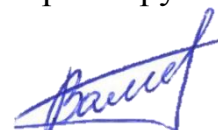


**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи



Валиев Айнур Миннегаянович

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ И
УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ СБОРКИ
НЕРАЗЪЕМНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (в машиностроении)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Набережные Челны – 2018

Работа выполнена на кафедре «Автоматизация и управление» в Набережночелнинском институте (филиале) ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Машиностроение»
Набережночелнинского института
(филиала) ФГАОУ ВО КФУ
Панкратов Дмитрий Леонидович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Автоматизация
технологических процессов» ФГБОУ ВО
«Уфимский государственный
авиационный технический университет»
Люттов Алексей Германович

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Автоматизированные
системы управления» ФГБОУ ВО
«Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
Андреев Сергей Михайлович

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Ижевский государственный
технический университет имени М.Т.
Калашникова» (г. Ижевск).

Защита состоится «07» декабря 2018 г. в 13:30 на заседании диссертационного совета Д212.081.31 в Набережночелнинском институте (филиале) ФГАОУ ВО Казанского (Приволжского) федерального университета по адресу: 423810, Татарстан, г. Набережные Челны, пр. Мира, 13А, УЛК-5, ауд. 309.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Набережночелнинского института (филиала) ФГАОУ ВО Казанского (Приволжского) федерального университета и на сайте <http://kpfu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенные печатью организации направить по адресу: 423812, Татарстан, г. Набережные Челны, пр. Сююмбике, 10А, диссертационный совет Д212.081.31.

Email: mirkampi@mail.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д212.081.31



к.т.н., доцент
Мавлеев Ильдус Рифович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время разработка и внедрение автоматизированных систем управления технологическими процессами с элементами искусственного интеллекта даёт возможность решения проблемы производственной реализации сложных задач изготовления машиностроительных изделий с обеспечением требуемого их качества. Примером таких технологий являются процессы сборки неразъемных изделий. Основным преимуществом применения неразъемных изделий является возможность сочетания в одном цельном изделии свойств различных марок сталей. Например, с помощью применения таких изделий можно решить задачу экономии дорогостоящих легированных сталей при сохранении эксплуатационных свойств штампового инструмента.

Среди известных способов сборки неразъемных изделий особое место занимают способы, осуществляемые с использованием пластической деформации, когда неразъемное соединение получается при температуре ниже температуры плавления соединяемых металлов. При этом в области соединения практически отсутствуют зоны структурной и химической неоднородности, присущие способам получения неразъемных изделий с помощью сварки плавлением.

Основной проблемой сборки пластической деформацией является обеспечение точности геометрических размеров и прочности соединения элементов неразъемных изделий. Создание и внедрение автоматизированных систем управления технологическими процессами способствует получению высоких показателей качества сборки неразъемных изделий пластической деформацией.

Работа основывается на достижениях в области получения неразъемных соединений пластической деформацией: С.Б. Айнбиндера, Н.Ф. Казакова, Э.С. Каракозова, А.Г. Кобелева, Ю.Л. Красулина А.В. Щенятского и И.В. Абрамова, моделирования и управления технологическими процессами, в том числе с применением методов искусственного интеллекта: Шуваева В.Г., Львова Н.С., Гладкова Э.А., Л.А. Заде, Е.Н. Мамдани, Цукамото, Н.Г. Ярушкиной, Суджено, Ю.Н. Хижнякова, И.З. Батыршина, В.Н. Бондарева и т.д.

На сегодняшний день недостаточная изученность вопросов создания автоматизированных систем управления технологическими процессами сборки неразъемных изделий пластической деформацией, отсутствие методик точного расчета параметров соединяемых элементов изделия, математических моделей учета их формоизменения в процессе сборки, вследствие поэтапной локализации деформации в соединяемых элементах изделия, делает управление процессом в режиме реального времени с помощью существующих автоматизированных систем практически невозможным. В связи этим актуальной является разработка системы моделирования и управления автоматизированным технологическим процессом сборки неразъемных изделий пластической деформацией, которая позволит обеспечить точность геометрических размеров и прочность соединения элементов неразъемных изделий.

Объект исследования - система автоматизированного управления технологическим процессом сборки пластической деформацией неразъемных изделий.

Предмет исследования - процесс автоматизированного управления сборкой неразъемных изделий пластической деформацией.

Цель диссертационной работы - разработка системы моделирования и управления автоматизированным технологическим процессом сборки неразъемных изделий пластической деформацией с требуемой геометрической точностью и прочностью.

Для достижения цели поставлены и решены следующие **научные задачи**:

1. Исследовать процесс сборки неразъемных изделий пластической деформацией, провести анализ современного состояния управления данным процессом.

2. Разработка структурных решений создания многоуровневой системы моделирования и управления автоматизированным технологическим процессом сборки неразъемных изделий пластической деформацией.

3. Разработка математических моделей и алгоритма расчета параметров технологического процесса сборки соединяемых элементов изделия.

4. Разработка способа управления технологическим процессом сборки неразъемного изделия пластической деформацией.

Научная новизна:

1. Разработана многоуровневая структура системы моделирования и управления в реальном времени автоматизированным технологическим процессом сборки неразъемных изделий пластической деформацией, отличающаяся тем, что с учётом результатов моделирования пластического течения металла обеспечивается поэтапная локализация деформаций в соединяемых элементах изделия (*п.3 паспорта специальности*).

2. Разработаны математические модели, алгоритм расчета геометрических параметров соединяемых элементов и параметров технологического процесса сборки неразъемного изделия, отображающие условия их пластического формоизменения в реальном времени (*п.4 паспорта специальности*).

3. Разработан способ управления в реальном времени хода технологического процесса с применением нечеткой логики для коррекции временных параметров с целью повышения эффективности производства (*п.1 паспорта специальности*).

Практическая значимость работы. Разработанная автоматизированная система использована для производства опытной партии составного инструмента в НПА «Технопарк-АТ» (г. Уфа) и рекомендована для внедрения в производство. Разработана программа для расчета геометрических параметров заготовок неразъемного изделия, изготавливаемого пластической деформацией (защищено свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017614544). Результаты работы используются в учебном процессе при реализации программы магистратуры по направлению подготовки 15.04.04

«Автоматизация технологических процессов и производств» в Набережночелнинском институте (филиале) КФУ.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использованы методы объектно-ориентированного проектирования информационных систем, алгоритмизации, теории пластичности, математического и имитационного моделирования, а также методы построения систем с использованием искусственного интеллекта.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях: Международной научно-практической конференции «Информационные технологии. Автоматизация. Актуализация и решение проблем подготовки высококвалифицированных кадров (ИТАП-2014)» (г. Набережные Челны, 2014 год); Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Материалы и технологии XXI века» (г. Казань, 2016 год); Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудования и материалы – 2016» (г. Казань, 2016 год); Международной научно-технической конференции «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике»; Московский технологический университет, Физикотехнологический институт (г. Москва, 2017 год); Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудования и материалы – 2017» (г. Казань, 2017 год).

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации автором опубликовано 12 работ, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 3 статьи, индексируемые в Scopus и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 111 наименований, и одного приложения. Работа изложена на 131 страницах машинописного текста, содержащего 8 таблиц, 56 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении освещена актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, указана новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе проводится краткий обзор существующих автоматизированных систем моделирования и управления, исследованы возможности создания автоматизированного технологического процесса получения неразъемных соединений пластической деформацией. Приводится краткий обзор существующих способов изготовления неразъемных металлических изделий. По результатам патентно-информационного обзора предложен способ изготовления неразъемных изделий пластической деформацией, основанный на одной характерной особенности формоизменения цилиндрической заготовки при операции открытой прошивки: при значениях диаметра пуансона d в диапазоне $0,3 \div 0,7$ от исходного диаметра заготовки D_0 , в процессе деформирования происходит

образование кольцевого зазора между прошивнем и стенками полости. Данная особенность может быть использована как при изготовлении неразъемного металлического изделия, так и в технологии восстановления пластической деформацией изношенных поверхностей деталей, с бочкообразной формой соединяемых поверхностей.

На рисунке 1 представлена технологическая схема предлагаемого способа сборки осесимметричных неразъемных металлических изделий с бочкообразной формой соединяемых поверхностей, состоящего из четырех последовательных этапов. В качестве соединяемых элементов неразъемного изделия выступают фасонная заготовка 2 и внедряемый в нее стержень 1.

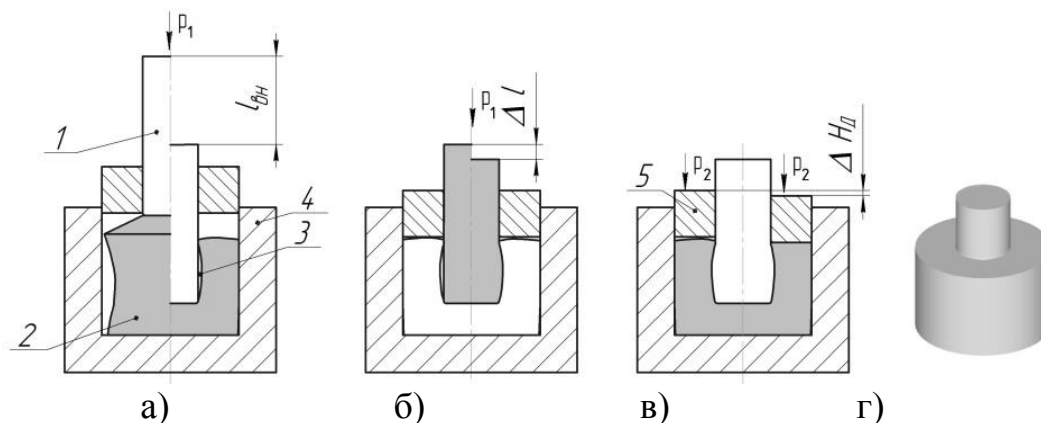


Рисунок 1 – Схема способа сборки неразъемных изделий

Примечание: На рисунке серым цветом отмечен деформируемый объект на соответствующем этапе

На первом этапе «Внедрение стержня» в нагретую до ковочных температур фасонную заготовку 2 на глубину $l_{вн}$ внедряют стержень 1 в матрице 4 (рис. 1, а). На втором этапе «Выдержка» соединение выдерживают в течение времени $\tau_{кр}$ для прогрева внедренной части стержня с целью снижения предела текучести его материала. После чего, на третьем этапе «Высадка стержня» осуществляют высадку внедренной части стержня на величину Δl , за счет чего происходит заполнение кольцевого зазора 3 материалом стержня (рис. 1, б). И на четвертом этапе «Окончательная сборка» производят окончательную сборку кольцевым инструментом 5 на ΔH_d . (рис. 1, в). На рисунке 1 (г) представлена 3D-модель элементов в сборе.

Формоизменение заготовки по схеме открытой прошивки с образованием кольцевого зазора обеспечивается за счет её фасонной формы, учитывающей неравномерность деформации. Кроме этого, такая форма заготовки позволяет получить боковую поверхность максимально близкую к цилиндрической, а на торцевой поверхности происходит компенсирование утяжины (рис. 1,а).

Данная технология изготовления неразъемных изделий посредством сборки их пластической деформацией основана на совмещении процессов обработки металлов давлением и сварки давлением. Основной проблемой процесса сборки является обеспечение геометрической точности и прочности неразъемного изделия. Наиболее эффективным, а зачастую единственным

решением данной проблемы является разработка и внедрение автоматизированных систем управления. Наибольший интерес представляют адаптивные системы управления с использованием подходов косвенной оценки контролируемых показателей. С помощью данных систем удалось существенно повысить эффективность производства неразъемных изделий ультразвуковой, контактной, диффузионной и других видах сварки, а также производства заготовок обработкой металлов давлением за счет адаптивного управления прессовым оборудованием.

Однако существующие автоматизированные системы и подходы к управлению рассматриваемой группы технологических процессов не применимы или требуют существенной доработки вследствие следующих особенностей:

- необходимость учета формоизменения фасонной заготовки в процессе сборки;
- в процессе сборки происходит поэтапная смена объекта деформирования;
- отсутствие возможности непосредственного измерения температуры в зоне соединения, от которой зависит геометрическая точность и прочность неразъемного изделия;
- нестационарность температурно-силовых условий.

Таким образом, необходимо создать систему моделирования и управления автоматизированным технологическим процессом сборки неразъемных изделий пластической деформацией с требуемой геометрической точностью и прочностью, учитывающей вышеописанные особенности. Для достижения данной цели необходимо решить поставленные в диссертационной работе задачи.

Во второй главе предложена структура многоуровневой автоматизированной системы моделирования и управления технологическим процессом сборки неразъемных изделий пластической деформацией, нацеленная на автоматизированную подготовку технологического процесса и управление самим процессом сборки изделия в режиме реального времени (рис. 2).

Исходными данными разработанной системы являются конечные размеры неразъемного изделия после сборки и данные о свойствах материалов соединяемых элементов изделия.

В структуру системы входят блок «Автоматизированной системы технологической подготовки производства» (АСТПП) и блок «Автоматизированной системы управления технологическим процессом» (АСУ ТП).

Блок АСТПП состоит из следующих модулей:

- Модуль анализа технологичности: решает задачу о применимости технологии по геометрическим параметрам и проверке на совместимость прочностных свойств соединяемых элементов неразъемного металлического изделия;

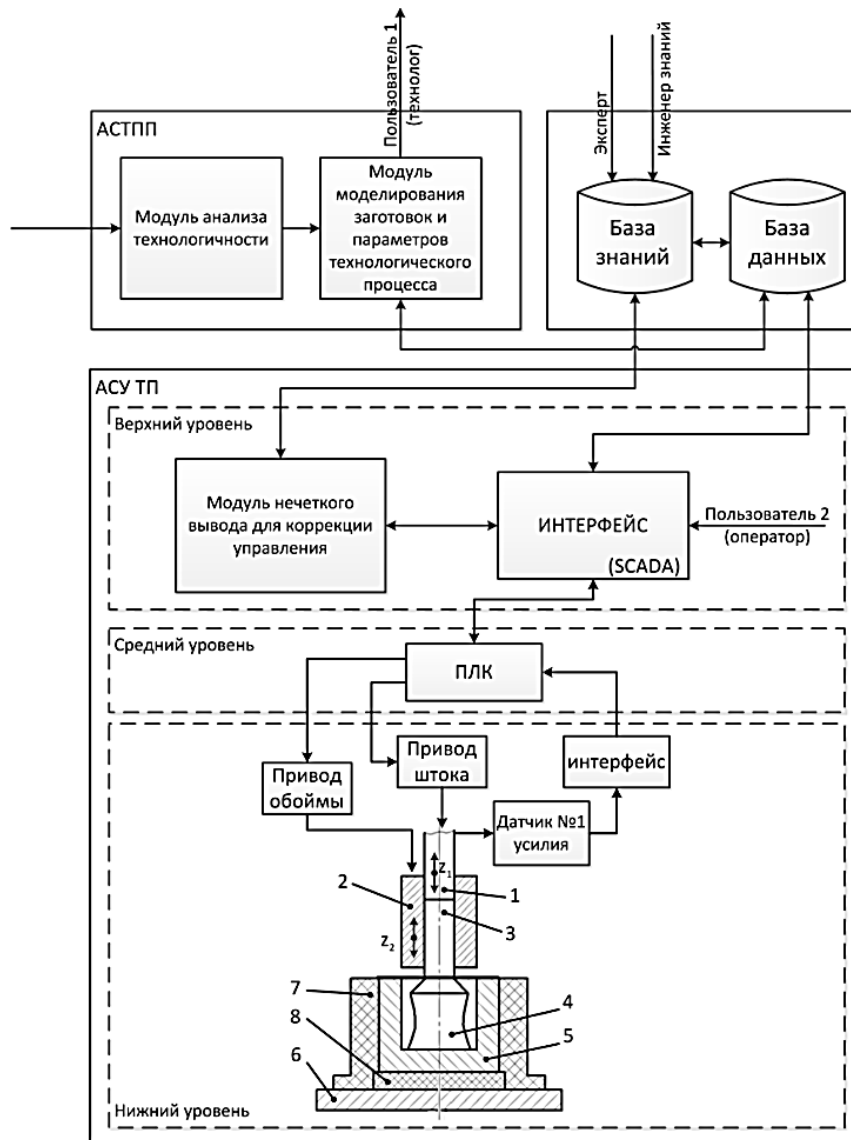


Рисунок 2 – Структура автоматизированной системы моделирования и управления сборкой неразъемных изделий пластической деформацией
 1 - шток; 2 - обойма; 3 - стержень; 4 - фасонная заготовка; 5 - матрица; 6 - нижняя плита; 7 - теплоизоляционный кожух; 8 - теплоизоляционная прокладка.

- Модуль моделирования заготовок и параметров технологического процесса: производит расчет размеров фасонной заготовки и стержня; назначает параметры технологического процесса; формирует входные данные для блока АСУ ТП. Модуль основан на методике выбора геометрических параметров фасонной заготовки.

На рисунке 3 показаны основные геометрические параметры процесса открытой прошивки цилиндрической заготовки высотой H_0 и диаметром D_0 (контур 1) цилиндрическим пуансоном диаметром d с углом конусности торца α . В результате формоизменения заготовка осаживается до высоты H_K , а боковая поверхность заготовки приобретает форму бочки, характеризующуюся диаметром D_6 .

Характерной особенностью формоизменения заготовки при открытой прошивке является образование замкнутого кольцевого зазора (отмечен на

рисунке 3 серым цветом), объем которого можно охарактеризовать следующей относительной величиной:

$$\theta_3 = \frac{V_3}{V_{\text{в.п.}}} 100\% \quad (1)$$

где V_3 – объем кольцевого зазора, мм³; $V_{\text{в.п.}}$ – объем внедренной части цилиндрического пуансона, мм³.

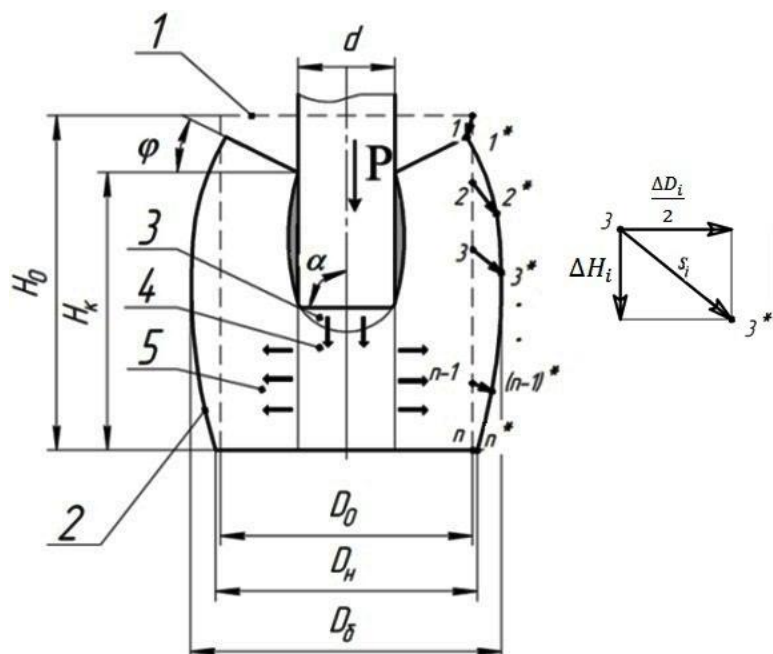


Рисунок 3 – Анализ формоизменения цилиндрической заготовки при открытой прошивке

перемещения i -точек из их начального положения 1, 2, ..., n в конечное 1*, 2*, ..., n*. Компоненты $\frac{\Delta D_i}{2}$ и ΔH_i – это величины перемещения i -точки в радиальном и осевом направлениях соответственно.

Отложив данные перемещения точек от контура требуемого формоизменения образца, можно получить контур фасонной заготовки. Полученный контур необходимо скорректировать на угол φ со стороны образования утяжины. Для этого через точку с координатой $(\frac{d}{2}; H_0)$ проводят секущую плоскость под углом φ к торцевой поверхности.

Для расчета геометрических параметров фасонной заготовки и стержня по размерам неразъемного изделия после сборки необходимо разработать математические модели, связывающие параметры конечного формоизменения заготовки ΔD_i , ΔH_i , ΔD_6 , ΔH_k , φ , θ_3 со следующими варьируемыми параметрами геометрических размеров до деформирования: d/D_0 – относительный диаметр стержня; H_0/D_0 – относительной высоты заготовки; α – угол основания стержня.

Для разработки универсальных математических моделей параметров ΔD_i , ΔH_i , D_6 и H_k формоизменения заготовки при внедрении стержня, чтобы уйти от абсолютных величин, предлагается использовать их относительные величины:

Кроме этого, процесс прошивки всегда сопровождается образованием на торце заготовки со стороны внедрения пуансона утяжины, которую можно количественно охарактеризовать углом φ .

Для точного определения смещения металла заготовки при открытой прошивке с целью определения конечного формоизменения заготовки значений D_6 и H_k недостаточно. В связи с этим на боковой поверхности заготовки

обозначим равноудаленные друг от друга точки i и введем вектор $\vec{s}_i \left(\frac{\Delta D_i}{2}, \Delta H_i \right)$

$$\Delta D_i^* = \frac{D_i - D_0}{D_0} \cdot 100\% \quad (2)$$

$$\Delta H_i^* = \frac{H_i - H_{i0}}{H_{i0}} \cdot 100\% \quad (3)$$

$$\Delta D_6^* = \frac{D_6 - D_0}{D_0} \cdot 100\% \quad (4)$$

$$\Delta H_k^* = \frac{H_k - H_0}{H_0} \cdot 100\% \quad (5)$$

Таким образом, необходимо разработать следующую совокупность математических моделей:

$$\Delta D_i^* = f_1(d/D_0; H_0/D_0; \alpha), \quad (6)$$

$$\Delta H_i^* = f_2(d/D_0; H_0/D_0; \alpha), \quad (7)$$

$$\Delta D_6^* = f_3(d/D_0; H_0/D_0; \alpha), \quad (8)$$

$$\Delta H_k^* = f_4(d/D_0; H_0/D_0; \alpha), \quad (9)$$

$$\varphi = f_5(d/D_0; H_0/D_0; \alpha), \quad (10)$$

$$\theta_3 = f_6(d/D_0; H_0/D_0; \alpha). \quad (11)$$

На рисунке 4 представлен разработанный алгоритм расчета размеров соединяемых элементов, а также требуемых перемещений инструмента при сборке по чертежу готового неразъемного металлического изделия с применением вышеуказанных математических моделей.

После ввода исходных данных с помощью формул (4), (5) и системы уравнений из (8), (9), (11) рассчитываются диаметр D_0 и высота H_0

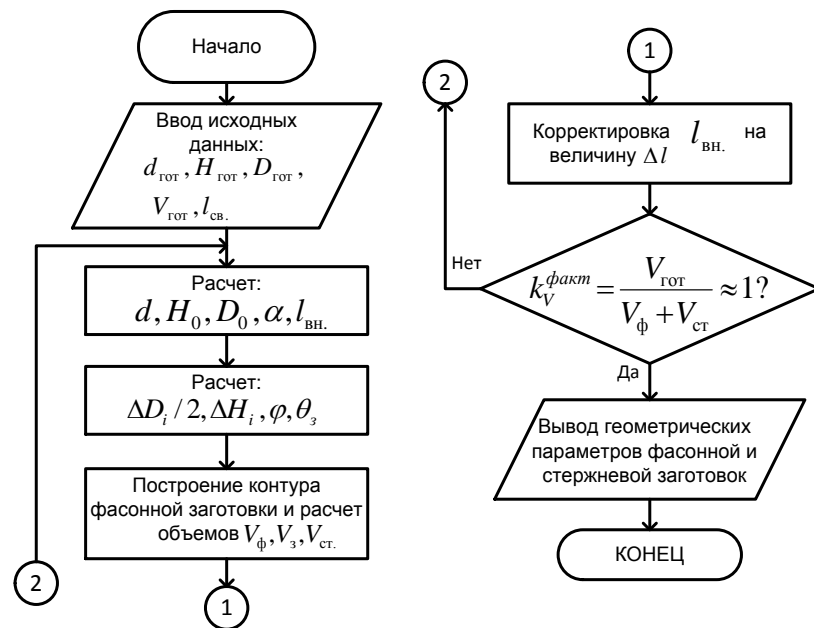


Рисунок 4 – Алгоритм расчета геометрических параметров фасонной заготовки и стержня

цилиндрической заготовки, значения α и $l_{вн.}$. При расчете исходят из условия, что контур искомой цилиндрической заготовки после прошивки вписывается в контур готового неразъемного изделия. Данное условие выражается следующей системой соотношений:

$$\begin{cases} d = d_{\text{гот}} \\ H_k = k_V \cdot H_{\text{гот}} \\ D_6 = D_{\text{гот}} \end{cases} \quad (12)$$

где $H_{\text{гот}}$ и $D_{\text{гот}}$ – высота и диаметр корпусной части неразъемного изделия после сборки; $d_{\text{гот}}$ – диаметр стержневой части неразъемного изделия после сборки; H_k и D_6 – размеры цилиндрической заготовки после внедрения стержня; k_V – поправочный коэффициент по объему (на первом цикле расчета алгоритма $k_V=1$).

Ввиду того, что таких контуров множество, то выбирается контур с максимально возможной относительной величиной объема кольцевого зазора $\theta_3 = \theta_{3\max}$.

Подстановкой полученных значений в (6), (7) и (10) и с помощью формул (2) и (3) производится расчет значений перемещения точек боковой поверхности в радиальном $\frac{\Delta D_i}{2}$ и осевом ΔH_i направлениях, а также значение угла утяжины верхней торцевой поверхности φ . Полученные значения используются при построении контура фасонной заготовки. Производится корректировка длины внедренной части стержня $l_{\text{вн}}$ на величину $\Delta l = \frac{\theta_3}{100\%} \cdot l_{\text{вн}}$.

Затем производится расчет фактического значения поправочного коэффициента $k_V^{\text{факт}}$:

$$k_V^{\text{факт}} = \frac{V_{\text{гот}}}{V_{\phi} + V_{\text{ст}}}, \quad (13)$$

где $V_{\text{гот}}$, V_{ϕ} и $V_{\text{ст}}$ – объемы готового изделия, фасонной заготовки и стержня соответственно.

Расчет с выводом результатов проектирования останавливается при значениях $k_V^{\text{факт}} \approx 1$ с отклонением в пределах $\pm 0,01$, соответствующих диапазону значений при точной горячей объемной штамповке. При больших отклонениях расчет начинается заново до выполнения условия (13), но уже со значением $k_V = k_V^{\text{факт}}$ в (12).

Блок АСУ ТП построен по трехуровневому принципу и содержит нижний, средний и верхний уровни.

На нижнем уровне осуществляется согласование сигналов датчиков с входами устройства управления, а также вырабатываемых команд с исполнительными устройствами. На Среднем уровне ПЛК (PLC, Programable Logic Controller) на основе данных о состоянии контролируемых параметров выдает сигналы управления исполнительным устройствам. Верхний уровень представляет собой интеллектуальную надстройку в виде модуля нечеткого вывода, осуществляющего коррекцию управления процессом сборки на основе нечетких правил в зависимости от данных, получаемых с датчиков нижнего уровня.

Третья глава посвящена разработке математических моделей (6) - (11), отображающих условия пластического формоизменения фасонной заготовки при открытой прошивке в реальном времени.

С помощью имитационного моделирования в программном комплексе Deform-2D проведены исследования формоизменения цилиндрических образцов при открытой прошивке для различных соотношений геометрических размеров заготовки и стержня, а также формы торца стержня. Принятые значения варьируемых факторов: относительный диаметр стержня $d/D_0 = 0,3 \div 0,7$; относительная высота заготовки $H_0/D_0 = 0,5 \div 1,5$. (при больших значениях H_0/D_0 сложно обеспечить устойчивость стержня); угол у основания пуансона $\alpha = 45^\circ \div 90^\circ$. Глубина внедрения пуансона - $0,8H_0$ (большая глубина

прошивки приводит к образованию удаляемой перемычки и используется в основном для прошивки сквозного отверстия в заготовке).

В результате обработки данных:

1. Установлены значения минимальной величины коэффициента трения μ_{min} , при котором открытая прошивка пуансонами с относительными диаметрами $d/D_0 = 0,3 \div 0,7$ сопровождается образованием замкнутого кольцевого зазора.

2. Установлено, что максимальные значения θ_3 наблюдается при внедрении стержня с углом конусности $\alpha = 90^\circ$ для всех различных комбинаций d/D_0 и H_0/D_0 (рис. 3).

3. Разработаны математические модели θ_3 , ΔD_i^* , ΔH_i^* , ΔD_6^* , ΔH_k^* и φ от относительного диаметра стержня d/D_0 , относительной высоты заготовки H_0/D_0 , позволяющие осуществлять моделирование процесса формоизменения при открытой прошивке для расчета фасонной заготовки и стержня по размерам неразъемного изделия после сборки в автоматизированном режиме.

4. Установлен диапазон относительных размеров $d_{гот}/D_{гот}$ неразъемных изделий, изготовление которых возможно с помощью предлагаемой технологии, который равен $d_{гот}/D_{гот} \in [0,27; 0,47]$. При этом величина $H_{гот}/D_{гот}$ получаемых изделий находится в диапазоне $[0,4; 1,24]$.

Четвертая глава посвящена алгоритмизации управления с элементами искусственного интеллекта технологическим процессом сборки неразъемного изделия пластической деформации. В результате исследований разработан способ управления в реальном времени с применением нечеткой логики.

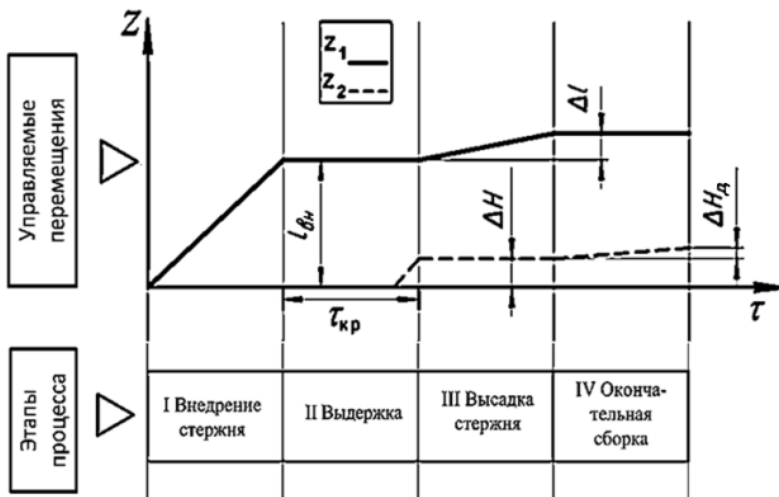


Рисунок 5 – Пример цикла сборки неразъемного изделия

стержня система производит расчет значения $\tau_{кр}$, а на втором этапе соединение выдерживается в течение этого времени. На третьем этапе производится перемещение штока прессы на величину $z_1 = \Delta l$. Значения $l_{вн}$ и Δl рассчитываются в блоке АСТПП и хранятся в базе данных. На четвертом этапе вначале производится подвод обоймы за счет перемещения обоймы $z_2 = \Delta H$. Затем осуществляется окончательная сборка соединением перемещением обоймы $z_2 = \Delta H_d$ по правилу: Если усилие $P > 0$, то «стоп привод обоймы».

Основная задача алгоритма - управление перемещениями z_1 и z_2 штока прессы 1 и привода обоймы 2 соответственно (см. рис. 2), временем выдержки соединения $\tau_{кр}$ в четыре последовательных этапа (рис. 5).

На первом этапе процесса сборки система обеспечивает перемещение штока прессы на величину $z_1 = l_{вн}$. После внедрения

Источник информации об усилии – датчик усилия. Управление полным циклом сборки осуществляется с помощью ПЛК.

Отсутствие возможности непосредственного измерения температуры фасонной заготовки и стержня в зоне соединения на втором этапе сборки в режиме реального времени и наличие множества случайных производственных факторов исключает применение традиционных способов автоматизации. В связи с этим, для определения $\tau_{кр}$ в системе предусмотрен модуль нечеткого вывода для коррекции управления в зависимости от реальных условий протекания процесса сборки неразъемного изделия.

В системах нечеткого вывода основным понятием является лингвистическая переменная, состоящая из пяти объектов:

$$\langle X, U, T(x), G, S \rangle, \quad (14)$$

где X - имя переменной; U – универсальное множество; $T(x)$ – нечеткие метки; G и S - синтаксические и семантические правила соответственно.

В качестве X задаются следующие параметры процесса сборки неразъемного изделия, а именно: диаметр корпусного элемента изделия $D_{гот}$, отношение диаметра стержня к диаметру корпусного элемента изделия $d_{гот}/D_{гот}$ после сборки, отношение диаметра корпусного элемента изделия к его высоте до сборки H_0/D_0 , удельное усилие деформирования по схеме открытой прошивки фасонной заготовки p , время выдержки соединения $\tau_{кр}$.

Универсальное множество U - диапазон возможных значений X , зависящие от характеристик объекта управления: $D_{гот}$ от 20 до 40 мм; $H_{гот}/D_{гот}$ от 0,25 до 0,5; H_0/D_0 от 1,0 до 1,5; p от p_{min} до p_{max} МПа, $\tau_{кр}$ от $\tau_{кр \cdot min}$ до $\tau_{кр \cdot max}$ сек. Значения p , $\tau_{кр}$ и их диапазоны зависят от реологических и теплофизических свойств материалов соединяемых элементов неразъемного изделия.

Совместное рассмотрение лингвистических переменных $D_{гот}$, $d_{гот}/D_{гот}$, H_0/D_0 , p , $\tau_{кр}$ лучше всего описываются треугольными функциями принадлежности.

Для нахождения значений лингвистических переменных p , $\tau_{кр}$ на границах температурного интервала деформирования материала фасонной заготовки для различных комбинаций переменных $D_{гот}$, $d_{гот}/D_{гот}$, H_0/D_0 были проведены экспериментальные исследования сборки неразъемных изделий на примере изделия: стержень из Х12М, фасонная заготовка из стали У10А, нижняя граница температурного интервала деформирования –1000°С, верхняя – 1200°С.

На основе получившихся лингвистических переменных сформированы нечеткие правила управления. Данные правила имеют следующий вид:

ЕСЛИ $D_{гот}$ И $d_{гот}/D_{гот}$ И H_0/D_0 И p ТО $\tau_{кр}$.

На основе полученных нечетких правил формируются второй уровень базы знаний, который имеет следующий вид:

ЕСЛИ 20 И 0,25 И 1,0 И 247 ТО 16;

ЕСЛИ 20 И 0,375 И 1,0 И 216 ТО 11,5;

.....

ЕСЛИ 40 И 0,5 И 1,5 И 138 ТО 58.

Используя данную базу знаний можно получить нечеткие управляющие

значения. Используя эти значения, проведем процесс дефаззификации. Под дефаззификацией понимается процедура преобразования нечетких величин, получаемых в результате нечеткого вывода, в четкие, на основе которых можно производить управление выдержкой соединения. Для дефаззификации используется алгоритм Мамдами.

Для проверки адекватности управляющей модели проведено сравнение экспериментальных и данных значений $\tau_{кр}$ полученных в результате нечеткого вывода, и вычислена величина среднеквадратичной ошибки для серии из 8 экспериментов. Значение среднеквадратичной ошибки составило 2,74%, что обеспечивает необходимую точность при управлении процессом сборки в реальных условиях.

Была произведена апробация полученных результатов для технологии изготовления составного инструмента для пробивки отверстий, представляющего собой неразъемное изделие из сталей X12M (стержень) и У10А (фасонная заготовка) с $d_{\text{гот}} = 12$ мм; $D_{\text{гот}} = 31$ мм; $H_{\text{гот}} = 21$ мм; $l_{св} = 15$ мм.

По результатам механических испытаний образцов предел прочности σ_B неразъемного соединения на разрыв составил 241-265 МПа на единицу площади контактной поверхности соединяемых элементов изделия. Проведен анализ геометрической точности полученного неразъемного изделия, в результате которого получено значение отклонения по массе изделия равное 7,57%. Таким образом, получено неразъемное изделие с отклонением геометрических параметров в пределах допусков точной горячей объемной штамповки, который равен 5-25% по массе (объему) поковки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основным результатом диссертационной работы является решение научной задачи, имеющей важное народнохозяйственное значение, которая заключается в обеспечении геометрической точности и прочности неразъемных изделий, изготавливаемых посредством сборки пластической деформацией, за счет автоматизации их производства и интеллектуальной поддержки процессов управления.

При проведении исследований по тематике диссертации получены следующие научные и практические результаты:

1. Проведен анализ современных автоматизированных систем и подходов к управлению сборкой неразъемных изделий пластической деформации.

2. Разработана многоуровневая структура системы моделирования и управления в реальном времени автоматизированным технологическим процессом сборки неразъемных изделий пластической деформацией, отличающаяся тем, что с учётом результатов моделирования пластического течения металла обеспечивается поэтапная локализация деформаций в соединяемых элементах изделия.

3. Разработаны математические модели, алгоритм расчета геометрических параметров соединяемых элементов и параметров технологического процесса сборки неразъемного изделия, отображающие условия их пластического формоизменения в реальном времени.

4. Разработан способ управления в реальном времени хода технологического процесса с применением нечеткой логики для коррекции временных параметров с целью повышения эффективности производства. Управляющее воздействие на продолжительность второго этапа формируется на основе результатов работы нечеткой логики в зависимости от геометрических параметров изделия и силы деформирования на первом этапе.

5. Проведена апробация полученных результатов на примере изготовления заготовки пуансона для пробивки отверстий, представляющего собой неразъемное металлическое изделие из сталей X12M (стержень) и У10А (фасонная заготовка) со следующими геометрическими параметрами: $d_{\text{гот}} = 12$ мм; $D_{\text{гот}} = 31$ мм; $H_{\text{гот}} = 21$ мм; $l_{\text{св}} = 15$ мм. Проведен анализ геометрической точности полученного неразъемного изделия, в результате которого получено значение отклонения по массе (объему) неразъемного изделия равное 7,57%, что соответствует допускам точной горячей объемной штамповки (5-25%). В результате проведения механических испытаний 5 образцов получены значения прочности соединения на разрыв $\sigma_{\text{в}}$ в интервале 241-265 МПа.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Валиев А.М. Управление технологическим процессом сборки составных изделий металлических изделий прошивкой. / Симонова Л.А., Валиев А.М., Панкратов Д.Л., Сарваров Ф.С. // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 9 (8). – С. 1693-1696;

2. Валиев А.М. Автоматизированная система проектирования и технологической подготовки производства составных металлических изделий прошивкой / Л.А.Симонова, А.М.Валиев, Д.Л.Панкратов, Р.Ф.Валиева // *Фундаментальные исследования*, Пенза: ООО ИД «Академия Естествознания». – 2014. – № 9 (8). – С. 1697-1702

3. Валиев А.М., Шибakov В.Г., Панкратов Д.Л. Система автоматизированного проектирования и технологической подготовки производства составного инструмента для пробивки отверстий // *СТИН*. -2015. - №7. –с.16-20

4. Валиев А.М., Шибakov В.Г., Панкратов Д.Л. Методика проектирования и технология изготовления сборного стержневого штампового инструмента // *СТИН*. -2015. -№7. –с.20-23.

5. Валиев А.М., Панкратов Д.Л. Автоматизированная система моделирования и управления технологическим процессом сборки неразъемных изделий пластической деформацией // *Фундаментальные исследования*. – 2017. – № 12-2. – С. 258-262

Публикации в научных изданиях, индексируемых в базе данных Scopus и Web of Science:

6. Pankratov, D.L., Shibakov, V.G., Valiev, A.M., Valieva, R.F. Technology of manufacturing of multiple core stamp tools by plastic deformation // 2015 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 86 012004 - P.1-4.

7. Valiev, A.M., Shibakov, V.G., Pankratov, D.L. Design and Manufacture of a Composite Punching Tool // Russian Engineering Research. – 2016, - 36 (2). - P. 146-148.

8. Valiev A.M., Shibakov V.G., Pankratov D.L. Automated Control System for the Assembly of a Composite Punching Tool // Russian Engineering Research, - 2016. - 36 (2). - P. 142-145.

Научные статьи и материалы докладов:

9. Валиев А.М. Разработка технологии получения неразъемных соединений пластической деформацией. Итоговая научная конференция: (2014; Набережные Челны). В 3-х ч. Итоговая науч.конф.проф.-препод.состава, 5 февраля 2014 г. [Текст]: сб-к докладов / ред. кол. Хабибуллин Р.Г. [и др.]; под ред. д-ра техн. наук Л.А. Симоновой. - Набережные Челны: Издательско-полиграфический центр Набережночелнинского института К(П)ФУ, 2014. – 538 с.

10. Валиев А.М., Панкратов Д.Л., Илюхин А.Н. Способ управления технологическим процессом сборки неразъемного изделия на основе нечеткой логики. Материалы Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудования и материалы – 2016» (МНТК «ИМТОМ-2016»). Ч.2. - Казань, 2016. - с.33-36.

11. Валиев А.М., Панкратов Д.Л. Автоматизация технологического процесса сборки неразъемного изделия пластической деформацией на основе нечеткой логики / Валиев А.М., Панкратов Д.Л. // Сборник научных трудов: материалы Международной научно-технической конференции «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике»; Московский технологический университет, Физикотехнологический институт. Выпуск 23 (XXIII)/ Под редакцией д.ф.-м.п.,проф. Булатова М.Ф. - М.: 2017. -С. 126-128.

12. Валиев А.М., Панкратов Д.Л. Способ повышения эффективности сборки неразъемных изделий пластической деформацией с применением искусственного интеллекта. Материалы Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудования и материалы – 2017» (МНТК «ИМТОМ-2017»). Ч.2. - Казань, 2017. - с.46-50.

Патенты и свидетельства:

13. Свидетельство № 2017614544 Российская Федерация. Программа расчета геометрических параметров заготовок для изготовления неразъемного изделия пластической деформацией: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / Валиев Айнур Миннегаянович; заявитель и правообладатель Валиев Айнур Миннегаянович. - № 2017610646; заявл. 10.01.2017; зарегистр.19.04.2017г.