

УДК 681.518

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЗОННОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА СТАЛЬНОЙ ЗАГОТОВКИ

*С.А. Колпашиков, К.С. Пешкин*¹

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: skolpaschikov@mail.ru, kir.peschkin@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке структуры киберфизической системы управления процессом зонного индукционного нагрева, широко распространенного в современном промышленном производстве при термической обработке металлических изделий различного назначения. Анализ номенклатуры выпускаемых с использованием индукционной термообработки изделий и преимуществ использования индукционных нагревательных систем показал широкую область применения данного способа термообработки в современном производстве и большие возможности по автоматизации и оптимизации процессов, связанные с индукционным нагревом изделий. Данный факт свидетельствует об актуальности разработок различного рода интеллектуальных систем управления применительно к процессам промышленного индукционного нагрева металлических заготовок и полуфабрикатов. В статье описывается индукционный метод зонной термической обработки металлов, его преимущества перед пламенными способами термообработки и номенклатура выпускаемых при помощи него изделий. Представлено описание системы заготовка – индуктор, для которой разработана структура киберфизической системы управления процессом зонного индукционного нагрева. Рассмотрено технологическое требование к конечному температурному распределению на поверхности заготовки и факторы, влияющие на отклонение температурного распределения от требуемого в процессе зонного индукционного нагрева. Приведен перечень возможных возмущающих воздействий, сформулированы требования к технологическому процессу, описаны принципы управления и на основе этого разработана структура системы управления процессом зонного индукционного нагрева, которая относится к классу киберфизических систем управления технологическими процессами.

Ключевые слова: зонный сквозной индукционный нагрев, интеллектуальная система управления, операция пластической деформации, киберфизическая система, индукционная нагревательная установка, технологический процесс.



© Автор(ы), 2024

¹ Сергей Александрович Колпашиков, кандидат технических наук, заведующий кафедрой автоматики и управления в технических системах.

Кирилл Сергеевич Пешкин, аспирант кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов.

Введение

Термическая обработка металлов широко распространена в технологических процессах современных металлургических предприятий, поскольку она является необходимым этапом перед технологическими операциями пластической деформации, такими как прессование, прокатка, ковка, обжатие, вдавливание, вытяжка, правка, накатывание и т. д. [1]. Основные тенденции совершенствования технологий термообработки металлов непосредственно связаны с постоянно растущими требованиями к производству более сложных и качественных изделий различного назначения, которые должны отвечать современным стандартам надежности, прочности и износостойкости. Высокая конкуренция, рост производственных мощностей и требований к качеству готовых изделий обуславливают для производителей необходимость концентрироваться на повышении эффективности технологических процессов, которое достигается за счет применения высокоэффективных методов термической обработки металлов, внедрения интеллектуальных систем контроля и управления, оптимизации процессов и т. д.

На промышленных предприятиях, характеризующихся большими объемами выпуска продукции, часто применяют индукционные способы термической обработки, отличающиеся от конкурентоспособных технологий нагрева рядом преимуществ: экономичным потреблением энергоресурсов; многофункциональностью (на одной установке допускается производить несколько видов термообработки); эффективностью в массовом промышленном производстве; высокой скоростью нагрева; широкими возможностями по контролю и управлению процессом; соответствием современным требованиям охраны окружающей среды и техники безопасности [2]. Кроме того, индукционные нагревательные установки (ИНУ) позволяют обеспечить весомое снижение доли потерь металла в окалину, которая является одной из значительных статей затрат в себестоимости процесса нагрева металлических заготовок [9–11]. ИНУ достаточно просты и удобны в эксплуатации, отличаются высокой мобильностью, а гибкое проектирование геометрии витков индуктора, повторяющей форму заготовки, позволяет осуществлять более качественный нагрев и существенно снижать долю брака в партии заготовок одной номенклатуры. Применение ИНУ обеспечивает заданную технологическими требованиями точность достижения требуемого температурного распределения по объему заготовки.

На современных промышленных предприятиях с использованием индукционных способов термообработки производят широкую номенклатуру изделий различного назначения, включая ответственные детали для машиностроительного производства (валы, шестерни, фланцы и т. д.), подвергающиеся значительным механическим нагрузкам и эксплуатируемые в агрессивных средах.

Отличительной особенностью процессов индукционной термообработки металлов перед операциями пластической деформации является наличие широких возможностей по оптимизации процесса нагрева, которые направлены на поиск оптимальных конструктивных и режимных параметров ИНУ с целью достижения требуемого конечного температурного профиля по объему заготовки при обеспечении максимальной эффективности процесса индукционного нагрева по выбранному критерию оптимальности [3].

Однако сложные технологические процессы промышленного индукционного нагрева подвержены значительным возмущающим воздействиям, которые приводят к отклонению параметров процесса нагрева от их оптимальных значений и существенному ухудшению выбранных показателей качества функциони-

рования ИНУ. В связи с этим на современных производственных предприятиях все чаще применяются сложные автоматизированные системы управления, предназначенные для оптимизации процессов и их адаптации к изменяющимся условиям для отработки возмущений и принятия решений в режиме реального времени. Среди таких систем особое внимание в последнее время уделяется киберфизическим системам управления технологическими процессами (КФСУ ТП), которые отличаются высокой скоростью обработки информации в режиме реального времени (от момента поступления до формирования управляющего воздействия), в том числе за счет непосредственной интеграции физического объекта управления в систему [4].

Киберфизические системы объединяют вычислительные, информационные, измерительные, управляющие и коммуникационные подсистемы с физическим объектом управления [5], выполняют свои функции в режиме реального времени и позволяют получать данные о текущем состоянии технологического процесса для принятия оперативного решения по управлению. Такие системы открывают широкие возможности для автоматизации, оптимизации и интеллектуализации процессов индукционной термической обработки и повышают их эффективность, поскольку в них обеспечивается тесная взаимосвязь между физическими процессами и цифровыми технологиями, что обеспечивает адаптацию режимов функционирования установок к изменяющимся условиям среды.

В статье рассматриваются вопросы разработки структуры киберфизической системы управления зонной индукционной установкой для сквозного нагрева стальной цилиндрической заготовки перед операциями пластической деформации, описываются принцип действия данной установки и ее основные элементы.

Процесс зонного индукционного нагрева стальной заготовки

В статье рассматривается технологический процесс сквозного зонного индукционного нагрева стальной цилиндрической заготовки в многосекционном индукторе перед операциями пластической деформации.

Индукционный нагрев основан на явлении электромагнитной индукции, т. е. возникновение источников тепла в заготовке происходит за счет вихревых токов, возбуждаемых вследствие пропускания переменного электрического тока по обмотке индуктора [6]. Отличительной особенностью индукционной термообработки от традиционных способов нагрева является возбуждение тепловой энергии непосредственно в самой заготовке. При этом глубина проникновения тепловой энергии напрямую зависит от физических характеристик заготовки и режимных параметров ИНУ [7].

Сквозной индукционный нагрев применяется, если требуется обеспечить нагрев заготовки по всему объему с определенной точностью. При таком нагреве заготовку обычно полностью помещают в зону действия индуктора. Распределение температуры зависит от времени процесса и энергии, которую получает заготовка, при этом чем больше удельная мощность внутренних источников тепла, тем меньше время нагрева. При сквозном индукционном нагреве применяют достаточно низкую частоту тока, обеспечивая тем самым большую глубину проникновения тока. Это означает, что в существенной части заготовки концентрируются наведенные токи, которые нагревают поверхностный слой заготовки, при этом оставшаяся часть нагревается за счет явления теплопроводности [8].

Особенность зонного индукционного нагрева заключается в том, что активный нагрев заготовки за счет возбуждения внутренних источников тепла проис-

ходит не по всему объему, а только в участках, над которыми в дальнейшем будут производиться операции пластической деформации. При этом остальные участки заготовки также нагреваются до некоторой меньшей температуры с целью сохранения допустимого температурного перепада, обеспечивающего предотвращение коробления и образования трещин на последующих технологических операциях и в процессе эксплуатации.

Таким образом, основной целью зонного индукционного нагрева заготовок является локализация нагрева до высоких температур только в тех зонах, которые на последующих стадиях подвергаются пластической деформации для получения требуемой конфигурации готовых изделий [12]. Применение в промышленном производстве зонного нагрева заготовок позволяет не только упростить последующие операции пластической деформации и спрогнозировать формоизменение заготовок, но и сократить длительность и количество подготовительных операций, повысить точность достижения требуемого неравномерного температурного распределения, а главное – существенно сэкономить материальные и энергетические ресурсы [13, 14].

Стальная заготовка представляет собой полуфабрикат для изготовления вала ответственного изделия путем обработки давлением, перед которой она должна быть нагрета с высокой точностью до температуры, требуемой для качественного формоизменения. На рис. 1 выделены участки нагрева по длине заготовки: ДУ1 – длина первого участка нагрева (64 мм), ДУ2 – длина второго участка нагрева (93 мм), ДУ3 – длина третьего участка нагрева, ПЗ – переходная зона (30 мм).

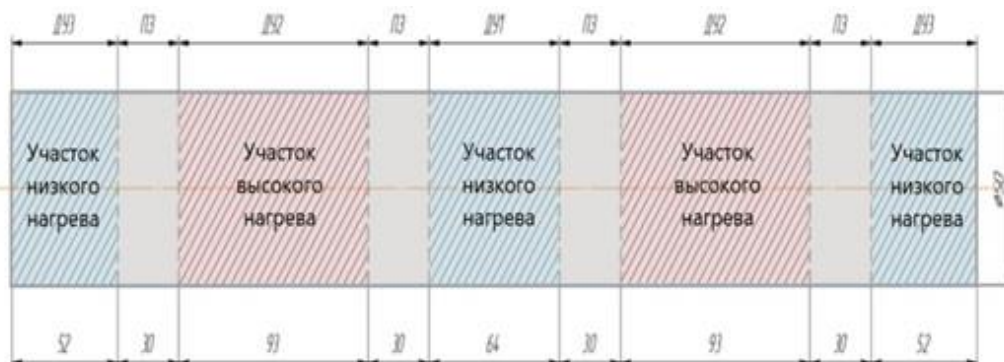


Рис. 1. Участки нагрева стальной заготовки

Каждый нагреваемый участок стальной заготовки должен отвечать соответствующим технологическим требованиям по температурному распределению в конце процесса нагрева. Требуемое конечное температурное распределение на поверхности стальной заготовки в конце процесса зонного индукционного нагрева изображено на рис. 2.

Участки активного нагрева ДУ2, которые подвергаются операциям обкатки и прессования, требуется нагреть до 1250 °С с допустимым отклонением температуры ± 15 °С. Участки нагрева ДУ1 и ДУ3 нагреваются до меньшей температуры – до 950 °С (с допустимым отклонением температуры ± 15 °С) с целью сохранения температурного перепада. Максимальная допустимая температура нагрева стальной заготовки составляет 1350 °С – температура плавления стали, мини-

мальная температура нагрева заготовки перед операциями пластической деформации $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ – это температура, по достижении которой снимаются внутренние напряжения [15]. Такого рода профиль рационально применять для термообработки ответственных изделий в машиностроении (например, валов), где пластической деформации подвергаются конкретные участки по длине заготовки, что в массовом производстве позволит существенно снизить энергетические затраты. Данный подход принципиально отличается от типового сквозного равномерного нагрева заготовки перед обработкой давлением и приводит к существенному усложнению технологического процесса.

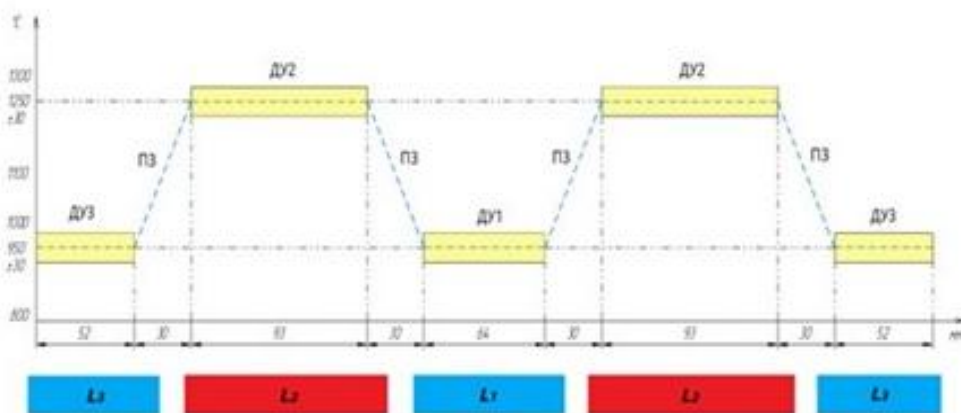


Рис. 2. Требуемое конечное температурное распределение на поверхности стальной заготовки в конце процесса нагрева

Для достижения неравномерного температурного профиля, изображенного на рис. 2, необходимо спроектировать зонную ИДУ автономно управляемыми секциями, каждая из которых характеризуется определенным набором конструктивных и режимных параметров (рис. 3).

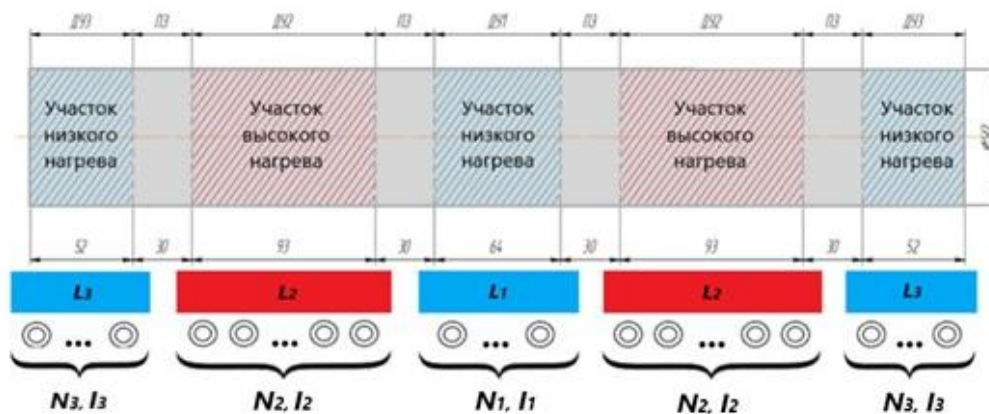


Рис. 3. Схема расположения индуктора относительно стальной заготовки

Термообработка участков активного нагрева ДУ2 происходит за счет секций индуктора длиной L_2 с током источника питания I_2 , каждая из которых вклю-

чает N_2 равномерно расположенных витков. Аналогично термообработка участков нагрева ДУ1 и ДУ3 проводится за счет секций индуктора длинами L_1 и L_3 с равномерно распределенными на них N_1 и N_2 витками и токами источников питания I_1 и I_3 соответственно. Достижение заданного неравномерного температурного распределения на поверхности заготовки (см. рис. 2) обеспечивается за счет выбора оптимальных значений конструктивных и режимных параметров индукционной системы.

Численная модель процесса зонного индукционного нагрева

Математическая модель индукционных нагревательных установок, принцип действия которых основан на взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессах, в общем виде может быть представлена системой уравнений Максвелла и Фурье для электромагнитных и температурных полей [16, 17]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{rot} H = J + \frac{\partial D}{\partial t}; \\ \operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t}; \\ \operatorname{div} B = 0; \\ \operatorname{div} E = 0; \\ c(\theta(x, y, t))\gamma(\theta(x, y, t))\frac{\partial \theta(x, y, t)}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda(\theta(x, y, t))\operatorname{grad}\theta(x, y, t)) \\ -c(\theta(x, y, t))\gamma(\theta(x, y, t))V\operatorname{grad}\theta(x, y, t) - \operatorname{div}[EH]. \end{array} \right. \quad (1)$$

Здесь E – напряженность электрического поля; D – электрическая индукция; B – магнитная индукция; H – напряженность магнитного поля; J – плотность тока проводимости; t – время; θ – температурное распределение; x – координата по длине; y – радиальная координата; $c(\theta)$ – удельная теплоемкость металла; $\lambda(\theta)$ – коэффициент теплопроводности металла; $\gamma(\theta)$ – плотность металла; V – вектор скорости перемещения заготовки.

Для численного решения сложных систем взаимосвязанных нелинейных уравнений, к которым относится система уравнений Максвелла и Фурье (1) [18], применяют специальные пакеты прикладных программ для конечно-элементного мультифизического анализа.

Использование программных пакетов, таких как ANSYS, FLUX и др., для численного моделирования процесса зонного индукционного нагрева стальной заготовки позволяет с высокой степенью точности рассчитать электромагнитные и температурные распределения в процессе индукционного нагрева, что необходимо для проведения анализа, реализации автоматизированных оптимизационных процедур (в том числе для поиска оптимальных значений конструктивных и режимных параметров ИНУ), синтеза интеллектуальных систем управления технологическим процессом индукционного нагрева и других целей.

Кроме того, численная модель, получающая в режиме реального времени информацию о параметрах процесса с измерительных устройств, является необходимым элементом для построения цифрового двойника технологического процесса, который совместно с информационными и управляющими подсистемами

формирует основу для синтеза сложных систем интеллектуального управления технологическим процессом, к которым в полной мере относятся КФСУ ТП.

Специальные требования к численному моделированию процесса зонного индукционного нагрева обусловлены его использованием при решении задачи оптимального управления и проектирования ИНУ для зонного нагрева стальной цилиндрической заготовки. В соответствии с этими требованиями предполагается секционное проектирование индуктора с равномерным распределением витков внутри секций и автономным управлением токами для каждой из этих секций, что подробно описано ниже.

На рис. 4 представлено схематичное изображение индукционной системы «заготовка – индуктор» и показаны основные конструктивные параметры ИНУ для решения задачи моделирования.

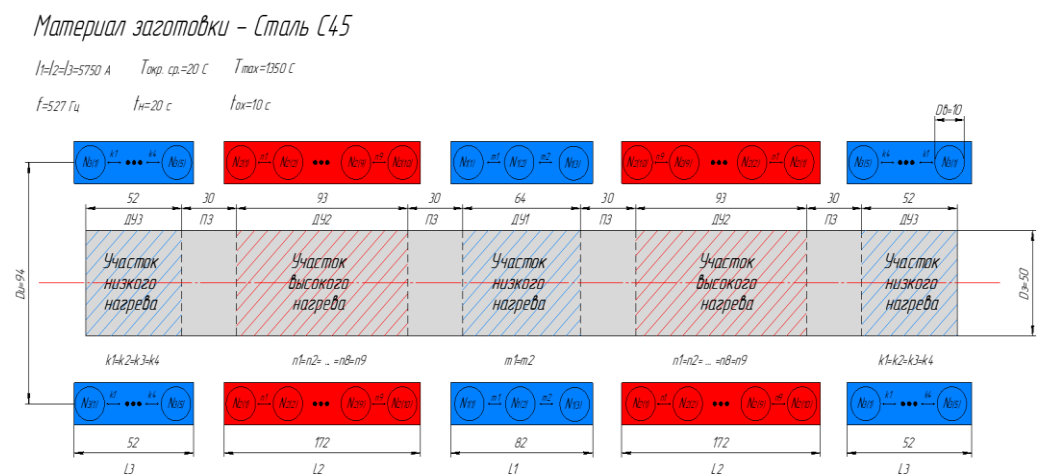


Рис. 4. Геометрия индукционной нагревательной системы

Моделируемая система индукционного нагрева состоит из трех основных элементов: стальной (марки С45) заготовки, медных витков индуктора и окружающей среды (воздуха). Для численного моделирования всем элементам присваиваются типовые теплофизические и электромагнитные свойства. Кроме того, для моделирования процесса нагрева задаются начальные условия и технологические ограничения: начальная температура окружающей среды $T_{\text{нач}} = T_{\text{окр. ср.}}$ (воздуха) и критическая температура материала заготовки T_{max} (стали С45), по достижении которой происходит пережог металла.

Основными геометрическими параметрами заготовки являются диаметр D_3 и длина, равная сумме участков термообработки ДУ1, ДУ2, ДУ3 и ПЗ (см. рис. 4). В свою очередь, основными конструктивными параметрами индуктора являются диаметр $D_{\text{и}}$, длины секций нагрева L_1 , L_2 и L_3 и число витков на каждой секции нагрева N_1 , N_2 и N_3 . Витки индуктора диаметром $D_{\text{в}}$ расположены равномерно вдоль секций нагрева, т. е. расстояние между витками в пределах каждой из рассматриваемых секций является одинаковым (см. рис. 4).

Помимо конструктивных параметров задаются режимные параметры: сила тока и частота источника питания. В представленной численной модели, в отличие от известных моделей зонного нагрева [19], реализована возможность авто-

номного управления токами для каждой секции индуктора. Это означает, что каждой секции нагрева индуктора соответствует собственное значение питающего тока I_1, I_2, I_3 (для секций L_1, L_2, L_3 соответственно, см. рис. 4). К режимным параметрам индуктора также относится и время процесса, которое можно разделить на два временных интервала: время нагрева t_n и время охлаждения $t_{ох}$. Под t_n понимается этап нагрева, во время которого ИНУ индуцирует внутренние источники тепла в заготовке. Во время охлаждения ИНУ отключается и стальная заготовка естественно охлаждается за счет температуры окружающей среды. При оптимальной длительности интервала охлаждения заготовки $t_{ох}$ происходит выравнивание температурного распределения для его максимального приближения к требуемому профилю, необходимому для последующих технологических операций, за счет естественных тепловых потерь при отсутствии внутренних источников тепла.

Результатом численного моделирования процесса зонного индукционного нагрева (рис. 5) является конечное температурное распределение, которое необходимо для последующего анализа и принятия технологических решений (оранжевый график – требуемое конечное температурное распределение на поверхности стальной заготовки, синий график – полученное в ходе численного моделирования конечное температурное распределение на поверхности стальной заготовки).

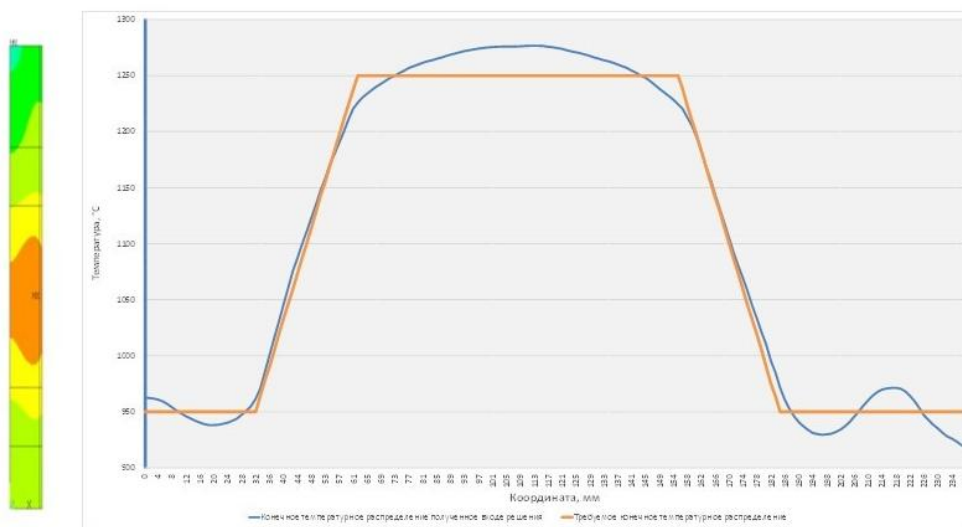


Рис. 5. Конечное температурное распределение на поверхности заготовки, полученное в ходе численного решения, в сравнении с требуемым конечным температурным распределением

Численные модели реальных технологических установок предоставляют широкие возможности для анализа сложных систем и физических процессов, позволяя проводить исследования и тестовые испытания без риска для функционирования реальных производственных процессов. Кроме того, их использование способствует реализации оптимизационных процедур с минимальными затратами ресурсов, а также облегчает проектирование систем автоматического управления различной степени сложности, включая киберфизические системы

управления технологическими процессами. В то же время численные модели реальных технологических процессов характеризуются высокой вычислительной сложностью и значительной ресурсоемкостью, что связано с необходимостью учета множества факторов, существенно влияющих на точность и достоверность результатов моделирования. В связи с этим их обычно применяют только на этапах оптимального проектирования. Однако далее в статье предложен вариант построения киберфизической системы, позволяющей использовать численную модель не только для решения задачи оптимального проектирования установки, но и для оперативного управления процессом нагрева заготовок в режиме реального времени.

Структура киберфизической системы управления процессом индукционного нагрева

Для обеспечения требуемого температурного профиля на поверхности стальной заготовки процесс зонного индукционного нагрева необходимо рассмотреть как объект управления и оптимизации. Ввиду пространственной распределенности температурного поля процесс зонного индукционного нагрева представляет собой объект управления с распределенными параметрами (ОРП), а изменяющееся во времени и пространстве температурное поле является управляемой функцией состояния данного ОРП. Такое представление объекта управления обуславливает принципиальные особенности и накладывает существенные ограничения при синтезе системы управления.

Процесс нагрева заготовки в ИНУ подвержен влиянию различного рода возмущающих воздействий, которые согласно классификации, принятой в [20], делятся на параметрические и функциональные. Параметрические возмущения обусловлены неполнотой информации о теплофизических и электромагнитных характеристиках материала нагреваемой заготовки или их непредсказуемым изменением в течение процесса нагрева (например, при изменении номенклатуры изделий). Функциональные возмущения связаны с конструкцией индуктора и реализацией управляющих воздействий.

Одним из основных способов достижения требуемого результата работы системы в условиях действия возмущений является построение замкнутой системы управления, направленной на отработку данных возмущений. В случае управления ОРП построение замкнутой системы автоматического управления связано с множеством усложняющих факторов, в первую очередь с распределенным характером управляемой функции состояния [20]. При управлении пространственно-временным распределением функции состояния ОРП (изменяющимся во времени распределением температуры на поверхности заготовки) требуется распределенный по пространственным координатам контроль, при этом количество точек измерения напрямую влияет на точность контроля конечного температурного поля, формируемого замкнутой системой управления с учетом действия возмущений. Однако в реальных условиях установка датчиков измерения температуры по длине заготовки обычно ограничена конструкцией индуктора, поэтому наиболее доступными для измерения являются температуры торцов заготовки. В рассматриваемой задаче формирования заданного неравномерного температурного распределения по длине заготовки измерение только торцевых температур не отвечает требуемой точности контроля температурного распределения.

В этом случае для построения замкнутой системы управления температурным распределением заготовок в процессе зонного индукционного нагрева пред-

лагается перейти от рассмотрения замкнутой системы управления одной заготовкой к рассмотрению дискретно управляемого и дискретно наблюдаемого множества последовательно нагреваемых заготовок. При этом принимаются следующие допущения.

Во-первых, конструктивные и режимные параметры ИНУ рассчитываются исходя из предположения, что геометрические параметры заготовок и физические свойства материалов варьируются незначительно для партии заготовок одной номенклатуры, при этом основные технологические параметры остаются неизменными в течение всего производственного цикла до изменения номенклатуры нагреваемого изделия и режима работы установки.

Во-вторых, предполагается, что измерение температурного распределения вдоль пространственной координаты по окончании процесса нагрева технически реализуемо. После выхода из индуктора либо заготовка перемещается вдоль датчика измерения температуры, или датчик температуры – вдоль заготовки, либо заготовка позиционируется на некоторое время в поле нескольких датчиков температуры.

Выполнение указанных условий позволяет предложить управление процессом зонного индукционного нагрева партии заготовок в замкнутой системе, когда измерение выходной (управляемой) величины осуществляется по окончании процесса нагрева отдельной заготовки, а результат измерения участвует в формировании управляющего воздействия следующей заготовки (в рамках одной партии).

Задача предлагаемой системы состоит в непрерывной оценке отклонения требуемого температурного профиля на поверхности стальной заготовки с полученным температурным распределением в конце процесса зонного индукционного нагрева (определяемым по измерительным сигналам обратной связи). В общем случае управляющие воздействия, влияющие на конечное температурное распределение в ходе индукционного нагрева, можно разделить на режимные и конструктивные. В качестве режимных управляющих воздействий рассматриваются длительности интервалов включения/выключения секций индуктора (t_n , $t_{ох}$) и значения токов на каждой его секции (I_1 , I_2 , I_3), возможность реализации которых подробно описана ранее. Реализация оптимальных режимных параметров ИНУ позволяет в оперативном режиме компенсировать отклонение температурного распределения от заданного, в т. ч. вызванного изменением измеряемых возмущений, к которым относятся температура окружающей среды ($T_{окр.ср.}$).

При этом оптимальные конструктивные параметры ИНУ, к которым относятся количество и размер витков (N_1 , N_2 , N_3 , D_B , D_n), шаг намотки и т. д., рассчитываются один раз на этапе проектирования для производственного цикла нагрева одной номенклатуры стальных заготовок (для каждой партии заготовок, отличных по характеристиками от предыдущей, отдельно). Такая особенность применения оптимальных значений конструктивных параметров ИНУ объясняется отсутствием технической возможности реализации оперативного (автоматического) изменения конструкции ИНУ в условиях технологического непрерывного процесса. Исключением является использование роботизированных систем автоматической замены секций индуктора или их изменения путем подключения или отключения отдельных витков или их групп. Однако для реализации такой возможности в любом случае необходимо наличие нескольких типовых форм индукторов для каждого вида заготовок, что накладывает существенную финан-

совую нагрузку и не решает в полной мере проблему оперативной замены индуктора во время технологического процесса (появление нового материала или формы заготовки в условиях быстроменяющегося рынка). Расчет оптимальных значений режимных и конструктивных параметров ИНУ проводится с использованием специальных методов параметрической оптимизации и оптимального управления, которые являются предметом отдельного рассмотрения.

Формирование управляющего воздействия, к которому относятся режимные параметры ИНУ, в предлагаемой системе связано с применением численных процедур, требующих больших вычислительных ресурсов. Поэтому мощность вычислительного устройства системы управления и сложность алгоритма формирования управляющего воздействия будут определять запаздывание реакции системы на возмущающие воздействие, имеющее переменный характер. В зависимости от соотношения вычислительной мощности системы и вычислительной нагрузки время на внедрение управляющего воздействия может быть скорректировано с учетом запаздывания, при этом запаздывание может составлять время, эквивалентное нагреву нескольких заготовок в зависимости от скорости процесса индукционного нагрева одной заготовки и мощности вычислительных устройств.

Задача формирования управляющего воздействия включает в себя задачи идентификации модели, отражающей поведение реальной ИНУ, и разработки оптимального закона программного управления на основе полученной модели и в дальнейшем формирования этого управления в режиме реального времени.

Рассмотренные выше математическая и численная модели позволяют формировать оптимальные значения не только режимных параметров управления ИНУ, к которым относятся количество интервалов постоянства и их длительность (интервалы работы ИНУ), но и параметры, относящиеся к конструктивным характеристикам ИНУ: длины секций индуктора, значения токов данных секций, число витков и т. д. Оптимальные параметры ИНУ определяются на первом этапе расчета – этапе конструирования. В нашем случае этап проектирования конструктивной части фактически выполняет управляющая часть системы, формируя на выходе оптимальные значения этих параметров. Параметры, которые остаются неизменными после первого этапа конструирования (конструктивные параметры ИНУ), в последующих циклах управления не оптимизируются, но их значения в модели могут быть скорректированы от принятых в конструкции по результатам циклически выполняемой идентификации модели.

Для реализации представленных выше возможностей система управления должна обладать необходимым функционалом и отвечать определенным требованиям. Наиболее подходящим классом систем являются киберфизические системы управления технологическими процессами (КФСУ ТП). КФСУ ТП, в отличие от традиционных систем автоматического управления (САУ), обладают рядом принципиальных достоинств [5], позволяющих реализовать систему управления, представленную на рис. 6. Они позволяют проектировать более гибкие и адаптивные технологические структуры, позволяющие оперативно реагировать на изменения рынка спроса и характеристик производства, тем самым повышая экономическую и производственную эффективность предприятия.

Системы управления киберфизического класса представляют собой взаимосвязанные вычислительную, коммуникационную, измерительную, управляющую подсистемы, интегрированные непосредственно с управляемым физическим процессом [5, 21–23].

В соответствии с [23] предлагается КФСУ ТП зонного индукционного нагрева стальной цилиндрической заготовки, структурная схема которой приведена на рис. 6. Измеренный температурный профиль по объему заготовки по окончании процесса нагрева в совокупности с известными управляющим воздействием (УВ) и возмущениями, обрабатываемыми в режиме реального времени (РРВ), подается на вход блока интеллектуального анализа (БИА), выходом которого является оценка соответствия полученного температурного распределения на поверхности заготовки требуемому по техническому заданию в условиях действий УВ и возмущений.

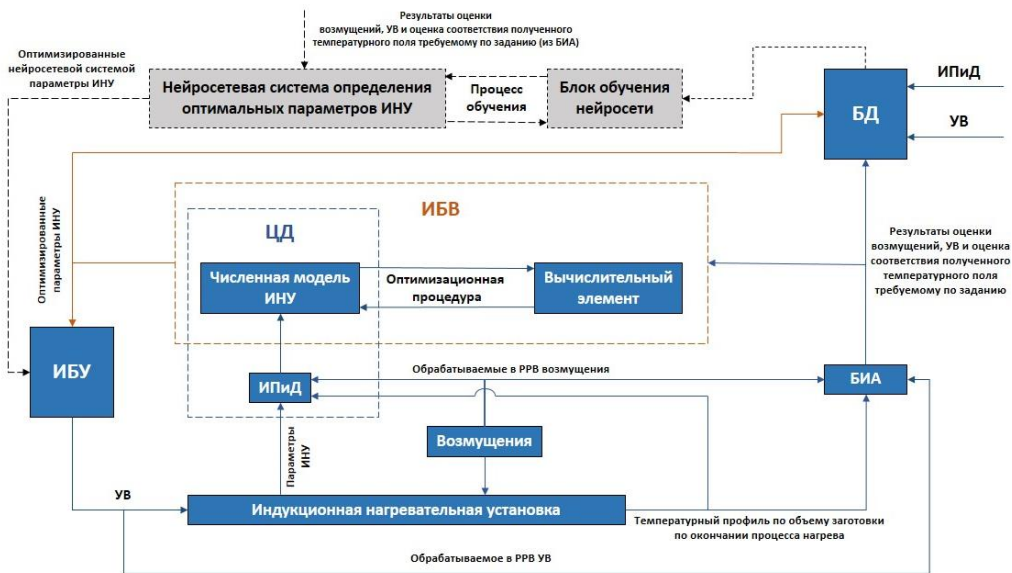


Рис. 6. Структура КФСУ ТП

Результат работы БИА передается в интеллектуальный блок вычислений (ИБВ), задача которого состоит в поиске оптимальных параметров ИНУ, значения которых позволяют получить требуемый по техническому заданию температурный профиль на поверхности нагреваемой заготовки. Поиск оптимальных параметров ИНУ происходит с использованием оптимизационной процедуры, основанной на совместной работе численной модели ИНУ (реализованной в специализированных программных пакетах для численного моделирования) и вычислительного элемента, представляющего собой пакет прикладных программ для высокосложных математических вычислений. При этом численная модель ИНУ постоянно актуализируется при взаимодействии с измерительными приборами и датчиками (ИПиД) и, таким образом, формирует цифровой двойник (ЦД) реальной ИНУ. Наличие ЦД в структуре системы является одним из принципиальных отличий КФСУ ТП от типовых систем управления.

Результат работы ИБВ, представляемый вектором оптимальных параметров ИНУ, передается на блок интеллектуального управления (ИБУ), который, в свою очередь, формирует УВ (изменение значений токов, частот, длин секций индуктора, шага витков и т. д.).

В рамках КФСУ ТП зонного индукционного нагрева предлагается формировать базу данных (БД) для хранения информации о ходе технологического про-

цесса. БД аккумулирует в себе результаты работы БИА, ИБВ, данные с ИПИД и информацию об УВ. БД реализует возможность применения альтернативных методов управления, основанных на искусственном интеллекте, которые способны проводить оценку параметров модели без ресурсоемкой оценки с использованием самой модели. При таком режиме работы системы управления на нее подаются данные о технологическом процессе с БИА. На основе полученной информации и данных из блока обучения нейросети система формирует собственный вектор оптимальных значений ИНУ на основе ранее полученного опыта (данные из БД и блока обучения нейросети), без непосредственного использования численной модели ИНУ и оптимизационного алгоритма. Такой подход не должен и не может полностью заменить являющийся основным метод оптимизации на основе применения модели, но позволит осуществлять оценку параметров для каждой заготовки.

Таким образом, описанная выше КФСУ ТП позволяет реализовать оптимальное управление процессом зонного индукционного нагрева стальной цилиндрической заготовки с целью достижения требуемого температурного распределения на ее поверхности перед последующими операциями обработки давлением в условиях действия параметрических и функциональных возмущений.

Заключение

Рассмотренные в данной статье вопросы разработки структуры киберфизической системы управления раскрывают сущность управления и контроля за процессом зонного индукционного сквозного нагрева стальной цилиндрической заготовки, заключающегося в необходимости создания неравномерного по длине заготовки конечного температурного распределения, профиль которого определяется наличием отдельных зон заготовки, подвергаемых в дальнейшем операциям пластической деформации.

В статье проведен анализ технологических требований к формированию неравномерного температурного профиля на поверхности стальной цилиндрической заготовки в конце процесса нагрева. Достижение предъявляемых требований возможно путем применения установки зонного сквозного индукционного нагрева. Проектирование такой установки требует построения математической модели для анализа и оценки качества конечного температурного распределения в процессе определения оптимальных конструктивных и режимных параметров ИУ. В статье приведено краткое описание численной нелинейной модели процесса зонного индукционного нагрева с учетом специальных требований к проектированию многосекционной индукционной установки.

Предложено расширить область применения численной модели зонного индукционного нагрева с целью построения автоматической системы управления процессом нагрева непрерывного потока заготовок. Приведена структура системы, которая относится к классу киберфизических систем управления ОРП, позволяющих достигать требуемое конечное пространственно-временное распределение функции состояния и обеспечивать отработку возмущающих воздействий различной природы, в том числе оценивать потребность в корректировке конструктивных параметров ИУ за счет подключения или отключения активных витков в режиме реального времени. Численная модель процесса зонного индукционного нагрева является основой для создания цифрового двойника, отражающего поведение технологического процесса в режиме реального времени, который совместно с подсистемами, изображенными на рис. 6, формирует КФСУ ТП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Айтмухамбетов И.Е., Никонова Т.Ю.* Пластическая деформация. Методы и применение // Научный журнал. 2020. № 3 (48). С. 20–22.
2. Плюсы и минусы установок индукционного нагрева // НПП «ЭЛСИТ» [Электронный ресурс]. – URL: <https://элсит.рф/статьи/плюсы-и-минусы-установок-индукционного-нагрева?ysclid=lompxy868v313694259> (дата обращения: 06.11.2023).
3. *Артур М.Х.* Синтез алгоритмов оптимального управления процессом индукционного нагрева стальной цилиндрической заготовки при неполном измерении состояния // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2017. № 3. С. 7–15.
4. *Цветков В.Я.* Управление с применением кибер-физических систем // Перспективы науки и образования. 2017. № 3 (27). С. 55–60.
5. *Пешкин К.С.* Назначение и перспективы развития киберфизических систем управления технологическими процессами // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2023. № 1. С. 47–59.
6. *Кучеров В.В.* Индукционный нагрев в промышленности // Индустрия. 2014. № 3. С. 85.
7. *Петров П.А., Крутина Е.В., Калтин Ю.Г.* Нагрев и нагревательные устройства в кузнечном производстве. М.: МГТУ «МАМИ», 2010. 110 с.
8. *Сасса В.С.* Футеровка индукционных электропечей. М.: Металлургия, 1989. 231 с.
9. *Rudnev V.I. et al.* Handbook of induction heating. N.Y.: Marcel Dekker, 2003.
10. *Рапопорт Э.Я.* Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. М.: Металлургия, 1993. 278 с.
11. *Яицков С.А.* Ускоренный изотермический индукционный нагрев кузнечных заготовок. М.: Машгиз, 1962. 96 с.
12. *Кухарь В.В., Лаврентик О.А., Бурко В.А., Крестников М.В.* Моделирование температурного поля неравномерно нагретой по длине заготовки при ее остывании на штампе // Вестник Приазовского государственного технического университета. 2007. № 17. С. 125–129.
13. *Кухарь В.В., Диамантопуло К.К., Мазан В.И.* Способы получения профилированной заготовки. Пат. 43614А Украина, МПК В 21 К 1/08. 2001.
14. Способ получения фасонной заготовки под штамповку. Пат. 49389А Украина, МПК В 21 К 1/08.
15. Сталь 45. Применение углеродистой конструкционной Стали 45 при производстве редукторов и цепных звездочек // Stalcu.ru все про обработку металла [Электронный ресурс]. – URL: <https://stalcu.ru/temperatura/temperatura-plavleniya-stali-45.html?ysclid=lojx4dvej6319835808> (дата обращения: 05.11.2023).
16. *Вайнберг А.М.* Индукционные плавильные печи. М.: Энергия, 1967. 415 с.
17. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. М., Высшая школа, 1967. 559 с.
18. *Шарапова О.Ю.* Создание численной модели индукционно нагревательной установки периодического действия в среде наукоемкого расчетного программного комплекса FLUX // Технические науки: проблемы и перспективы. Материалы I Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, март 2011 г.). Санкт-Петербург: Реноме, 2011. С. 191–195.
19. *Ennen M., Niedzwiecki I., Baake E.* Tailored heating of billets for hot forming using an induction heating approach // In Proceeding of XIX International UIE-Congress on Electrotechnologies for Material Processing: Plzen (Czech Republic), September 2–3. 2021.
20. *Рапопорт Э.Я., Плишивцева Ю.Э.* Технология оптимального проектирования систем с распределенными параметрами: программные стратегии принятия решений // Онтология проектирования. 2017. Т. 7. № 2(24). С. 172–190. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-2-172-190.
21. *Гурьянов А.В., Заколдаев Д.А., Шукалов А.В., Жаринов И.О., Костишин М.О.* Организация цифровых производств на основе киберфизических систем и онтологий // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 2. С. 268–277. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-268-277.
22. *Юдинцев А.Г., Дмитриев В.М., Ганджа Т.В., Зайченко Т.Н., Дубинин Н.М.* Структурно-функциональная схема цифрового двойника испытательного комплекса системы электроснабжения космических аппаратов на основе многоуровневой компьютерной модели // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2022 Т. 18. № 3–4. С. 141–150. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-141-150.
23. ПНЕТ 854–2023 (ИСО 23704-1 2022). Системы киберфизические. Типовая архитектура для киберфизической системы управления умным станком. Часть 1. Биомаркеры: пред-

варительный национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 ноября 2023 г. № 72-пнст: подготовлен Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА) на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии стандарта. М.: Российский институт стандартизации, 2023.

Статья поступила в редакцию 10.09.2024 г.

DEVELOPMENT OF THE STRUCTURE OF A CYBERPHYSICAL CONTROL SYSTEM FOR THE PROCESS OF TAILORED INDUCTION HEATING OF A STEEL BILLET

*S.A. Kolpashhikov, K.S. Peshkin*¹

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: skolpaschikov@mail.ru, kir.peschkin@yandex.ru

Abstract. *The article is devoted to the development of the structure of a cyberphysical control system for the process of zone induction heating, widely used in modern industrial production during the heat treatment of metal products for various purposes. An analysis of the range of products manufactured using induction heat treatment and the advantages of using induction heating systems has shown a wide range of applications of this method of heat treatment in modern production and great opportunities for automation and optimization of processes associated with induction heating of products. This fact indicates the relevance of the development of various kinds of intelligent control systems in relation to the processes of industrial induction heating of metal blanks and semi-finished products. The article describes the induction method of zone heat treatment of metals, its advantages over flame heat treatment methods and the range of products manufactured using it. A description of the billet-inductor system is presented, for which the structure of a cyberphysical control system for the process of zone induction heating has been developed. The technological requirement for the final temperature distribution on the surface of the workpiece and the factors influencing the deviation of the temperature distribution from that required in the process of zone induction heating are considered. A list of possible disturbing influences is given, requirements for the technological process are formulated, control principles are described and, based on this, the structure of the zone induction heating process control system, which belongs to the class of cyberphysical process control systems, is developed.*

Keywords: *tailored through induction heating, intelligent control system, plastic deformation surgery, cyberphysical system, induction heating system, technological process.*

REFERENCES

1. *Ajtmuxambetov I.E., Nikonova T.Yu.* Plasticheskaya deformatsiya. Metody i primeneniye [Plastic deformation. Methods and application] // Nauchnyy zhurnal. 2020. No. 3(48). Pp. 20–22. (In Russian)
2. *Plyusy i minusy ustanovok indukcionnogo nagreva* [Pros and cons of induction heating systems] // NPP "ELSIT". URL: <https://e`lsit.rf/stat`i/plyusy`-i-minusy`-ustanovok-indukcionnogo-nagreva?ysclid=lompxy868v313694259> (data obrasheniya: 06.11.2023). (In Russian)
3. *Artur M.H.* Sintez algoritmov optimal'nogo upravleniya processom indukcionnogo nagreva stal'noj cilindricheskoj zagotovki pri nepolnom izmerenii sostoyaniya [Synthesis of optimal control algorithms for process of induction heating of steel] // Vestnik Samar. gosud. tekhn. un-ta. Seriya: Tekhnicheskije nauki. 2017. No. 3. Pp. 7–15. (In Russian)
4. *Czvetkov V.Ya.* Upravlenie s primeneniem kiber-fizicheskix sistem [Management using cyberphysical systems] // Perspektivy Nauki i Obrazovaniya. 2017. No. 3 (27). Pp. 55–60. (In Russian)



© The Author(s), 2024

¹ *Sergey A. Kolpashchikov (Ph.D. (Techn.)), Head of Department.
Kirill S. Peshkin, Postgraduate Student.*

5. *Peshkin K.S.* Purpose and prospects for the development of cyberphysical systems for technological processes [Purpose and development prospects of cyber-physical systems for technological process control] // *Vestnik Samar. gosud. tekhn. un-ta. Seriya: Tekhnicheskie nauki.* 2023. No. 1. Pp. 47–59. (In Russian)
6. *Kucherov V.V.* Indukcionnyj nagrev v promyshlennosti [Induction heating in industry] // *Industriya.* 2014. No. 3. Pp. 85. (In Russian)
7. *Petrov P.A., Krutina E.V., Kalpin Yu.G.* Nagrev i nagrevatelnye ustrojstva v kuznechnom proizvodstve [Heating and heating devices in forging production]. M.: MGТУ "MAMI", 2010. 110 p. (In Russian)
8. *Sassa V.S.* Futerovka indukcionnyx elektropetchej [Lining of induction electric furnaces]. M.: Metallurgiya, 1989. 231 p. (In Russian)
9. *Rudnev V.I. et al.* Handbook of induction heating. N.Y.: Marcel Dekker, 2003.
10. *Rapoport E.Ya.* Optimizaciya processov indukcionnogo nagreva metalla [Optimization of metal induction heating processes]. M.: Metallurgiya, 1993. 278 p. (In Russian)
11. *Yaiczkov S.A.* Uskorennyj izotermicheskiy indukcionnyj nagrev kuznechnyx zagotovok [Accelerated isothermal induction heating of forging blanks]. M.: Mashgiz, 1962. 96 p. (In Russian)
12. *Kuxar V.V., Lavrentik O.A., Burko V.A., Krestnikov M.V.* Modelirovanie temperaturnogo polya neravnomerno nagretoj po dlina zagotovki pri ee ostyvanii na shtampe [Modeling the temperature field of a workpiece unevenly heated along its length during its cooling on a stamp] // *Vestnik Priazovskogo gosud. texnich. un-ta.* 2007. No. 17. Pp. 125–129. (In Russian)
13. *Kuxar V.V., Diamantopulo K.K., Mazan V.I.* Sposoby polucheniya profilirovannoj zagotovki [Methods for obtaining profiled blanks]. Pat. 43614A Ukraina, MPK V 21 K 1/08. 2001. (In Russian)
14. Sposob polucheniya fasonnoj zagotovki pod shtampovku [Method of obtaining a shaped blank for stamping]. Pat. 49389A Ukraina, MPK V 21 K 1/08. (In Russian)
15. Stal 45. Primenenie uglerodistoj konstrukcionnoj Stali 45 pri proizvodstve reduktorov i cepnyx zvyozdochek [Steel 45. Application of carbon structural Steel 45 in the production of gearboxes and chain sprockets] // *Stalcu.ru vse pro obrabotku metalla.* URL: <https://stalcu.ru/temperaturny/temperatura-plavleniya-stali-45.html?ysclid=lojx4dvej6319835808> (data obrashheniya: 05.11.2023). (In Russian)
16. *Vajnberg A.M.* Indukcionnye plavilnye pechi [Induction melting furnaces]. M.: Energiya, 1967. 415 p. (In Russian)
17. *Lykov A.V.* Teoriya teploprovodnosti [Theory of thermal conductivity]. M.: Vysshaya shkola, 1967. 559 p. (In Russian)
18. *Sharapova O.Yu.* Sozdanie chislennoj modeli indukcionno nagrevatel'noj ustanovki periodicheskogo dejstviya v srede naukoemkogo raschetnogo programmnogo kompleksa FLUX [Creation of a numerical model of a periodic induction heating unit in the environment of the high-tech calculation software package FLUX] // *Texnicheskie nauki: problemy i perspektivy: materialy I Mezhdunar. nauch. konf. (Sankt-Peterburg, mart 2011).* Sankt-Peterburg: Renome, 2011. Pp. 191–195. (In Russian)
19. *Ennen M., Niedzwiecki I., Baake E.* Tailored heating of billets for hot forming using an induction heating approach // In *Proceeding of XIX International UIE-Congress on Electrotechnologies for Material Processing: Plzen (Czech Republic), September 2–3. 2021.*
20. *Rapoport E.Ya., Pleshivceva Yu.E.* Texnologiya optimalnyh sistem s raspredelyonnymi parametrami: programmnye strategii prinyatiya reshenij [Technology of optimal systems with distributed parameters: software strategies for decision making] // *Ontologiya proektirovaniya.* 2017. Vol. 7. No. 2 (24). Pp. 172–190. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-2-172-190 (In Russian)
21. *Guryanov A.V., Zakoldaev D.A., Shukalov A.V., Zharinov I.O., Kostishin M.O.* Organizaciya cifrovyx proizvodstv na osnove kiberfizicheskix sistem i ontologij [Organization of digital production based on cyber-physical systems and ontologies] // *Nauchno-texnicheskij vestnik informacionnyx texnologij, mexaniki i optiki.* 2018. Vol. 18. No. 2. Pp. 268–277. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-268-277. (In Russian)
22. *Yudincev A.G., Dmitriev V.M., Gandzha T.V., Zajchenko T.N., Dubinin N.M.* Strukturno-funkcionalnaya sxema cifrovogo dvojnika ispytatel'nogo kompleksa sistemy elektrosnabzheniya kosmicheskix apparatov na osnove mnogourovnevoj kompyuternoj modeli [Structural and functional diagram of the digital twin of the test complex of the power supply system of spacecraft based on a multi-level computer model] // *Elektrotexnicheskie i informacionnye komplekxy i sistemy.* 2022. Vol. 18. No. 3–4. Pp. 141–150. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-141-150. (In Russian)

23. PNET 854–2023 (ISO 23704-1 2022). Sistemy kiberfizicheskie. Tipovaya ar-hitektura dlya kiberfizicheskoj sistemy upravleniya umnym stankom. Chast 1. Biomarkery: predvaritelnyj nacionalnyj standart Rossijskoj Federacii: izdanie oficialnoe: utverzhden i vveden v dejstvie Prikazom Federalnogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 27 noyabrya 2023 g. No. 72-pnst: podgotovlen Federalnym gosudarstvennym byudzhetnym obrazovatelnyim uchrezhdeniem vysshego obrazovaniya "MIREA – Rossijskij tekhnologicheskij universitet" (RTU MIREA) na osnove sobstvennogo perevoda na russkij yazyk angloyazychnoj versii standarta [Part 1. Biomarkers: preliminary national standard of the Russian Federation: official edition: approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated November 27, 2023 No. 72-pnst: prepared by the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "MIREA – Russian Technological University" (RTU MIREA) based on its own translation into Russian of the English version of the standard]. M.: Rossijskij institut standartizacii, 2023. (In Russian)

Original article submitted 10.09.2024