

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2018

Работа выполнена на кафедре «Машиностроительные технологии и оборудование» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им И.И. Ползунова»

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор,
ПОКСЕВАТКИН Михаил Иванович

Официальные оппоненты: **КАРЖАВИН Владимир Васильевич**,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург,
профессор кафедры «Металлургические и роторные машины»;

АЛЕКСАНДРОВ Александр Александрович, доктор технических наук,
доцент, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск,
профессор кафедры «Строительные конструкции»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»,
г. Новокузнецк

Защита состоится 14 июня 2018 года в 15:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.10 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?id=51&rid=277593>

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Раскатов Евгений Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Производство составных изделий из 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 совместным пластическим деформированием и отсутствия практических рекомендаций по проектированию технологических процессов формообразования составных изделий.

Отсутствуют также практические рекомендации по использованию оборудования повышенной жесткости для штамповки составных изделий.

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 Гарновского 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 производства составных изделий и улучшению конструкций оборудования. Не известны результаты исследований механизмов образования металлических связей и межслойного взаимодействия металлов контактных поверхностей в процессе сборки заготовок и формообразования изделий. 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 как основу для автоматизации проектирования технологий производства составных изделий.

Научная новизна работы:

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

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

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. Полученные разработки служат основой для автоматизации проектирования процессов получения составных изделий.

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 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.

На защиту выносятся следующие положения:

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 «Молодежь – Барнаулу», 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.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 26 печатных работ, в том числе 6 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, получено 3 патента РФ на изобретения.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, приложения, заключения и выводов, списка литературы. Работа содержит 129 страниц машинописного текста, 39 рисунков и 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, ее теоретическая и практическая значимость, обозначена научная новизна, сформулирована цель исследований.

В первой главе приведен аналитический обзор известных способов и технологий сборки исходных заготовок совместным пластическим деформированием (СИЗ СПД) и получения составных изделий; обоснован выбор способов формообразования изделий на основе технологичности и эффективности процессов.

На основе полученной информации была сформулирована цель и определены основные задачи исследования.

Во второй главе 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. 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. Предварительные металлографические исследования образцов составных поковок стержневого зубчатого колеса показали удовлетворительное качество сварных соединений. Для оптимизации технологических параметров получения составных стержневых поковок построены иерархические гибридные модели. При построении модели рассмотрены три ключевые проблемы: 1 – зачистка контактных поверхностей заготовок; 2 – обеспечение условия продольной устойчивости стержневой заготовки и 3 – обеспечение высоких значений напряжений шарового тензора в процессах сборки и формообразования составных стержневых изделий, создание условий монотонного течения металла при его деформировании.

Разработана технология получения составных стержневых изделий типа тарельчатого клапана ДВС [патент №2589963], которая 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 заготовке по контуру внедряемой стержневой заготовки прилагают усилие противодействия (рисунок 1):

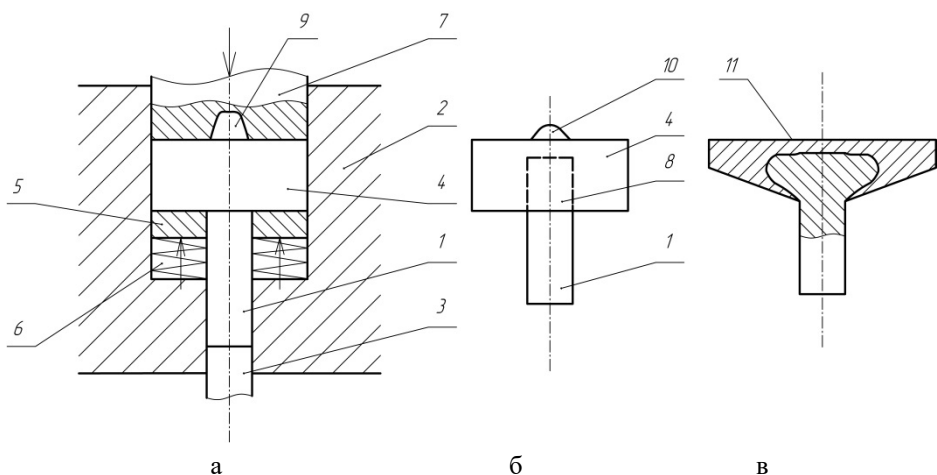


Рисунок 1 – Схема сборки металлических заготовок (а), сборная заготовка (б) и полученное изделие (в): 1 – стержневая заготовка; 2 – матрица; 3 – выталкиватель; 4 – головная заготовка; 5 – упорная плита; 6 – упругий элемент; 7 – пуансон; 8 – внедряемая часть стержневой заготовки; 9 – компенсационная полость;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

$$P_{\text{пд}} = \sigma_{\text{пд}} \cdot S_{\text{пд}}, \quad (1)$$

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

$$\sigma_{\text{ср}} < \sigma_{\text{пд}} < \sigma_{\text{вд}}, \quad (2)$$

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 1.

Приложение к головной заготовке усилия противодействия в процессе вдавливания в нее стержневой заготовки, создающие сжимающие напряжения по контуру прошиваемого отверстия, большие, 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, 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, исключаящее скол или разрыв межатомных связей в кристаллической решетке.

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. Для создания высоких сжимающих напряжений в очаге деформации принимают значения напряжения противодействия ($\sigma_{пл}$) равным $\sigma_{пл} = K \cdot \sigma_{вд}$ 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.

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.

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

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

$$\psi_i = (l_v / d_i) \leq \psi_d, \quad (3)$$

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

l_v – длина высадки стержневой заготовки, мм.

Модель процесса сборки металлических заготовок совместным пластическим деформированием реализована оптимизационным алгоритмом, представленным на рисунке 2.

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.

Разработанное техническое решение с использованием противодействия 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, прилагаемое усилие противодействия может оказаться недостаточным для исключения утяжины и, соответственно, глубокой и полной очистки контактных поверхностей от оксидов и других адсорбатов.

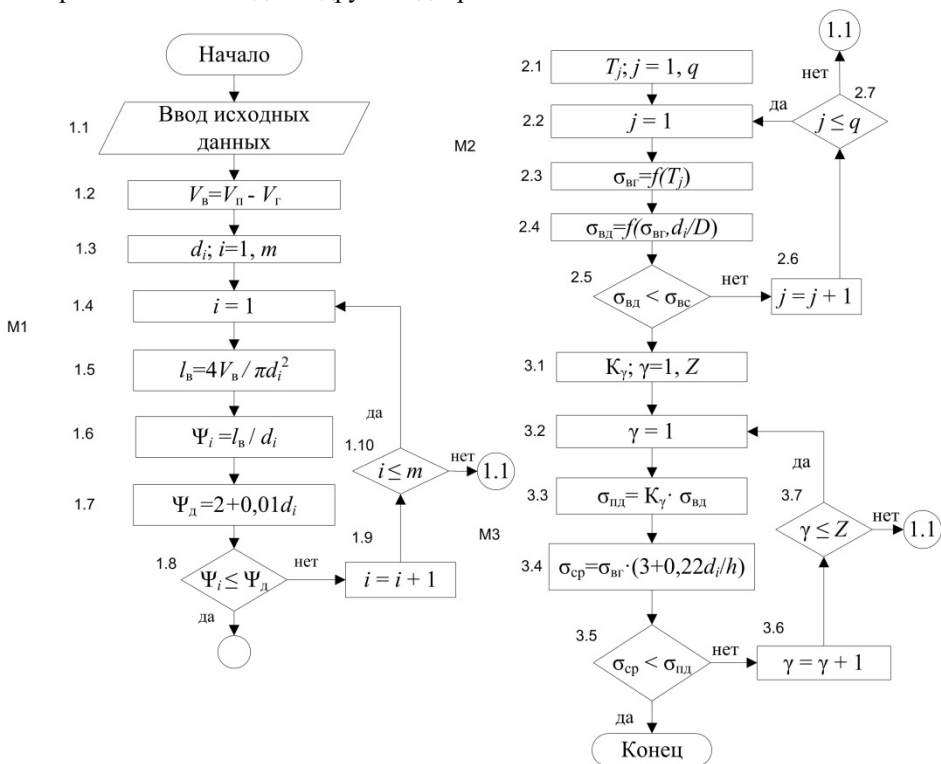


Рисунок 2 – Оптимизационный алгоритм процесса сборки металлических заготовок с противодавлением

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 [патент №2623515], 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.

Силовые условия формирования кольцевого выступа определяют из соотношения:

$$P_{\text{вд}} > P_{\text{пд}} > P_{\text{кв}}, \quad (4)$$

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 3.

Использование сформированного выступа клиновидного 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 (Пехович А.И.):

$$T_{kj} = T_j + (T_{c0} - T_j) \left[\sqrt{\frac{\lambda_{ст} c_{ст} \rho_{ст}}{\lambda_{г} c_{г} \rho_{г}}} / \left(\sqrt{\frac{\lambda_{ст} c_{ст} \rho_{ст}}{\lambda_{г} c_{г} \rho_{г}}} + 1 \right) \right], \quad (5)$$

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;

λ_r – коэффициент теплопроводности металла головной заготовки, Вт/(м·град);

c_r – удельная теплоемкость металла головной заготовки, Вт·ч/(кг·град);

ρ_r – плотность металла головной заготовки, кг/м³.

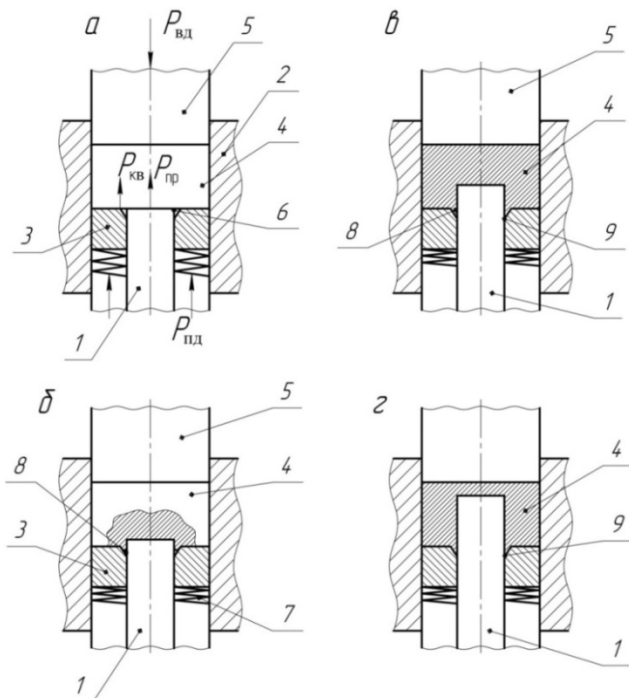


Рисунок 3 – Сборка металлических заготовок пластическим деформированием с глубокой зачисткой контактных поверхностей:

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) 1 – стержневая заготовка, 2 – матрица, 3 – упорное кольцо, 4 – головная заготовка, 5 – пуансон, 6 – коническая полость, 7 – упругий элемент, 8 – кольцевой выступ, 9 – рабочая кромка кольцевого выступа

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, т.е.

$$\sigma_{вкj} > 1,3\sigma_{тс}. \quad (6)$$

Модель процесса сборки металлических заготовок совместным пластическим деформированием с использованием обдирочного выступа реализована оптимизационным четырехмодульным алгоритмом, представленным на рисунке 4.

Первый модуль (M1) является информационным, во втором модуле (M2) рассчитывают силовые условия деформации, в третьем модуле (M3) оптимизируют напряжение противодействия, в четвертом модуле (M4) определяют силовые условия для эффективного использования клинового выступа.

Предложенная в работе (патент №2056209) технология получения составных стержневых изделий сложной формы, 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.

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

При реализации процесса вдавливаемый участок стержневой заготовки подвергают градиентному нагреву, нагревая его большую часть до ковочной температуры, а торцевую часть – за счет теплопередачи.

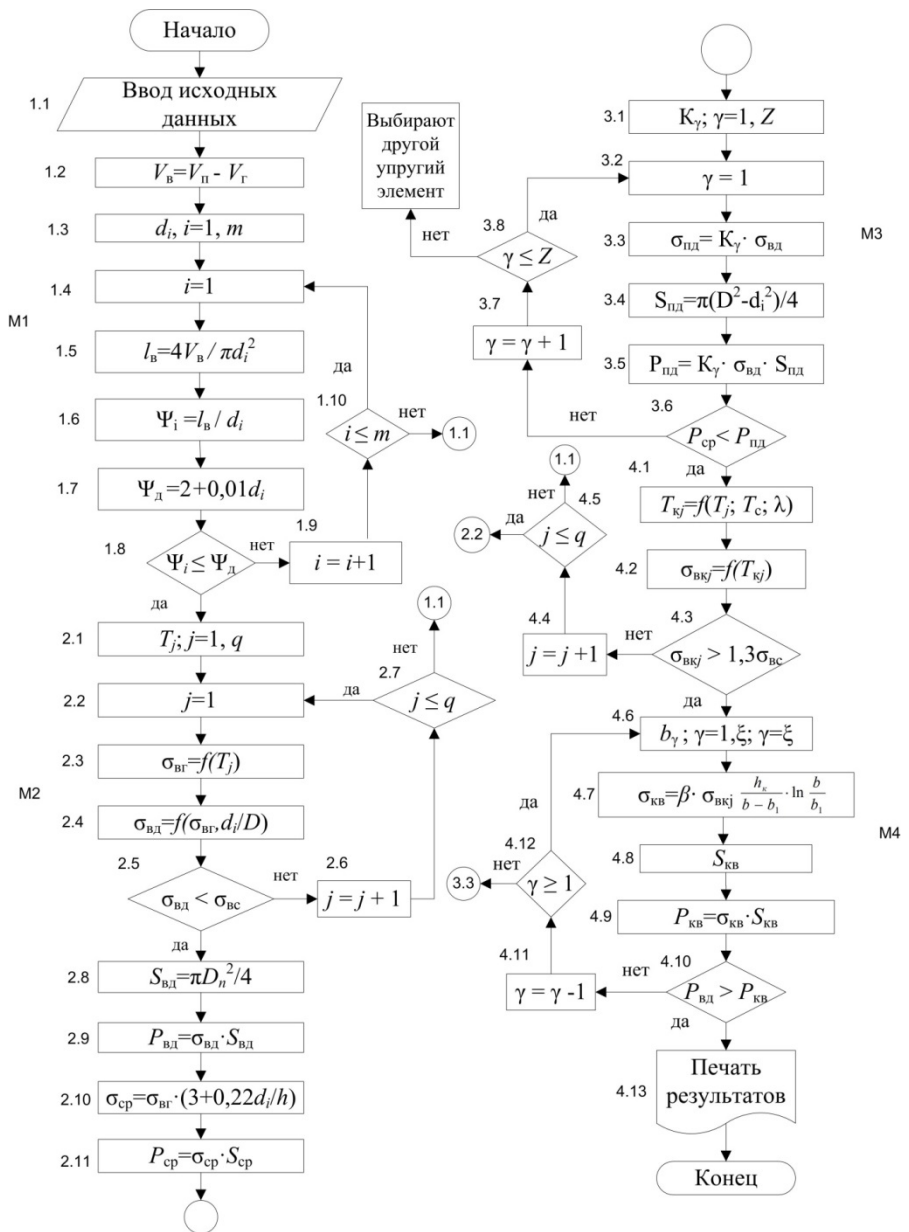


Рисунок 4 – Оптимизационный алгоритм процесса сборки металлических заготовок с глубокой зачисткой контактных поверхностей

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.

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 5, а) и 2) установить рациональные термомеханические параметры процесса штамповки.

Моделирование процесса сборки исходных заготовок с использованием градиентного нагрева осуществляют в следующей последовательности.

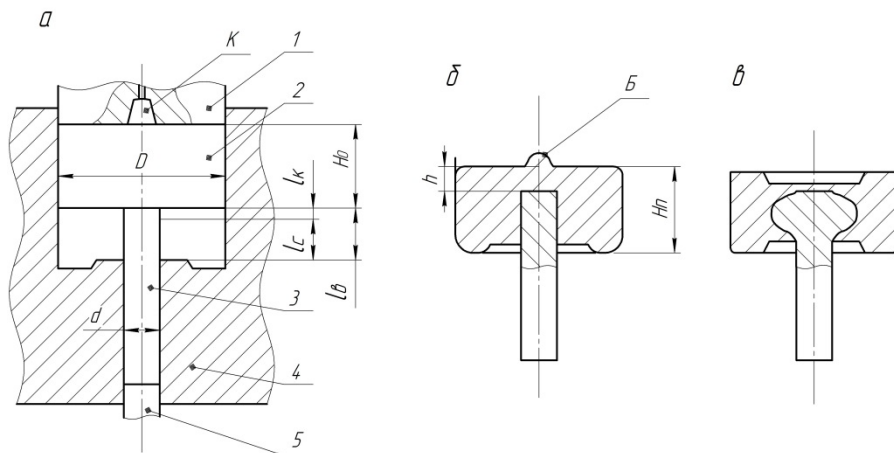


Рисунок 5 – Схема двухпереходного формирования составного стержневого изделия с использованием градиентного нагрева заготовок:
а – исходное положение штампа; б – сборная заготовка после первой стадии процесса (первый переход); в – составное изделие после второй стадии процесса (второй переход): 1 – пуансон; 2 – головная заготовка;
3 – стержневая заготовка; 4 – матрица; 5 – выталкиватель; К – компенсационная полость; Б - бобышка

Температуры нагрева головной заготовки 2 и элементов стержневой заготовки 3 (рисунок 5) определяют с использованием соотношения:

$$\sigma_{BK}(T_K) > \sigma_{BC}(T_C) > \sigma_{BG}(T_G), \quad (7)$$

где σ_{BK} – предел прочности металла концевой части l_K участка высадки l_B стержневой заготовки 3, нагреваемой за счет теплопередачи до температуры T_{TK} , 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_{BG} – предел прочности металла головной заготовки 2 при варьируемой ковочной температуре T_{Gs} , МПа; $s = 1, p$.

Моделирование процесса оптимизации проведено на примере получения составного зубчатого колеса с осью (рисунок 5), которое может быть использовано в качестве поковки ведущего колеса дифференциала автомобиля. Для рационализации термомеханических параметров градиентного нагрева внедряемой части заготовки вначале определяют величину смещения l_K зоны нагрева от торца концевой части 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, 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. При большем 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.

Для торца заготовки при $l_C = 0$ и $T = T_K$ (350+450 °С – по условию) с учетом $erf(-z) = -erf(z)$ находят температурный параметр θ :

$$\theta = \frac{T_c - T_k}{T_c} = \operatorname{erf} \frac{l_k}{2\sqrt{a\tau_{\text{ц}}}} = \Phi \left(\frac{l_k}{2\sqrt{a\tau_{\text{ц}}}} \right), \quad (8)$$

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

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

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

На основании полученных данных с точностью до 10% в диапазоне $0,56 < \theta < 0,83$ величину l_k можно рассчитывать по простой аппроксимации

$$l_k = 1,5\sqrt{2a\tau_{\text{ц}}} \cdot \frac{T_c - T_k}{T_c} = 1,5\sqrt{2a\tau_{\text{ц}}} \cdot \theta. \quad (9)$$

Затем, с целью упрощения практического использования зависимости (9) расчетную схему нагрева стержневой заготовки представляют в виде номограммы, в которую внесены корректировки соответственно материалам, используемым для составных изделий. В частности, включены теплофизические параметры жаропрочных и нержавеющей сталей (рисунок 6). По номограмме, используя значение $\tau_{\text{ц}}$, 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 $\tau_{\text{ц}}$ (см. ключ на рисунке 6).

На основании полученных зависимостей управления процессом заполнения полости штампа и оптимизации термомеханических параметров градиентного нагрева стержневых заготовок, спроектирована обобщенная модель управления процессом двухпереходной штамповки составных стержневых изделий, которая имеет практическую направленность.

Для выполнения условия (7) рассчитывают сопротивление деформации ($\sigma_{\text{пр}}$) при глухой прошивке головной заготовки 2, используя выражение Гарновского И.Я.:

$$\sigma_{\text{пр}} = \sigma_{\text{вг}} \left(1 + \frac{\mu \cdot d_i}{3h} + \beta \cdot \ln \frac{D}{d_i} \right), \quad (10)$$

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

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

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

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

$\beta=1,15$ – коэффициент Лодэ;

D – диаметр головной заготовки 2, мм.

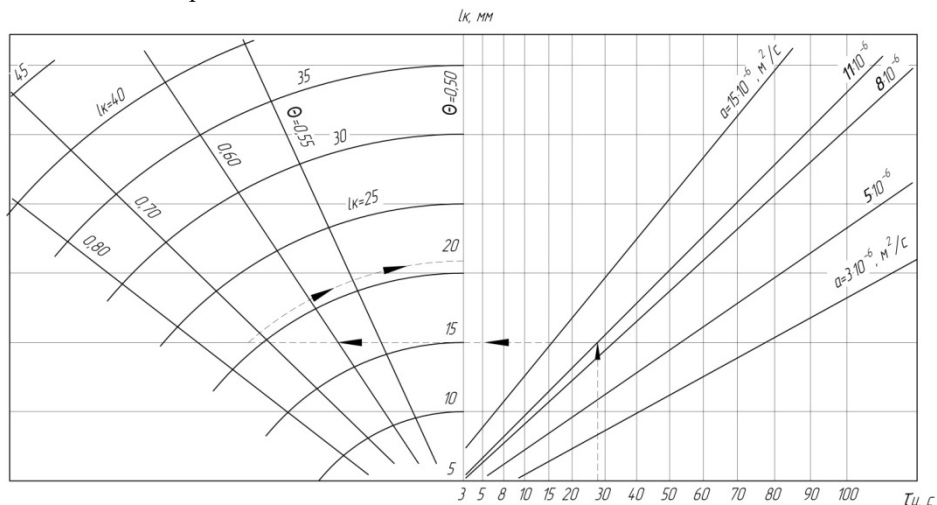


Рисунок 6 – Номограмма для определения теплофизических параметров нагрева заготовок

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

$$\sigma'_{вг}(T'_г, \text{ }^\circ\text{C}; \varepsilon_g, \%) = \sigma'_{вс}(T'_с, \text{ }^\circ\text{C}; \varepsilon_c, \%), \quad (11)$$

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

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

ε_g и ε_c – соответственно степени деформации заготовки 2 и участка l_b стержня 3.

Математическая модель процесса описана четырехмодульным алгоритмом, представленным на рисунке 7.

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 третьей главе описано экспериментальное исследование процессов сборки исходных заготовок и формообразования составного стержневого изделия. Для оптимизации производства составных изделий из сборных заготовок, получаемых совместным пластическим деформированием исходных заготовок, необходимо построить математическую модель процесса на основе результатов экспериментальных исследований.

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

$$\lambda = S_k / S_o, \quad (12)$$

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

Показатель качества сборки (λ), принятый за параметр оптимизации, зависит от ряда ключевых технологических факторов и может быть представлен в общем виде уравнением:

$$\lambda = f(T_r, d_i / D, P_{вд} / P_{пд}), \quad (13)$$

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.

Для проведения экспериментального исследования процесса сборки металлических заготовок пластическим деформированием разработана и изготовлена универсальная лабораторная установка, представленная на рисунке 8.

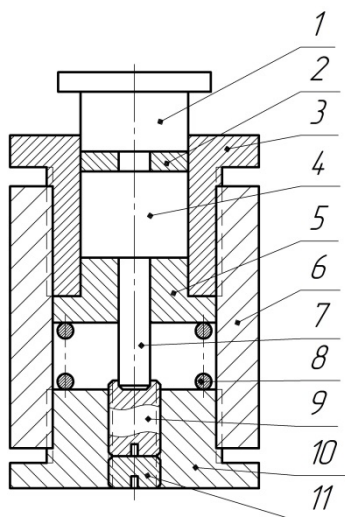


Рисунок 8 – Схема лабораторной установки для сборки заготовок пластическим деформированием: 1 – пуансон; 2 – компенсационная плита; 3 – матрица; 4 – головная заготовка; 5 – упорная вставка; 6 – обойма; 7 – стержневая заготовка; 8 – упругий элемент; 9 – регулировочный винт; 10 – основание установки; 11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

Получена экспериментальная модель для оценивания качества неразъемной сборки исходных заготовок посредством совместного их пластического деформирования при варьировании ключевых параметров процесса:

$$\lambda = 63,2 \cdot T^{0,035} \cdot (P_{вд} / P_{пл})^{0,115} / (d_i / D)^{0,015}. \quad (14)$$

Результаты исследования напряженно-деформированного состояния металлов исходных заготовок в процессе их сборки, проведенного с использованием компьютерного моделирования процесса сборки металлических заготовок на основе метода конечных элементов, согласуются с результатами экспериментальных исследований.

В четвертой главе изложена оптимизационная система управления процессом получения составного изделия.

Для практического использования полученных результатов исследования разработана оптимизационная система управления технологическими процессами 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.

Перечень автономизированных целевых модулей (рисунок 9):

- 1) модуль M1. Обоснование объемов исходных заготовок;
- 2) модуль M2. Рационализация выбора сортового проката для исходных заготовок: $(N_i; \gamma=1, \rho, v)$;
- 3) модуль M3. Определение параметров глубокой зачистки контактных поверхностей заготовок;

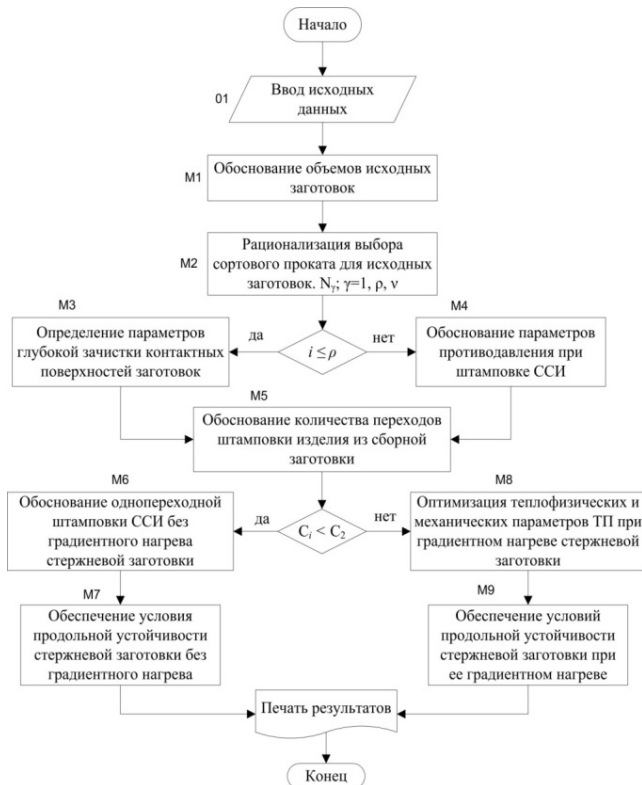


Рисунок 9 – Обобщенный оптимизационный алгоритм системы проектирования технологических процессов получения составного стержневого изделия пластическим деформированием

- 4) модуль M4. Обоснование параметров противодавления при штамповке ССИ;
- 5) модуль M5. Обоснование количества переходов штамповки изделия из сборной заготовки;
- 6) модуль M6. 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.

Оптимизационную систему управления конкретным технологическим процессом получения составного стержневого изделия проектируют посредством выбора установочных и целевых модулей из банка разработанных автономных модулей различного функционального назначения.

Система включает проверку прочностных условий составного изделия и принятых проектных решений на основе оценки их эффективности.

Схема реализации технологии получения составных стержневых изделий с тонкостенной оболочкой представлена на рисунке 10.

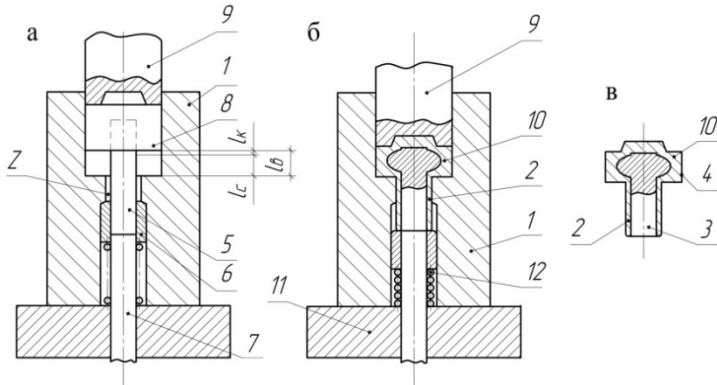


Рисунок 10 – Схема формирования составных стержневых изделий с тонкостенной оболочкой: в начале процесса сборки заготовок (а) и в момент завершения формообразования изделия (б), в – составное стержневое изделие с тонкостенной оболочкой: 1 – матрица; 2 – тонкостенная оболочка; 3 – стержневой элемент изделия 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

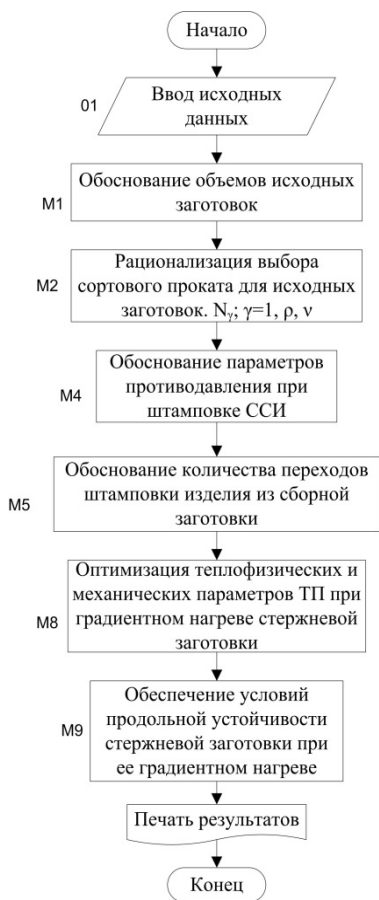


Рисунок 11 – Алгоритм оптимизации параметров процесса получения составного стержневого изделия с тонкостенной оболочкой

3. Обобщенный алгоритм оптимизационной системы управления технологическими процессами и модульные алгоритмы конкретного назначения служат основой для автоматизации проектирования процесса штамповки составного изделия из сборной заготовки, получаемой совместным деформированием исходных заготовок.

при формообразовании износостойких составных стержневых деталей высокого качества с тонкостенной оболочкой.

Для реализации отдельных этапов технологического процесса из обобщенного алгоритма оптимизационной системы (рисунок 9) выбран набор целевых модулей конкретного назначения: M1, M2, M4, M5, M8 и M9 (рисунок 11).

Основные результаты и выводы

1. Разработанные математические модели управления инновационными процессами штамповки составных стержневых изделий из сборной заготовки, получаемых совместным пластическим деформированием, реализованные оптимизационными алгоритмами, могут стать основой для создания новых ресурсосберегающих технологических процессов производства изделий.

2. Разработанный банк целевых технологических модулей для проектирования оптимизационной системы управления технологическими процессами, реализованный алгоритмами, служит основой для создания инновационных технологий получения составных изделий различной формы конкретного назначения и автоматизации процесса их проектирования.

4. Теоретические предпосылки, установленные для создания модулей и подсистем управления процессами сборки металлических заготовок совместным пластическим деформированием и формообразования составного изделия, служат основой для обеспечения условий монотонного течения металла при штамповке поковок высокого качества.

5. Оптимизационная система управления технологическими процессами сборки заготовок и формообразования составного изделия, 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.

6. Патентованные способы сборки металлических заготовок совместным пластическим деформированием приняты к внедрению

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

1. Герман, С.В. Особенности формообразования составного изделия из сборной заготовки / М.И. Поксеваткин, **С.В. Герман**, Е.М. Басова // Заготовительные производства в машиностроении (кузнечно-прессовое, литейное и другие производства). – 2015. – №8. – С. 20-23. (0,5 п.л. / 0,3 п.л.)

2. Герман, С.В. Повышение эффективности процессов получения тонкостенных полых деталей на основе активизации контактных сил трения / М.И. Поксеваткин, **С.В. Герман**, Е.М. Басова // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2015. – №7. – С. 3-8. (0,6 п.л. / 0,4 п.л.)

3. Герман, С.В. Проектирование модели монотонного течения металла в процессе формообразования изделия из сборной заготовки / М.И. Поксеваткин, **С.В. Герман**, Е.М. Басова // Ползуновский вестник. – 2015. – №3. – С. 12-14. (0,4 п.л. / 0,3 п.л.)

4. Герман, С.В. Алгоритмизация технологических параметров закрытой объемной штамповки / М.И. Поксеваткин, **С.В. Герман**, Е.А. Иванайская, Е.М. Басова // Заготовительные производства в машиностроении (кузнечно-прессовое, литейное и другие производства). – 2016. – №7. – С. 44-47. (0,5 п.л. / 0,4 п.л.)

5. Герман, С.В. Моделирование процесса получения составных изделий пластическим деформированием / М.И. Поксеваткин, А.А. Иванайский, **С.В. Герман**, А.А. Иванайская и др. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2017. – №3. – С. 13-16. (0,5 п.л. / 0,3 п.л.)

6. Герман, С.В. Моделирование процесса получения составных изделий пластическим деформированием на основе градиентного нагрева заготовок / М.И.

Поксеваткин, **С.В. Герман** // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2018. – №1. – С. 13-19. (0,9 п.л. / 0,6 п.л.)

Патенты:

7. Пат. № 2589963 РФ МПК В 21 К 1/22, В 21 К 25/00. Способ получения составных деталей типа поковки тарельчатого клапана двигателя внутреннего сгорания / 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.

8. Пат. № 2600599 РФ МПК В 21 К 1/22, В 21 К 25/00. Способ получения составных стержневых деталей / 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.

9. Пат. № 2623515 РФ МПК В 21 К 25/00. Способ сборки металлических заготовок пластическим деформированием / 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.

Статьи и тезисы, опубликованные в сборниках материалов конференций:

10. Герман, С.В. К вопросу получения неразъемного соединения металлических заготовок пластическим деформированием / **С.В. Герман**, Е.М. Басова, М.И. Поксеваткин // Молодежь – Барнаулу: 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. (0,2 п.л. / 0,1 п.л.)

11. Герман, С.В. Алгоритмизация термомеханических параметров процесса деформирования металла / **С.В. Герман**, А.А. Иванайский, М.И. Поксеваткин, Е.М. Басова / Автоматизированное проектирование в машиностроении: Материалы II международной заочной научно-практической конференции // НОЦ «МС». – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2014. – №2. – С. 163-164. (0,2 п.л. / 0,1 п.л.)

12. Герман, С.В. Алгоритмизация термомеханических параметров процесса сборки составных поволоков / **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 г / Под ред. к.ф.-м.н., доцента Е.А. Дудник / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2014. – С. 141-145. (0,5 п.л. / 0,4 п.л.)

13. Герман, С.В. Штамповка тонкостенных изделий с активизацией контактных сил трения / **С.В. Герман**, М.И. Поксеваткин, А.А. Иванайский, Е.М. Басова // Ежегодный научно-технический и производственный журнал «Актуальные проблемы в машиностроении». – 2015. – №2. – С. 132-136. (0,4 п.л. / 0,2 п.л.)

14. Герман, С.В. Особенности образования составных клапанов ДВС пластическим деформированием / **С.В. Герман**, Е.М. Басова, М.И. Поксеваткин, Е.А. Шарыго // 12-я Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь – 2015» – Загл. с экрана : <http://edu.secna.ru/publication/5/release/108/attachment/32/>. (0,25 п.л. / 0,2 п.л.)

15. Герман, С.В. К вопросу формирования составных деталей пластическим деформированием / **С.В. Герман**, Е.М. Басова, М.И. Поксеваткин, Е.А. Шарыго // 12-ая Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь – 2015» – Загл. с экрана : <http://edu.secna.ru/publication/5/release/108/attachment/32/>. (0,25 п.л. / 0,2 п.л.)

16. Герман, С.В. Формирование составной стержневой детали с полостью в утолщении из сборной заготовки / **С.В. Герман**, М.И. Поксеваткин, Е.М. Басова, К.Ю. Дунаев // В сборнике: Инновации в машиностроении (ИнМаш-2015) Сборник трудов VII Международной научно-практической конференции. Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Новосибирский государственный технический университет, Бийский технологический институт, МИП Техмаш ; под редакцией В.Ю. Блюменштейна, А.А. Баканова, О.А. Останина. 2015. – С.438-440. (0,25 п.л. / 0,1 п.л.)

17. Герман, С.В. Условия формирования монотонного течения металла при получении изделий из сборной заготовки пластическим деформированием / **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. (0,35 п.л. / 0,3 п.л.)

18. Герман, С.В. Анализ особенностей изготовления биметаллических деталей ДВС / **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. (0,3 п.л. / 0,25 п.л.)

19. Герман, С.В. Моделирование процесса получения неразъемного соединения металлических заготовок с помощью программы QFORM / **С.В. Герман**, Е.М. Басова // Металлообрабатывающие комплексы и робототехнические системы – перспективные направления научного исследования деятельности молодых ученых и специалистов: Сборник научных статей II Международной научно-технической конференции (17-18 июня 2016 года), в 2-х томах, Том 1, / редкол.: Гречухин А. Н. (отв. редактор); Юго-западный гос. ун-т, Курск, 2016. – С.81-83. (0,3 п.л. / 0,2 п.л.)

20. Герман, С.В. К вопросу повышения качества составных изделий, полученных пластическим деформированием / **С.В. Герман**, М.И. Поксеваткин,

Е.А. Иванайская, Е.М. Басова и др. // Ползуновский альманах. – 2016. – №4. – С. 150-152. (0,3 п.л. / 0,2 п.л.)

21. Герман, С.В. Лабораторная установка для экспериментального исследования механизма образования неразъемного соединения / **С.В. Герман**, М.И. Поксеваткин, Е.А. Иванайская, Е.М. Басова и др. // Ползуновский альманах. – 2016. – №4. – С. 159-160. (0,4 п.л. / 0,3 п.л.)

22. Герман, С.В. Экспериментальное исследование механизма образования неразъемного соединения пластическим деформированием / **С.В. Герман**, М.И. Поксеваткин, Е.А. Иванайская, Е.М. Басова и др. // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы: Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием 24-25 ноября 2016 г., посвященной 70-летию Рубцовского индустриального института. / Под ред. к.т.н., О.А. Михаленко; к.ф.-м.н., доцента Г.А. Обуховой / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2016. – С. 60-64. (0,5 п.л. / 0,3 п.л.)

23. Герман, С.В. Проектирование оптимизационной системы управления технологическими процессами сборки заготовок пластическим деформированием / **С.В. Герман**, М.И. Поксеваткин, Д.И. Бакланов, Е.М. Басова // Ползуновский альманах. – 2017. – № 4. – Т. 5. – С.47-50.

24. Герман, С.В. Компьютерное моделирование сборки заготовок совместным пластическим деформированием в программе DEFORM-3D / **С.В. Герман**, М.И. Поксеваткин, Д.И. Бакланов, Е.М. Басова // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы: Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции 27-28 октября 2017 г. / Под ред. к.т.н., доцента С. А. Гончарова; к.ф.-м.н., доцента Е. А. Дудник / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2017. – С. 123-125. (0,25 п.л. / 0,2 п.л.)