман и др. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – №3. – 2017. – С. 13-16.

44. Третьяков, А. В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением [Текст] : справочник 2-е изд. / А. В. Третьяков, В. И. Зюзин. – М. : Metallurgia, 1973. – 224 с.

45. Поксеваткин, М. И. Определение параметров дифференциального нагрева стержневых заготовок [Текст] / М. И. Поксеваткин, А. И. Осколков, М. С. Мамонтов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2009. – №7. – С. 30-33.

46. Ковка и штамповка [Текст] : справочник : в 4 т. Т. 1 : Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка / под общ. ред. Е. Н. Семенова. – 2-е изд., перераб и доп. – М. : Машиностроение, 2010. – 717 с

47. Ильюшин, А. А. Пластичность [Текст] / А. А. Ильюшин. – М. : Изд. технико-теоретической литературы, 1949. – 349 с.

48. Смирнов-Аляев, Г. А. Теория пластичности деформаций металлов [Текст] / Г. А. Смирнов-Аляев, В. М. Розенберг. – М. : Изд. машиностроительной литературы, 1956. – 365 с.

49. Марочник сталей и сплавов [Текст] / под общ. ред. В. Г. Сорокина. – М. : Машиностроение, 1989. – 640 с.

50. Колмогоров, В. Л. Механика обработки металлов давлением [Текст] / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1986. – 688 с.

51. Тетерин, Г. П. Основы оптимизации и автоматизации проектирования технологических процессов горячей объемной штамповки [Текст] / Г. П. Тетерин, П.И. Полухин. - М. : - Машиностроение, 1979. - 284 с.

52. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов [Текст] / А. А. Спиридонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.

53. Пат. 2600599 Российская Федерация, В 21 К 1/22; В 21 К 25/00 Способ получения составных стержневых деталей [Текст] / Поксеваткин М. И., Герман С. В., Басова Е. М.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО АлтГТУ. - №2015116549/02 ; заявл. 29.04.2015 ; опубл. 27.10.2016, Бюл. №30.

54. Поксеваткин, М. И. Экспериментальное изучение силовых условий штамповки выдавливанием. Методические рекомендации к лабораторной работе по дисциплине «Специальные способы изготовления боеприпасов» [Текст] / М. И.

Поксеваткин, С. В. Герман // Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд. АлтГТУ, 2015. – 14 с.

55. Романовский, В. П. Справочник по холодной штамповке [Текст] / В. П. Романовский, - Л. : Машиностроение, 1979. - 520 с.

56. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением [Текст] : учебник для вузов. – Изд. 4-е, перераб. и доп. / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М.: «Машиностроение», 1977. – 423 с. : ил.

57. Герман, С. В. К вопросу формирования составных деталей пластическим деформированием [Электронный ресурс] / С.В. Герман, Е. М. Басова, М. И. Поксеваткин и др. // Горизонты образования. – Электрон. науч. журнал. - [Барнаул], 2015. – Вып. 17. – Приложения : 12-ая Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь – 2015» (НиМ-2015) Секция «Машиностроение». Подсекция «Машиностроительные технологии и оборудование». – Режим доступа: <http://edu.secna.ru/publication/5/release/108/>. – Загл. с экрана.

58. Герман, С. В. Формирование составной стержневой детали с полостью в утолщении из сборной заготовки [Текст] / С. В. Герман, М. И. Поксеваткин, Е. М. Басова и др. // Инновации в машиностроении: сборник трудов VII Международной научно-практической конференции. – Под ред. В. Ю. Блюменштейна. – Кемерово : КузГТУ, 2015. – 438-440.

59. Герман, С. В. Анализ особенностей изготовления биметаллических деталей ДВС [Текст] / С. В. Герман, Е. М. Басова // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы: Материалы V Всероссийской научно-практической конференции 26-27 ноября 2015 г. – Под ред. к.т.н., доцента В.В. Гриценко; к.т.н., доцента И.В. Курсова. – Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2015. – С. 112-114.

60. Артес, А. Э. Инновационные технологии объемной штамповки [Текст] / А. Э. Артес, В. В. Третьюхин. – М. : ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2015. – 204 с. : ил.

61. Артес, А. Э. Групповое производство деталей холодной объемной штамповкой [Текст] / А. Э. Артес. – М. : – Машиностроение. 1991. –192 с.

62. Межецкий, Г.Д. Сопротивление материалов [Электронный ресурс] : учебник / Г.Д. Межецкий, Г.Г. Загребин, Н.Н. Решетник. - 5-е изд. - М. : Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2016. - 432 с. : ил. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-5-394-02628-7 ; То же. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=453911>.

63. Иванайский, А. А. Анализ особенностей изготовления биметаллических деталей ДВС [Текст] / А. А. Иванайский, М. И. Поксеваткин, С. В. Герман и др. // Автоматизированное проектирование в машиностроении: материалы II международной заочной научно-практической конференции. – НОЦ «МС». – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2014. – №2. – С. 163-164.

64. Овчинников, А.Г. Основы теории штамповки выдавливанием на прессах [Текст] / А.Г. Овчинников. – М.: Машиностроение, 1983. – 200 с.

65. Сосенушкин, Е.Н. Прогрессивные процессы объемной штамповки [Текст] / Е.Н. Сосенушкин. – М.: Машиностроение. 2011. – 480 с.

66. Поксеваткин, М.И. Автоматизация выбора инструментального материала конкретного назначения [Текст] / М.И. Поксеваткин, Г.А. Околович, С.Ю. Скорых, А.С. Лавриненко // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2013. - №10. - С. 23-26.

Приложение А

(справочное)

Акты принятия к внедрению изобретений по патентам

ФКП «БОЗ»
ОКПО 07511608 ИНН 2204001528
КПП 220401001 ОГРН 1022200562570
Адрес: 659315, г. Бийск
Алтайского края, Россия
E-mail: root@boz.biysk.ru
Сайт: <http://www.fkpboz.ru>
<http://boz.pf>



Федеральное казенное
предприятие
«Бийский олеумный завод»
Телетайп: 233423 ЗАПАД
Факсы: (3854) 447566, 397024,
397404, 397429, 397389
Тел.: (3854) 396009, 396091
Тел. для справок: (3854) 397-209



Утверждаю
И.о.главного инженера
Ю.М.Петров

Акт

Внедрения изобретения к патенту РФ №2600599
от 24.08.2017 г.

Название изобретения: «Способ получения составных стержневых деталей»

Авторы: Поксеваткин М.И., Герман С.В., Басова Е.М.

Комиссия подтверждает, что данное изобретение принято к внедрению. Признаки изобретения, принятые в формуле изобретения будут использованы в работе при изготовлении клапанов нестандартного технологического оборудования.

Использование изобретения выражается в экономии высоколегированной стали, снижении трудоемкости их изготовления.

Председатель комиссии:

Главный механик

Члены комиссии:

Зам. главного механика

И.о.главного конструктора

С.В.Козлов

В.А.Филиппов

А.О.Лобанова

Утверждаю:
Технический директор
АО «Алтайвагон»
Пинзберг А.В.



Акт
Внедрения изобретения к патенту РФ №2600599
от 01.03.2017 г.

Название изобретения: «Способ получения составных стержневых деталей»
Авторы: Поксеваткин М.И., Герман С.В., Басова Е.М.

Комиссия подтверждает, что данное изобретение рассмотрено и принято к внедрению.

Признаки изобретения, сформулированные в формуле изобретения, будут использованы в работе.

Использование изобретения в результате экономии дорогостоящей жаропрочной стали при годовой программе выпуска 85 тыс. поковок составит 4,75 млн. руб.

Председатель комиссии:

Зам. технического директора
АО «Алтайвагон»

Кушаков С.В.

Члены комиссии:

Ведущий инженер

Жариков С.П.

Инженер-технолог

Чеснокова Е.С.

ФКП «БОЗ»
 ОКПО 07511608 ИНН 2204001528
 КПП 220401001 ОГРН 1022200562570
 Адрес: 659315, г. Бийск
 Алтайского края, Россия
 E-mail: root@boz.biysk.ru
 Сайт: <http://www.fkrboz.ru>
<http://боз.рф>



Федеральное казенное
 предприятие
 «Бийский олеумный завод»
 Телетайп: 233423 ЗАПАД
 Факсы: (3854) 447566, 397024,
 397404, 397429, 397389
 Тел.: (3854) 396009, 396091
 Тел. для справок: (3854) 397-209



Утверждаю
 И.о.главного инженера
 Ю.М.Петров

Акт

внедрения изобретения к патенту РФ №2589963

от 25.08.2017 г.

Название изобретения: «Способ получения составной детали типа поковки тарельчатого клапана двигателя внутреннего сгорания»

Авторы: Поксеваткин М.И., Герман С.В., Басова Е.М.

Комиссия подтверждает, что данное изобретение принято к внедрению. Признаки изобретения, принятые в формуле изобретения будут использованы в работе при изготовлении клапанов аварийного слива аппаратов спецпроизводств.

Использование изобретения выражается в экономии высоколегированной стали, снижении трудоемкости их изготовления.

Председатель комиссии:

Главный механик

Члены комиссии:

Зам. главного механика

И.о.главного конструктора

С.В.Козлов

В.А.Филиппов

А.О.Лобанова

Утверждаю:
Технический директор
АО «Алтайвагон»
Пинзберг А.В.



Акт
Внедрения изобретения к патенту РФ №2589963
от 01.05.2017 г.

Название изобретения: «Способ получения составной детали типа поковки тарельчатого клапана двигателя внутреннего сгорания»
Авторы: Поксеваткин М.И., Герман С.В., Басова Е.М.

Комиссия подтверждает, что данное изобретение принято к внедрению. Признаки изобретения, принятые в формуле изобретения будут использованы в работе.

Использование изобретения выражается в экономии жаропрочной стали. При годовой программе 68 тыс. изделий экономический эффект составляет 4620 тыс. руб.

Председатель комиссии:

Зам. технического директора
АО «Алтайвагон»

Кушаков С.В.

Члены комиссии:

Ведущий инженер

Жариков С.П.

Инженер-технолог

Чеснокова Е.С.