



World Conference on Engineering and Technological Sciences

Hosted Online from Rome, Italy

Date: 8th October, 2026

Website: <https://econferencia.com>

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С ЦЕЛЮ СНИЖЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ДЕТАЛЕЙ

А. А. Йигиталиев

Ферганский государственный технический университет,
Фергана, Узбекистан

Аннотация

Рассматривается задача снижения остаточных деформаций металлических деталей после термической обработки за счёт совершенствования мехатронной системы технологического оборудования. Анализируются причины возникновения деформаций, возможности математического моделирования температурного поля и остаточных напряжений, а также применение датчиков, вычислительных средств и алгоритмов оптимального управления. Предлагается концептуальная структура системы, объединяющая измерение параметров процесса, расчётную модель, управляющий алгоритм и исполнительные механизмы. Приведены иллюстративные схемы и графики, предназначенные для пояснения методики исследования; они не являются результатами проведённых экспериментов.

Ключевые слова: термическая обработка, мехатронная система, остаточные напряжения, деформация деталей, математическое моделирование, температурное поле, оптимальное управление, датчики, экспериментальная проверка.



World Conference on Engineering and Technological Sciences

Hosted Online from Rome, Italy

Date: 8th October, 2026

Website: <https://econferencia.com>

1. Введение

Термическая обработка широко применяется в машиностроении для изменения структуры и механических свойств металлических деталей. Вместе с тем нагрев, выдержка и охлаждение могут сопровождаться неравномерным распределением температуры, фазовыми превращениями и формированием остаточных напряжений. Эти явления способны приводить к изменению формы и размеров деталей, увеличению доли брака и необходимости дополнительной механической правки.

Снижение деформации требует не только правильного выбора температурно-временного режима, но и надёжного контроля технологического процесса. Перспективным направлением является интеграция измерительных датчиков, математической модели, управляющего алгоритма и исполнительных механизмов в единую мехатронную систему.

2. Причины возникновения деформаций

На величину остаточной деформации влияют химический состав и свойства материала, геометрия детали, исходное состояние, скорость нагрева, температура выдержки, продолжительность процесса, интенсивность охлаждения и условия теплообмена. При неодинаковом нагреве или охлаждении отдельные участки детали расширяются и сжимаются по-разному. Фазовые превращения могут дополнительно изменять объём материала и распределение внутренних напряжений.

Поэтому при разработке модели необходимо учитывать взаимосвязь температурного поля, свойств материала и механического отклика детали. Для конкретного материала и оборудования состав модели должен



World Conference on Engineering and Technological Sciences

Hosted Online from Rome, Italy

Date: 8th October, 2026

Website: <https://econferencia.com>

уточняться с использованием справочных данных и результатов экспериментов.

3. Концепция совершенствования мехатронной системы

Предлагаемая концепция предусматривает объединение следующих функциональных компонентов: датчиков температуры и, при необходимости, средств измерения деформации; блока сбора и обработки данных; математической модели термического процесса; алгоритма выбора параметров; системы управления нагревом и охлаждением; исполнительных механизмов. Система должна обеспечивать регистрацию параметров процесса и сопоставление расчётных результатов с фактическими измерениями.

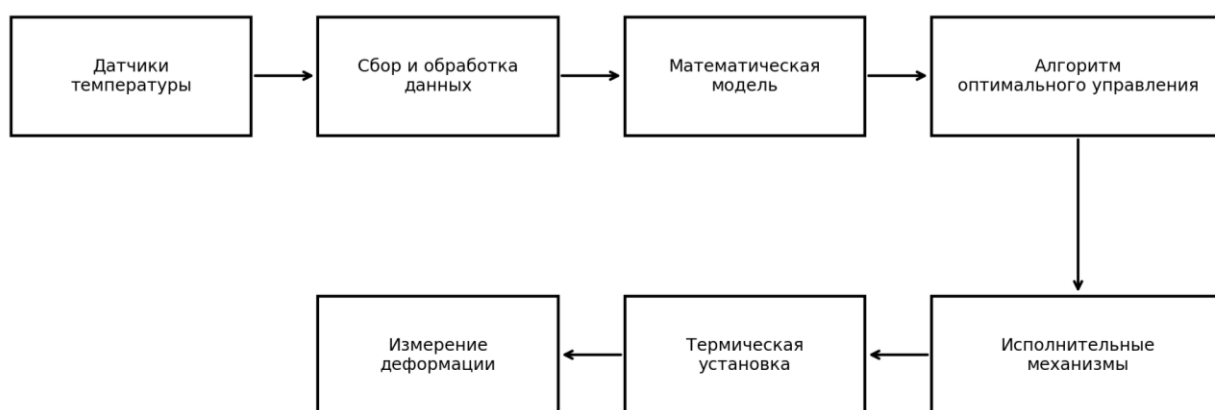


Рисунок 1. Функциональная схема предлагаемой мехатронной системы (концептуальная).

В зависимости от конструкции оборудования исполнительные механизмы могут регулировать мощность нагрева, продолжительность выдержки, интенсивность охлаждения или другие технологические параметры.



World Conference on Engineering and Technological Sciences

Hosted Online from Rome, Italy

Date: 8th October, 2026

Website: <https://econferencia.com>

Конкретный состав оборудования выбирается после изучения существующей установки и требований к обрабатываемым деталям.

4. Математическая модель и постановка задачи

В качестве входных данных рассматриваются материал и геометрические характеристики детали, начальная температура, режим нагрева, время выдержки и условия охлаждения. Расчётными величинами являются температурное поле, остаточные напряжения и величина деформации.

Целевая задача заключается в выборе допустимых параметров термической обработки, обеспечивающих минимизацию деформации при соблюдении требований к механическим свойствам и качеству детали. Модель должна учитывать начальные и граничные условия теплообмена, температурную зависимость свойств материала и, при необходимости, фазовые превращения.

Для расчёта температурного поля может применяться численное решение уравнения теплопроводности. Для оценки остаточных напряжений и деформации используется связанная термомеханическая модель, например метод конечных элементов. Выбор конкретной модели зависит от геометрии детали, материала, доступных вычислительных ресурсов и требуемой точности.

5. Алгоритм исследования

1. Сбор исходных данных о материале, геометрии детали и параметрах термической обработки.
2. Формирование математической модели теплового процесса и определение температурного поля.
3. Расчёт остаточных напряжений и ожидаемой деформации.



World Conference on Engineering and Technological Sciences

Hosted Online from Rome, Italy

Date: 8th October, 2026

Website: <https://econferencia.com>

4. Подбор технологических параметров с учётом ограничений процесса и требований к качеству.
5. Передача выбранных параметров в систему управления технологическим оборудованием.
6. Проведение экспериментальной проверки и измерение фактической деформации.
7. Сравнение расчётных и экспериментальных результатов, уточнение модели.

6. Иллюстрация температурных режимов

На рисунке 2 приведён условный пример температурных профилей, показывающий, как разные режимы нагрева, выдержки и охлаждения могут быть представлены для последующего анализа. Кривые построены исключительно для иллюстрации способа визуализации и не отражают реальные данные конкретной установки.

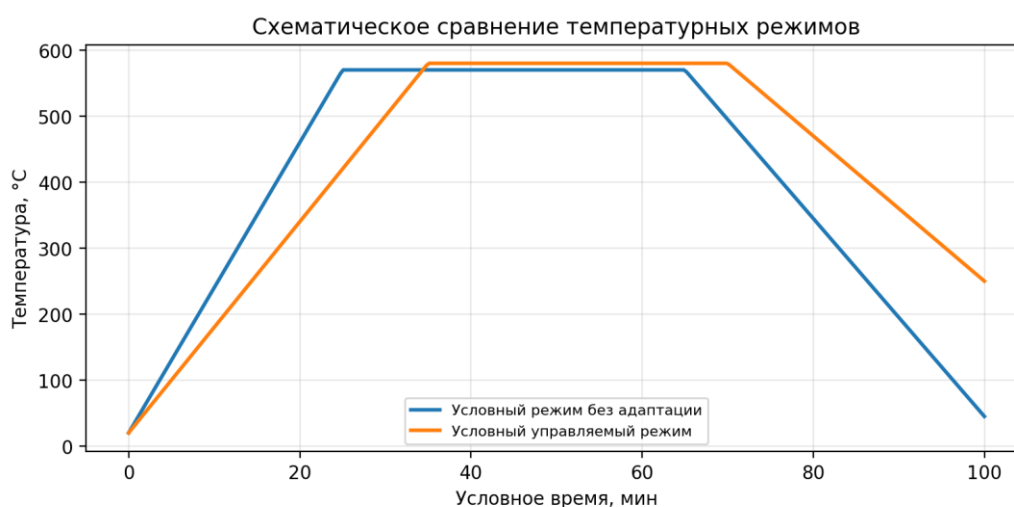


Рисунок 2. Условное сравнение температурных режимов; график не является экспериментальным результатом



World Conference on Engineering and Technological Sciences

Hosted Online from Rome, Italy

Date: 8th October, 2026

Website: <https://econferencia.com>

При практическом применении на график следует нанести реальные измерения температуры во времени, указать материал, тип установки, место расположения датчика и условия эксперимента. Только после этого можно делать выводы о преимуществе конкретного режима.

7. Формирование набора данных и проверка модели

Набор данных (dataset) рекомендуется формировать на основе лабораторных измерений, производственных испытаний и проверенных расчётных данных. В него могут входить температура во времени, скорость нагрева и охлаждения, длительность выдержки, геометрические параметры, свойства материала и измеренная деформация до и после обработки. Для каждого наблюдения необходимо фиксировать единицы измерения, условия опыта и источник данных.

Для проверки модели часть данных используется при настройке, а отдельная часть — для независимой валидации. Сравниваются расчётные и измеренные значения температуры и деформации, оцениваются абсолютная и относительная погрешности, повторяемость измерений и устойчивость результатов. До получения экспериментальных данных количественные показатели точности приводить нельзя.

8. Сравнительная оценка и показатели эффективности

Сравнение существующего режима управления с предлагаемой системой должно проводиться по единым условиям испытаний. Основные показатели включают величину остаточной деформации, точность поддержания температуры, время обработки, энергопотребление, долю брака и затраты на исправление деталей.



World Conference on Engineering and Technological Sciences

Hosted Online from Rome, Italy

Date: 8th October, 2026

Website: <https://econferencia.com>

Таблица 1. Показатели сравнительной оценки. До проведения испытаний значения не следует заменять предположительными процентами.

Показатель	Существующее решение	Предлагаемая система
Остаточная деформация	Определяется измерениями	Ожидается снижение; подтвердить экспериментом
Точность температурного контроля	Оценить по данным установки	Контроль по датчикам и алгоритму
Время обработки	Измерить в базовом режиме	Сравнить после оптимизации
Энергопотребление	Измерить базовое значение	Оценить по показаниям счётчика
Доля брака	Определить по производственным данным	Сравнить после испытаний

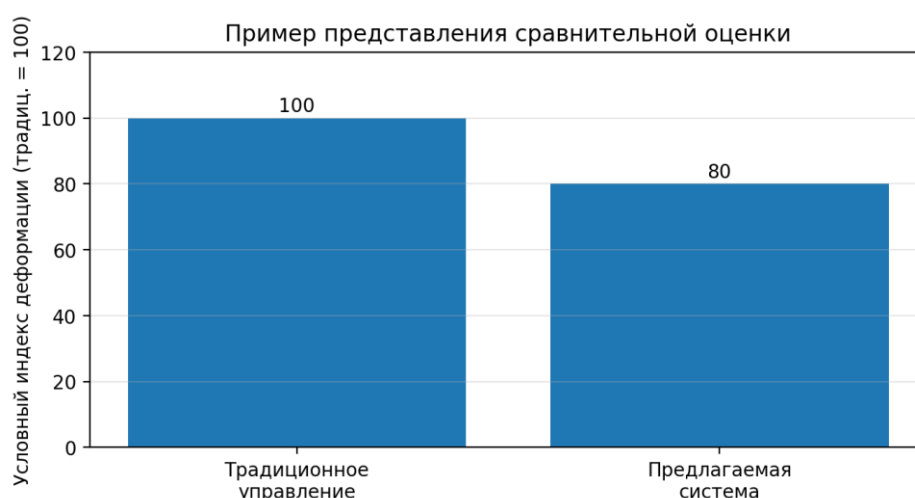


Рисунок 3. Пример оформления сравнительного графика по условному индексу деформации; значения условные и не являются результатами исследования



World Conference on Engineering and Technological Sciences

Hosted Online from Rome, Italy

Date: 8th October, 2026

Website: <https://econferencia.com>

9. Ожидаемая техническая и экономическая эффективность

При подтверждении работоспособности предложенного подхода ожидается улучшение управляемости термического процесса, снижение разброса результатов и уменьшение необходимости дополнительной правки деталей. Экономическую эффективность следует оценивать по изменению доли брака, затрат на повторную обработку, энергопотребления, длительности производственного цикла и производительности оборудования.

Результат должен подтверждаться измерениями до и после внедрения. Без таких данных нельзя утверждать конкретный процент снижения деформации или экономии энергии.

10. Заключение

Рассмотрена концепция совершенствования мехатронной системы оборудования для термической обработки с целью снижения деформации деталей. Предлагаемый подход объединяет измерение технологических параметров, математическое моделирование, выбор оптимального режима и экспериментальную проверку. Его научная значимость определяется необходимостью установить количественную связь между параметрами процесса и остаточной деформацией, а практическая — возможностью использовать результаты расчёта для совершенствования управления оборудованием.

Следующим этапом исследования является уточнение конструкции существующей установки, выбор материала и типоразмера исследуемой детали, проведение базовых испытаний, формирование набора экспериментальных данных и проверка математической модели. На основе полученных результатов можно будет обоснованно оценить эффективность предлагаемой мехатронной системы.



World Conference on Engineering and Technological Sciences

Hosted Online from Rome, Italy

Date: 8th October, 2026

Website: <https://econferencia.com>

Список литературы

1. Shao W., Yi M., Tang J. et al. Prediction and Minimization of the Heat Treatment Induced Distortion in 8620H Steel Gear: Simulation and Experimental Verification. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2022. Vol. 35, Article 126. DOI: 10.1186/s10033-022-00802-4.
2. Monteiro E., Cotton D. Modeling and validation of residual stresses induced by heat treatment of AA7075-T6 samples toward the prediction of part distortion. Machining Science and Technology. 2023. DOI: 10.1080/10910344.2023.2215309.
3. ASM Handbook. Volume 4A: Steel Heat Treating Fundamentals and Processes. ASM International. (Использовать соответствующее издание и страницы после проверки доступной версии.)
4. Totten G. E. (ed.). Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies. CRC Press. (Уточнить используемое издание и библиографические данные перед подачей.)