

На правах рукописи

УДК 621.979-1.13

ГЛАДКОВ Юрий Анатольевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ГОРЯЧЕШТАМПОВЫХ КОМПЛЕКСОВ НА БАЗЕ КГШП С
АДАПТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ СИЛЫ
ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

Специальность 05.03.05 – Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**



**Москва
2003**

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете
им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор БОЧАРОВ Ю.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Кирдеев Ю.П.;
кандидат технических наук,
доцент Ларионов Н.М.

Ведущая организация – Акционерное машиностроительное объединение «Завод
им. Лихачева» (АМО ЗИЛ)

Защита состоится «12» ноября 2003 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании
диссертационного совета Д212.141.04 в Московском государственном
техническом университете им. Н.Э.Баумана по адресу:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5
Телефон для справок 267-09-63

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
государственного технического университета им. Н.Э.Баумана

Автореферат разослан «9» октября 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Семенов В.И.

Актуальность проблемы

Решение задачи повышения конкурентоспособности и эффективности отечественных горячештамповочных комплексов (ГШК) путем разработки и внедрения систем программного адаптивного управления является наиболее актуальным направлением в совершенствовании ГШК.

В производстве штампованных поковок высокой точности основная роль принадлежит кривошипным горячештамповочным прессам (КГШП) и комплексам на их основе. Однако отсутствие адаптивной системы управления (СУ) приводит к нестабильности силы деформирования и снижению точности поковок по высоте при высоких требованиях к точности отрезки заготовок и жесткости конструкции пресса.

Адаптивное управление способствует стабилизации процесса горячей объемной штамповки (ГОШ) и повышению точности высотных размеров поковок. Это позволяет снизить требования к точности разделки заготовок, снизить или полностью исключить влияние погрешности действий персонала при штамповке. Тем самым стабилизировать силу деформирования и добиться повышения точности высотного размера поковки.

Целью работы является разработка методических основ проектирования системы адаптивного управления технологическим процессом горячей штамповки на ГШК и разработка методики проектирования ГШК, оборудованных адаптивной системой управления.

Методы исследования

Исследование технологических параметров штамповки на ГШК и конструктивных особенностей КГШП базируется на теории пластического деформирования, технологии горячей объемной штамповки и теории кузнечно-штамповочных машин. Теоретические исследования вопросов проектирования адаптивного управления основаны на методах, принятых в теории автоматического управления, спецкурсе управления процессами и оборудованием обработки материалов давлением и принципах имитационного моделирования процессов и оборудования, принятых в области обработки материалов давлением.

Алгоритмический план управления включает в себя независимое и взаимозависимое адаптивное управление процессом ГОШ. Эти алгоритмы реализованы в виде программы для ЭВМ совместно с программной имитационной моделью (ИМ) ГШК.

Определение управляемости кузнечно-штамповочных машин и стратегии адаптивного управления проводилось по методике профессора Ю.А. Бочарова.

При проектировании алгоритмов результат их работы и их эффективность постоянно тестировались на ИМ. Правильность работы программной системы, включающей в себя алгоритмы управления и ИМ, определялась по методике тестирования ИМ в области обработки материалов давлением, разработанной проф. Л. Б. Аксеновым.

Адекватность модели доказывалась экспериментально. Сравнивались величины силы деформирования, полученные экспериментально и рассчитанные имитационной моделью. Экспериментальные исследования проводились с использованием электрических методов измерения механических величин с применением тензорезисторов, термопар, современных приборов, электронно-усилительной и регистрирующей аппаратуры. Оценка адекватности в анализе результатов эксперимента производилась методом корреляционного анализа с использованием t-распределения Стьюдента.

Автор защищает:

- Алгоритмический план адаптивного по параметрам заготовки (температура, масса) управления процессом горячей объемной штамповки в горячештамповочных комплексах на базе кривошипного горячештамповочного пресса.
- Компьютерную имитационную модель горячештамповочного комплекса, включающую в себя логическое и адаптивное управление, модели заготовки и процесса.
- Методику проектирования горячештамповочного комплекса на базе кривошипного горячештамповочного пресса, оснащенного адаптивной системой управления.

Научная новизна

Разработаны теоретические вопросы стабилизации силы деформирования и процесса горячей объемной штамповки за счет адаптивного управления объемом (массой) и температурой заготовок. Разработана программа PC – Swage Master и но-

вая имитационная модель ГШК, имеющая в своем составе КГШП, устройство нагрева и устройство разделки заготовок, отличающаяся:

- учетом влияния температуры и объема (массы) заготовки на величину силы деформирования;
- применением различных тестовых алгоритмов, в том числе линейного и периодического изменения коэффициентов, характеризующих влияние температуры и объема (массы) заготовки на величину силы деформирования;
- использованием системы оценки устойчивости алгоритма управления и системы подбора величины понижающего коэффициента.

Практическая ценность и реализация результатов работы заключается в следующем:

- создании программного обеспечения системы адаптивного управления и мониторинга работы ГШК на базе КГШП;
- разработке научно-обоснованной методики проектирования ГШК на базе КГШП с системой адаптивного управления.

Апробация работы

Основные положения работы доложены и обсуждены на:

- Всероссийской научно-технической конференции «Машиностроительные технологии», МГТУ им. Н.Э. Баумана, декабрь 1998 г.;
- Международном научном симпозиуме, научно-технической конференции «Автотракторостроение, промышленность и высшая школа». Секция «Машины и технологии обработки металлов давлением». МГТУ «МАМИ», сентябрь 1999 г.;
- Научно-практической конференции «Профессиональное инженерно-техническое и военное образование в XXI веке». Москва, февраль 2001 г.;
- IV Международном салоне промышленной собственности «Архимед-2001», Москва, ВБЦ «Сокольники», март 2001 г.;
- XXVI академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства, Москва, февраль 2002г.;
- Техническом совете ЗАО «Тяжмехпресс» по теме: «Мониторинг процессов горячей штамповки и параметров кривошипных горячештамповочных прессов.

Адаптивное управление процессами. Постановка проблемы в современных условиях», Воронеж, декабрь 2001;

- Научно-технических семинарах кафедры «Машины и технологии обработки материалов давлением», МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Свидетельства РОСПАТЕНТА и публикации

По теме диссертации получены 3 свидетельства РОСПАТЕНТА на программы для ЭВМ. Основное содержание диссертации изложено в 12 работах, включая опубликованные тезисы докладов конференций и один отчет по научно-исследовательской работе

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы из 88 наименований. Работа выполнена на 151 странице машинописного текста, содержит 50 рисунок, 23 таблицы и 5 страниц приложения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность работы, ее цель, научная новизна и основные направления исследований.

Первая глава содержит обзор состояния исследований по управлению кузнечно-штамповочными машинами. В этой главе рассмотрены перспективы развития ГШК, программные и аппаратные средства ГШК, определены цели и задачи работы.

При изучении литературных источников было установлено отсутствие технических решений по адаптивному взаимозависимому управлению температурой и объемом (массой) заготовок в ГШК на базе КГШП. В основном на кафедре МТ-6 МГТУ им. Н.Э.Баумана под научным руководством Ю.А. Бочарова проводились разработки систем программного и программно-адаптивного управления для машин ударного действия и винтовых прессов. Эти СУ решают задачу внутрициклового управления. Подобный подход для программно-адаптивных СУ КГШП применить затруднительно из-за жестко определенной кинематики работы исполнительного механизма. Поэтому сделан вывод о перспективности разработки внециклового упреждающего адаптивного управления ГШК на базе КГШП.

Проектирование ГШК на базе КГШП в настоящее время проводится без учета неустойчивости параметров процесса ГОШ: температуры и объема заготовки, вели-

чины деформирующей силы. Задача повышения точности высоты поковок решается увеличением жесткости конструкции КГШП (металлоемкости).

Использование упреждающего адаптивного управления для ГШК на базе КГШП является актуальной задачей, решение которой позволит стабилизировать процесс ГОШ, повысить точность поковок за счет стабилизации силы деформирования и снизить требования к точности дозирования объема заготовок. Применение адаптивного алгоритма позволит решить поставленную задачу стабилизации технологического процесса в условиях, когда присутствуют внешние воздействия от ряда параметров, учет и контроль которых затруднителен.

Рассмотрены различные варианты технологических процессов автоматизированной штамповки на КГШП. В качестве типового процесса при разработке компьютерной адаптивной системы управления ГШК признано целесообразным принять процесс горячей объемной штамповки фланцев карданного вала коробки передач.

Рассмотрены модели расчета силы деформирования, предложенные Сторожевым М.В., Поповым Е.А., Тарновским И.Я., Малевым И.И. и др. Анализ этих моделей показывает, что существующие методы расчеты сил деформирования носят оценочный характер, отклонение расчетных значений от фактических (полученных экспериментально) могут достигать 40% (иногда 110%). Поэтому для построения автоматической системы управления параметрами заготовки необходимо разработать новую модель, которая должна являться частью системы управления ГШК, способной адаптивно корректировать параметры в реальном масштабе времени работы комплекса.

В первой главе также рассматривалось состояние научных исследований в теории и стратегиях управления процессами и машинами обработки материалов давлением, выполненных в МГТУ им. Н.Э.Баумана, методы имитационного моделирования процессов и машин обработки материалов давлением, разработанных в Ленинградском политехническом институте.

При рассмотрении вопросов контроля и дозирования температуры было определено, что перспективно использовать датчики, предложенные В.П.Перевертовым и др. (а. с. № 1323152, СССР), использующие принцип измерения интенсивности излучения нагретого металла в узком спектральном диапазоне. Использование этого метода позволяет не только измерять температуру дистанционно, но и повысить точность измерения до 1-5 градусов. Рекомендуется использование таких бескон-

тактных инфракрасных термометров в промышленном исполнении, типа ИРТ-2, Термит.

Для контроля объема (массы) заготовки необходимо использование такого метода, который обеспечит погрешность измерения не ниже 1%. Такую точность обеспечивает специализированное устройство на базе индукционного элемента для контроля объема и сортировки металлических штучных заготовок перед нагревом, разработанное Мининым Е.В. и Охотниковым А.В. (а. с. 721154, СССР). Однако для определения массы заготовки проще использовать электронные весы.

В соответствии с поставленной целью на основании проведенного анализа сформулированы основные задачи исследования:

1. Определить стратегию управления горячештампочным комплексом на базе КГШП при выполнении процесса горячей объемной штамповки типовых поковок.

2. Провести моделирование и анализ процесса горячей объемной штамповки поковки типа фланец методом конечных элементов (в программе Qform). Определение расчетных значений силовых параметров (деформирующей силы).

3. Разработать алгоритмический план адаптивного управления процессом горячей штамповки поковок, имеющий варианты алгоритмов для управления различными технологическими процессами горячей объемной штамповки на горячештампочном комплексе. Разработать независимый и взаимозависимый алгоритмы управления параметрами заготовки.

4. Разработать имитационную модель работы горячештампочного комплекса на базе КГШП при выполнении горячей объемной штамповки поковки типа фланец, описывающую изменение параметров ГШК, которая требуется для тестирования алгоритмов управления.

5. Разработать программное обеспечение для тестирования алгоритмического плана и имитационной модели горячештампочного комплекса для горячей объемной штамповки типовых поковок.

6. Разработать методику экспериментальной проверки адекватности компьютерной имитационной модели реальному технологическому процессу горячей объемной штамповки и горячештампочному комплексу на базе КГШП.

7. Выполнить экспериментальные исследования работы системы адаптивного управления горячештампочного комплекса путем физического моделирования

технологии и КГШП, доказать адекватность функционирования имитационной модели реальному процессу.

8. Разработать методику проектирования горячештамповочного комплекса на базе КГШП с предложенной в работе системой адаптивного управления.

Вторая глава посвящена технологическому обоснованию методов управления горячештамповочным комплексом. В качестве типового технологического процесса выбран процесс штамповки фланца карданного вала коробки передач. Технологический процесс ГОШ состоит из 3-х переходов: осадка, штамповка, одновременно прошивка и обрезка (рис. 1).

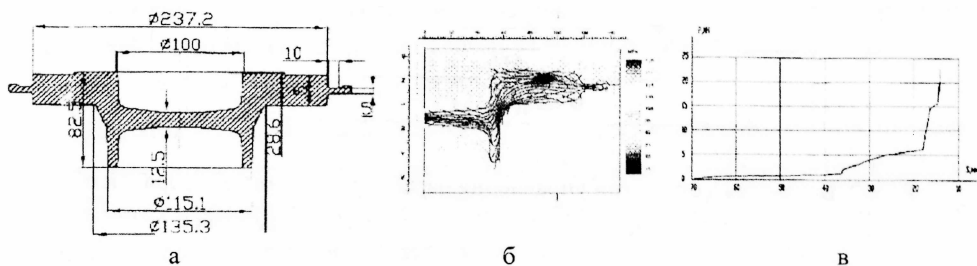


Рис. 1. Моделирование процесса горячей объемной штамповки фланца в программе Qform: а - поковка; б - фрагмент экрана программы Qform, иллюстрирующий распределение напряжений по сечению поковки; в - график силы в зависимости от хода деформирования

ГШК для штамповки фланца состоит из кривошипных ножниц К-4036 номинальной силой 4 МН, индуктора, КГШП 25 МН, средств автоматизации и системы логического управления. Цилиндрическая заготовка $\varnothing 70$ и высотой 195_{+7}^{-5} мм, массой 4,22 кг, материал – Сталь Ст20ХГНМ получается отрезкой на кривошипных ножницах от прутка. Нагрев заготовок производится до температуры 1200-1260 °С.

В этой главе выбрана стратегия управления принятым процессом горячей штамповки на ГШК – стратегия управления заготовкой (рис. 2). Задачей управления является стабилизация силы деформирования (объект обратной связи – сила деформирования) за счёт дозирования параметров заготовки, таких как масса (объём) и температура. Решение этой задачи необходимо для снижения отклонений высотного



Рис. 2. Блок-схема стратегии управления параметрами процесса горячей объемной штамповки на горячештамповочном комплексе

размера поковок, происходящего от нестабильных упругих деформаций системы пресс-штамп вследствие отклонений силы деформирования.

Система управления в этом случае должна обеспечивать стабилизацию объёма (массы) и температуры заготовки относительно расчётных значений массы $[U_M]$ и температуры $[U_T]$. Вместе с этим неточность дозирования массы должна компенсироваться путём введения дополнительной поправки по температуре ΔU_T^V , рассчитанной по адаптивному алгоритму.

Третья глава посвящена теоретическим исследованиям, разработке адаптивного алгоритма и имитационной модели процесса горячей объемной штамповки в комплексе на базе КГШП.

Разработан алгоритмический план способов управления, состоящий из варианта независимого управления температурой или (и) массой (объемом) заготовок и варианта взаимозависимого управления температурой и массой (объемом) заготовки. Задачей при независимом управлении процессом штамповки является вычисление управляющих сигналов коррекции массы (объема) ΔU_M и температуры ΔU_T заготов-

ки с целью получения заготовки с расчетными значениями объема (массы) $[U_M]$ и температуры $[U_T]$ (см. рис.2).

Задачей алгоритма взаимозависимого управления массой (объемом) и температурой является управление температурой заготовки (ΔU_T^V) с обратной связью по силе деформирования P_d (см. рис.2), обеспечивающее стабилизацию силы деформирования относительно расчетной величины $[P_d]$. В этом алгоритме учитывается качество отработки системой первого управляющего воздействия - дозирования массы (объема) заготовки. При построении алгоритма взаимозависимого управления в системе независимого управления добавляется работающий по адаптивному алгоритму блок, определяющий связь системы программного управления нагревом с системой программного управления разделкой. Адаптивный алгоритм основан на функции линейной регрессии:

$$P_d = [P_d] + K_1 * (M - [U_M]) - K_2 * (T - [U_T]).$$

Для этой функции по адаптивному алгоритму во время работы ГШК периодически рассчитываются коэффициенты K_1 , K_2 . В расчете коэффициентов использовался метод наименьших квадратов. Для нахождения коэффициентов производится решение системы уравнений по методу Гаусса.

Использование адаптивного алгоритма обеспечивает возможность с достаточно высокой точностью определять степень влияния отклонения температуры и отклонения массы (объема) на величину максимальной силы деформирования. Это необходимо для вычисления управляющего воздействия при дозировании температуры, компенсирующего погрешность дозирования массы, с целью стабилизации силы деформирования $P_d = [P_d]$.

Также в этой главе разработана имитационная модель и рекомендуемый интерфейс программы. Имитационная модель предназначена для отладки и оценки эффективности алгоритмов управления, настройки ГШК с адаптивной СУ; анализа работы ГШК по протоколу штамповки. Имитационная модель учитывает изменение таких переменных процесса ГОШ как температура, масса (объем) заготовки, сила деформирования. Моделирование ведется с учетом нормального вероятностного закона распределения этих параметров. Имитационная модель отражает инерционность отработки управляющих воздействий СУ, что обеспечивает реализацию модели упреждающего управления параметрами заготовки.

Адаптивная и имитационная модели были реализованы и отлажены в программной системе управления «PC – Swage Master», на которую нами получены свидетельства РОСПАТЕНТа №№990746, 2001611343. В программной реализации эти модели описываются 40 переменными, которые можно разделить на переменные, относящиеся к типовому технологическому процессу горячей объемной штамповки и режимам адаптивного управления; переменные, описывающие работу имитационной модели; переменные, относящиеся к состоянию компьютерной модели.

Четвертая глава

В данной работе принята методика проверки адекватности с помощью физической модели (стенда), оборудованного кривошипным прессом номинальной силы 630 кН, экспериментальным штампом для открытой объемной штамповки, муфельной печью, необходимыми датчиками и регистрирующей аппаратурой.

Цели и задачи экспериментальных исследований:

- 1) оценить влияние погрешностей дозирования массы и температуры заготовки на величину силы деформирования;
- 2) проверить и доказать достаточную адекватность имитационной модели реальному процессу горячей объемной штамповки на кривошипном прессе;
- 3) дать оценку эффективности применения адаптивного управления комплексом ГОШ для решения задачи стабилизации силы деформирования.

Экспериментальные исследования проводились в четыре этапа.

Этап 1: оценка влияния погрешности дозирования массы (объема) заготовки на силу деформирования. Варьировалась величина массы заготовки в пределах $32 \div 63$ г. Заготовки цилиндрические диаметром 20 мм и высотой 12–22 мм. Количество образцов – 18 штук. Эксперименты проводились без нагрева заготовок. Материал заготовок – свинец. В результате получены графики зависимости силы деформирования от массы заготовки.

Этап 2: оценка влияния погрешности температуры нагрева заготовки на силу деформирования. Материал заготовок, сталь 35. Заготовки цилиндрические диаметром 14 мм и высотой 36 мм. Количество образцов – 15 штук. Варьировалась температура нагрева заготовок в интервале 950 – 1010 °С. В результате получали графики зависимости силы деформирования от температуры заготовки.

Этап 3: подтверждение адекватности имитационной модели реальному процессу горячей объемной штамповки на физической модели горячештамповочного комплекса с системой взаимозависимого управления температурой и массой (объемом) заготовок. Материал заготовок тот же, что и на этапе 2 (сталь 35). Заготовки цилиндрические диаметром 14 мм и высотой 31–42 мм. Штамповка проводилась при температуре 890 – 980 °С. Количество образцов – 27 штук. Заготовки различной массы нагревались до температуры, рассчитанной адаптивной системой управления. Результат - графики (опытные и расчетные) зависимостей силы деформирования заготовки от ее массы (объема) и температуры, а также оценка расхождения экспериментальных значений силы деформирования, от силы, рассчитанной имитационной моделью.

Этап 4: проведение вычислительного эксперимента с использованием разработанной имитационной модели в программе PC-Swage Master. Здесь производилось изучение и оценка эффективности использования независимого и взаимозависимого управления параметрами заготовки при выполнении технологического процесса горячей объемной штамповки.

Основными итогами эксперимента явилось следующее:

1. Эксперименты по влиянию отклонения объема (массы) на силу деформирования показали, что отклонение массы заготовки незначительно влияют на величину силы деформирования: так при изменении массы на 6% сила изменяется на 1,1 %.

2. Эксперименты по влиянию отклонения температуры на силу деформирования показали, что это влияние значительно: так при изменении температуры на 50 °С (5,6%) сила штамповки изменяется на 18,5 %.

3. Зависимость $P(T)$ не является линейной, однако может с достаточной точностью быть аппроксимирована линейной функцией при варьировании температуры в интервале ± 30 °С.

4. При штамповке 27 образцов с использованием алгоритма взаимозависимого управления (с учетом отклонения массы и температуры заготовок) среднеквадратичное отклонение силы деформирования составило 26,2 кН, то есть 6,9% от максимального значения силы деформирования.

5. В результате сравнения экспериментально полученных значений силы деформирования и значений, рассчитанных по алгоритму разработанной имитацион-

ной модели, выявлено, что различие между этими данными менее 15%, что подтверждает правильность работы алгоритма.

6. Коэффициент корреляции силы деформирования для величин, рассчитанных по алгоритму имитационной модели и полученных экспериментально, составил $r = 0,722$. Согласно критерию Стьюдента для уровня значимости 0,999 значение t -распределения Стьюдента $[t] = 3,745$, что меньше коэффициента Стьюдента $t_{\text{им}} = 5,22$ и, следовательно, имитационная модель адекватна реальному процессу горячей объемной штамповки на экспериментальном стенде.

7. В результате проверки алгоритмов управления ГШК на имитационной модели установлено, что использование алгоритма взаимозависимого управления приводит к снижению отклонения силы деформирования примерно в 1,5 раза в сравнении с алгоритмом независимого управления.

Пятая глава посвящена разработке рекомендаций по проектированию горячештамповочных комплексов на базе КГШП, оснащенных адаптивной системой дозирования массы и температуры заготовки. Приводится обобщенная схема адаптивного управления горячештамповочным комплексом, включающая в себя имитационную и адаптивную модели комплекса.

Рассмотрена обобщенная структура ГШК, которую можно отнести к мехатронным системам. Эта структура разбита на три уровня: оборудование ГШК, система логического управления (предназначена для циклового управления механизмами ГШК) и информационно-управляющая система (предназначена для адаптивного управления параметрами заготовки, мониторинга параметров и подготовки производства). В основе информационно-управляющей системы заложены разработанные имитационный и адаптивный блоки управления.

В этой главе рассмотрена рекомендуемая структура системы логического и адаптивного управления. Определены задачи СУ ГШК, которые разбиты на группы: логическое и адаптивное управление приводами и узлами комплекса в соответствии с методиками, разработанными в главах 2 и 3 диссертации, а также возможный учет движения продукции, хронометраж работы комплекса.

Разработан алгоритм проектирования ГШК на базе КГШП с рекомендуемой системой адаптивного управления. Укрупненно алгоритм проектирования ГШК с системой адаптивного управления состоит из формулирования исходных данных, параллельного проектирования механизмов КГШП и системы адаптивного управ-

ления; разработки состава ГШК и выбора (проектирования) вспомогательного оборудования; разработки алгоритмического плана управления и имитационной модели технологического процесса ГОШ, выбора и установки датчиков и сервоприводов механизмов СУ. Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 3.



Рис. 2. Блок-схема алгоритма проектирования горячештамповочного комплекса с адаптивной системой управления

Выводы по работе

1. Проектирование ГШК на базе КГШП в настоящее время проводится без учета неустойчивости параметров процесса ГОШ: температуры и объема заготовки, величины деформирующей силы. Задача повышения точности высоты поковок решается неоправданным увеличением жесткости конструкции КГШП и, следовательно, ее металлоемкости. В технической литературе отсутствуют рекомендации по решению этой задачи путем адаптивной стабилизации силы деформирования.

2. В результате изучения состояния методов проектирования ГШК установлена недостаточная разработанность проблемы адаптивного к переменным параметрам технологического процесса ГОШ управления комплексами на базе КГШП, что приводит к неустойчивости процесса, недогрузки прессов по силе деформирования, снижает точность поковок по высоте.

3. Учитывая особенности структуры главного кривошипно-ползунного рабочего механизма КГШП, не позволяющие управлять параметрами прессы внутри цикла, разработку системы адаптивного управления целесообразно провести по стратегии упреждающего управления входными параметрами заготовки (объем и температура) и предусмотреть обратную связь по величине силы деформирования.

4. На основе теоретических исследований разработана программа РС – Swage Master и имитационная модель процесса ГОШ на КГШП. Исследование ее свойств показало, что модель может обеспечить решение задачи оптимизации параметров адаптивного управления объемом и температурой заготовок, стабилизировать процесс штамповки и уменьшить отклонение силы деформирования.

5. Использование адаптивной системы управления, разработанной по методике, приведенной в диссертации, компенсирует неточность дозирования массы заготовок, позволяет в ГШК взамен разделительных устройств для точной резки проката (резка на дисковых пилах) использовать кривошипные или гидравлические ножницы, обладающие высокой производительностью и экономичностью.

6. В результате экспериментальных исследований адекватности имитационной модели реальному процессу получено, что отклонения расчетных переменных процесса от измеренных не превышают 15%. Коэффициент корреляции силы деформирования для величин, рассчитанных по алгоритму имитационной модели и полученных экспериментально, составил $r = 0.722$. При этом коэффициент Стьюдента составил $t_{им} = 5,22$, что больше минимально допустимого $[t] = 3,745$ (для уровня значимости 0,999 и степени свободы $k = N - 2 = 25$). Согласно критерию Стьюдента имитационная модель адекватна реальному технологическому процессу ГОШ.

7. Разработанная методика и алгоритм проектирования ГШК с системой адаптивного управления параметрами заготовки рекомендуется для задач проектирования комплексов ГОШ на базе КГШП, обеспечивающих получение поковок повышенной точности.

8. В результате адаптации системы управления ГШК на базе КГШП к переменным параметрам заготовки при использовании взаимозависимого алгоритма отклонения силы деформирования снижаются более чем в 1,5 раза, что создает условия для снижения требований к жесткости и металлоемкости конструкции при проекти-

ровании КГПП. Величина оптимальной жесткости требует дополнительного изучения.

РАБОТЫ, ОСВЕЩАЮЩИЕ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ

1. Bocharov Y., Gladkov Y. Computer Simulation of Adaptive CNC for Hot-Die Forging Complex // Proceedings of 7th ICTP. –Yokohama, 2002. – P. 229–234.
2. Балаганский В.И., Бочаров Ю.А., Гладков Ю.А. Разработка систем управления горячештамповочных линий // Автотракторостроение. Промышленность и высшая школа: Тез. докл. межд. конф. – М., 1999. – С. 25-26.
3. Балаганский В.И., Бочаров Ю.А., Гладков Ю.А. Система программно-адаптивного управления горячештамповочным комплексом // Кузнечно-штамповочное производство. –2001. –№6. – С. 26-30.
4. Бочаров Ю.А., Антимонов В.А., Гладков Ю.А. Управление процессами и машинами обработки металлов давлением: Учебное пособие. – М.: Промышленные системы управления, 1997. – 88 с.
5. Бочаров Ю.А., Гладков Ю.А. Адаптивное управление технологическими параметрами точной горячей объемной штамповки // XXVI академический чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П.Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства: Тез. докл. Всероссийской конф. – М., 2002. – С. 210-211.
6. Бочаров Ю.А., Гладков Ю.А. Инновационная разработка программы имитационного моделирования для системы управления горячештамповочным комплексом // Образование, наука, технологическое развитие России – история и перспективы: Тез. докл. межд. конф. – М., 2001. - С.115.
7. Бочаров Ю.А., Гладков Ю.А. Некоторые вопросы построения программных адаптивных систем управления и диагностики КШО на примере горячештамповочных комплексов // Машиностроительные технологии: Тез. докл. Всероссийской конф. – М., 1998. – С. 122-123.
8. Гладков Ю.А. Использование графических методов трехмерной графики при исследовании процессов штамповки (на примере штамповки обкаткой) // Сб. научных трудов: Студенческая весна – 98: теория, процессы и оборудование обработки материалов давлением. – М., 1998. – С. 53-59.

- Гладков Ю.А. Система программно-адаптивного управления горячештамповочным комплексом // Сб. научных трудов: Студенческая весна – 98: теория, процессы и оборудование обработки материалов давлением. – М., 1998. – С. 77–82.
- . Гладков Ю.А., Скворцов Н.А. Об организации распределенной системы управления и диагностики горячештамповочных комплексов // Машиностроительные технологии: Тез. докл. Всероссийской конф. – М., 1998. – С.135–136.
 - . Головин А.А., Гладков Ю.А. Некоторые принципы проектирования мехатронных систем в кузнечно-штамповочном производстве // Машиностроительные технологии: Тез. докл. Всероссийской конф. – М., 1998. – С.133–134.
 - . Разработка новых конструкций и методов автоматизированного проектирования кузнечно-штамповочного оборудования, обеспечивающего высокое качество, минимальную металлоемкость и затраты энергии. Отчет по теме 11.01.37 / НИИКМТП. Научный руководитель Сафонов А.В. Ответственные исполнители Бочаров Ю.А., Богданов Э.Ф. Исполнители Гладков Ю.А., Хвостенко А.В и др. № ГР 01.200.101.511. – М., 2000. – 142 с.
 - . Свидетельство РОСПАТЕНТА № 2001611343. Блок адаптации системы управления технологическим процессом / Ю.А. Гладков, Д.А. Шамшурина // Государственный реестр программ и баз данных. –2001. – № 4.
 - . Свидетельство РОСПАТЕНТА № 970247. Система программного управления горячештамповочным комплексом на базе кривошипного горячештамповочного пресса / Ю.А. Гладков // Государственный реестр программ и баз данных. – 1997. – № 2.
 - . Свидетельство РОСПАТЕНТА № 990746. Интерфейсный модуль системы управления горячештамповочным комплексом (РС – Swage Master) / А.В. Хвостенко, Ю.А. Гладков // Государственный реестр программ и баз данных. – 1999. – № 3.