

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТА МОДЕРНИЗАЦИИ КОВОЧНОЙ ЛИНИИ ДЛЯ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ

Гиршфельд А. М., Симсон Э. А.

1. Введение

Подшипники на протяжении всего развития цивилизации были и остаются самыми распространенными компонентами подавляющего большинства машин и механизмов. В силу этого производство подшипников справедливо считают стратегической отраслью промышленности. Акционерное общество «Харьковский подшипниковый завод» (АО «ХАРП», Украина) является крупнейшим производителем широкой гаммы подшипников для железнодорожного и автомобильного транспорта, сельхозмашиностроения, станкостроения и других отраслей машиностроения. В прошлом, АО «ХАРП» (ГПЗ № 8 – «8-й государственный подшипниковый завод») являлся основным предприятием советской отрасли производства подшипников для Всесоюзного научно-исследовательского института подшипниковой промышленности (ВНИПП) при освоении новых типов подшипников и новых технологий серийного производства.

Одним из важнейших производственных участков при производстве подшипников является ковочная линия Л-408 (Украина) для производства заготовок колец. Сначала заготовки поступают на линию индукционного разогрева, затем в гидравлический пресс и, наконец, в конце линии осуществляется горячая раскатка кольца. По результатам технического аудита, выявлено, что в современной рыночной ситуации, характеризующейся гораздо большей номенклатурой колец подшипников и меньшими объемами производимых партий, такая конфигурация производства приводит к огромным неоправданным затратам электроэнергии. Таким образом, возникла потребность в коренной модернизации ковочного производства, направленной на обеспечение автономной работы каждой ковочной линии и параллельно – модернизации самой конструкции установок индукционного разогрева и гидравлического пресса, обеспечивающих, благодаря новым технологиям, более высокий КПД и в то же время – качество самих заготовок.

В данной работе излагаются основные этапы оригинальных теоретических и натурных исследований, обеспечивших разработку новой линии. Исследования выполнялись в Объединенном инженерном центре (ОИЦ) Индустриальной группы УПЭК (Украинская промышленная энергетическая компания, куда входит АО «ХАРП») и имеют самостоятельную научную ценность при решении аналогичных задач модернизации кузнечного производства.

2. Объект исследования и его технический аудит

Объектом исследования является ковочная линия Л-408 для производства заготовок колец железнодорожных подшипников (рис. 1). Линия состоит из:

– участка индукционного разогрева КИН 750 производства Всесоюзного научно-исследовательского и проектно-конструкторского института токов высокой частоты (ВНИИТВЧ, г. Ленинград, СССР);

– гидравлического трехпозиционного пресса П-2038А производства «Днепропресс» (г. Днепр, Украина) с операциями «осадка», «формовка», «прошивка»;

– кольце-раскатной установки КПС 250 производства Старокраматорского машиностроительного завода (Украина).

Основное внимание при исследовании было уделено двум первым участкам, являющимся основными источниками потерь электроэнергии.



а

б

Рис. 1. Общий вид ковочной линии Л-408:

а – старой; *б* – модернизированной

Таких линий на заводе – шесть и они являются крупнейшими потребителями электроэнергии как на участках индукционного нагрева, так и на насосной гидравлической станции, обеспечивающей работу всех прессов. Сам завод и, соответственно, ковочный цех, создавались под массовое производство небольшой номенклатуры колец подшипников и в силу этого линии были объединены в систему с едиными электро- и гидростанциями, обеспечивающими работу всех ковочных линий.

По результатам *технического аудита*, проведенного ОИЦ УПЭК, выявлено, что в современной рыночной ситуации, характеризующейся гораздо большей номенклатурой типов колец подшипников, но меньшими объемами производимых партий каждого типа, такая конфигурация оборудования приводит к огромным неоправданным затратам электроэнергии.

Также выявлено, что КИН 750 был произведен на устаревшей аппаратной базе, с питанием от электромашинного преобразователя в отличие от современных систем, работающих на полупроводниковой базе. Электромашинный преобразователь обеспечивающий преобразование электроэнергии из заводской электросети в силовой сигнал частотой до 1.000 Гц уже за счет самого своего электромеханического принципа работы имеет дополнительные механические потери и, как следствие, заведомо более низкий КПД (не более 90–94 %). Кроме того, принципиальное отсутствие

возможностей управления мощностью и частотой в процессе разогрева не дает возможности оптимизировать процесс по затратам электроэнергии. Это приводит к дополнительным потерям, оценить которые можно только спроектировав КИН (установки индукционного разогрева) на новой элементной базе с современной системой управления на базе ПЛК (программируемого логического контроллера) и проведя такое сравнение сначала путем математического, а затем, натурального, физического моделирования.

В результате технического аудита гидравлического прессы П-2038А установлено, что прессы всех шести линий работают от одной гидравлической насосной станции. Это провоцирует ее заведомо неэффективную работу при задействовании лишь части линий, а иногда и вовсе одной линии.

Помимо этого, принцип работы прессы П-2038А в отсутствие системы управления гидравлическим давлением в исполнительных органах прессы не позволяет реализоваться оптимальное управление гидронасосами по критерию минимума потребляемой электроэнергии.

3. Цель и задачи исследования

Целью данного исследования является разработка проекта глубокой модернизации ковочной линии, опирающаяся на математическое моделирование и оптимизацию процессов индукционного нагрева и ковочных операций.

Для решения поставленной цели необходимо решить такие задачи:

1. Разработка математической модели индукционного нагрева заготовок, а также операций осадки, формовки и прошивки.
2. Разработка принципиальной конструкции модернизированной линии.
3. Оптимизация технологических режимов на математических моделях и натуральных экспериментах.

4. Исследования существующих решений проблемы

Индукционный нагрев, использующий индукционное взаимодействие электромагнитного поля токов высокой и средней частоты с металлической заготовкой, известен и применяется в промышленности уже более 100 лет для индукционного нагрева, индукционной плавки, индукционной закалки и индукционной сварки металлов. Основы инженерных расчетов систем индукционного нагрева достаточно обстоятельно изложены в [1]. Количественному и качественному описанию взаимодействия физических процессов, происходящих в заготовке из ферромагнитной стали, приводящих в конечном счете к ее нагреву в большей мере посвящена работа [2]. В работе [3] системно рассматривается уточненное математическое моделирование индукционного нагрева на базе метода конечных элементов, включая специфические вопросы применения комплекса ANSYS при моделировании процессов индукционного нагрева и индукционной закалки. Исследование [4] уточняет поведение углеродистых сталей при моделировании индукционной закалки. В [5] приведены результаты тестового исследования индукционного нагрева цилиндрической заготовки подшипникового кольца на базе метода конечных элементов во взаимосвязи уравнений Максвелла и задачи

теплопроводности. Аналогичная математическая модель взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов для осесимметричных заготовок рассмотрена в [6]. В работе [7] рассматриваются специфические вопросы моделирования поверхностной индукционной закалки токами высокой частоты. Метод конечных элементов – несомненно основной инструмент численного моделирования технологии индукционной закалки, но не единственный. Так, в работе [8] особенности численного моделирования процессов индукционной закалки для двумерных осесимметричных заготовок (цилиндрические объекты) рассмотрен с помощью метода граничных элементов (BEM).

В работе [9] приводится методика оценки и оптимизации ковочного процесса с использованием современных компьютерных средств разработки модели изделия, сопутствующей оснастки, а также последующего моделирования и анализа процессов деформации. Вопросы моделирования методами конечных элементов процессов как холодной, так и горячей штамповки довольно полно изложены в [10]. Постановка связанной задачи индукционного нагрева и пластического деформирования цилиндрической заготовки рассмотрена авторами работы [11]. Математическое моделирование обработки давлением осесимметричных (цилиндрических) деталей при трехэтапной формовке рассматривается в [12]. Методика моделирования износа штамповой оснастки с учетом термического воздействия на материал штампа описана в работе [13]. Дополнительно анализ термомеханических деформаций штамповочной оснастки при горячей штамповке рассматривается в работе [14]. Работа [15] затрагивает вопросы математического моделирования оптимальной конструкции гидравлического пресса с учетом переменных нагрузок.

Таким образом, проведенный анализ позволяет сделать вывод, что метод конечных элементов применим для моделирования процесса индукционного нагрева цилиндрических заготовок. А также может быть использован для моделирования процессов пластической деформации при горячей штамповке. Также можно сказать, что имеется ряд работ по математическому моделированию оптимальной конструкции гидравлических прессов, но при этом отсутствуют научные работы, объединяющие в себе моделирование всего процесса изготовления поковки кольца с целью последующей оптимизации.

5. Методы исследования

Основным методом математического моделирования индукционного нагрева заготовки, а также ковочных операций избран метод конечных элементов.

5.1. Математическое моделирование индукционного разогрева заготовки

Основная задача установки индукционного нагрева состоит в разогреве заготовки кольца до температуры необходимой и достаточной для совершения ковочных операций в прессе. Эта целевая температура по многолетнему опыту эксплуатации существующих ковочных линий должна быть не ниже 1120 °С, иначе формовочная операция не будет качественной и кольцо потеряет

температуру перед установкой горячей раскатки. В то же время эта температура не может быть выше 1180 °С, поскольку с учетом нестабильности разогрева это может привести к необратимым металлургическим изменениям структуры стали (пережогу). Нестабильность температуры от заготовки к заготовке не должна превышать ±20 °С. А неравномерность разогрева самой заготовки по объему материала (между наружными слоями и сердцевиной) не должна превышать 50 °С.

Мульти-физическая математическая модель, принятая при моделировании индукционного нагрева цилиндрической заготовки, состоит из взаимосвязанных систем уравнений Максвелла для описания электромагнитного поля и нестационарных уравнений теплопроводности Фурье с соответствующими граничными и начальными условиями:

$$\operatorname{rot}H = \sigma(H)E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t}; \quad (1)$$

$$\operatorname{rot}E = -\frac{\partial B}{\partial t} = -\mu(T) \frac{\partial H}{\partial t}; \quad (2)$$

$$j = \sigma(T)E + \frac{\partial D}{\partial t}; \quad (3)$$

$$\rho C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda(T) \operatorname{grad}T) + Q(t) + p(t), \quad (4)$$

где H – напряженность магнитного поля; E – напряженность электрического поля; B – магнитная индукция; J – плотность тока; D – электрическая индукция; $\sigma(T)$ – электрическая проводимость, $\mu(T)$ – магнитная проницаемость, $C(T)$ – теплоемкость и $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности металла, в свою очередь нелинейно зависящие от температуры T .

Распределение плотности тока j_r по радиусу (глубине) принято в виде:

$$j_r = j_0 e^{kr}, \quad (5)$$

а глубина проникновения электромагнитного излучения δ (глубина скин-слоя) определяется как:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\rho_e}{\omega\mu_0\mu}}, \quad (6)$$

где ω – угловая частота; ρ_e – удельное сопротивление материала заготовки; μ_0 – проницаемость вакуума; μ – удельная проницаемость материала заготовки.

Распределение плотности источников тепла описывается формулой:

$$p(t) = \sigma(T) E^2(t) = \frac{1}{\sigma(T)} j^2(t). \quad (7)$$

Дополнительное выделение теплоты в углеродистых сталях происходит при трансформации структуры материала из перлитной в аустенитную, при этом плотность источников которой можно определить как:

$$Q = \rho L \frac{\partial \psi}{\partial t}, \quad (8)$$

где ρ – плотность; L – объемная плотность источника тепла; ψ – объемная доля превращенного аустенита.

Граничные условия теплообмена на цилиндрической поверхности заготовки приняты в виде:

$$\pm \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{пов}} = \alpha_k (T_{\text{пов}} - T_{\text{ср}}) + \sigma_b (T_{\text{пов}}^4 - T_{\text{ср}}^4), \quad (9)$$

где α_k – коэффициент конвективного теплообмена; σ_b – коэффициент теплоотдачи излучением; $T_{\text{пов}}$ – температура поверхности; $T_{\text{ср}}$ – температура окружающей среды

Ранее [5] были выполнены тестовые конечно-элементные (КЭ) расчеты и оптимизация режимов индукционного нагрева цилиндрической заготовки из стали ШХ15 длиной $L=190$ мм и радиусом $r=50$ мм двухсекционным цилиндрическим индуктором с частотой тока $f=800$ Гц. Математическая модель заготовки включала более 60.000 конечных элементов. На рис. 2 приведены использованные в расчете графики зависимостей физических характеристик стали ШХ15 от температуры. На рис. 3 приведена расчетная КЭ-схема индуктора с заготовкой.

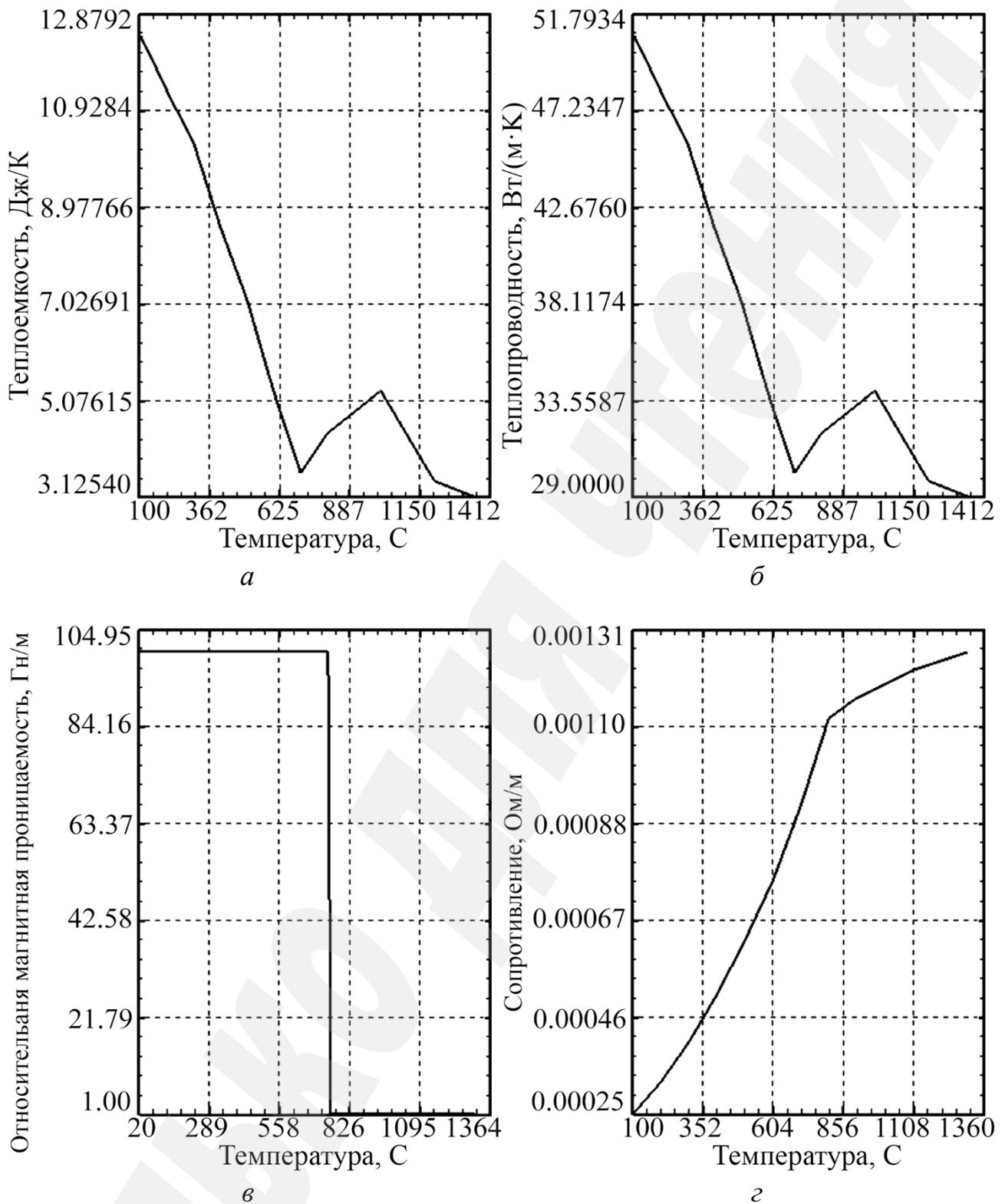


Рис. 2. Зависимости физических характеристик стали ШХ15 от температуры:
a – теплоемкость; *б* – теплопроводность; *в* – относительная магнитная проницаемость; *г* – сопротивление

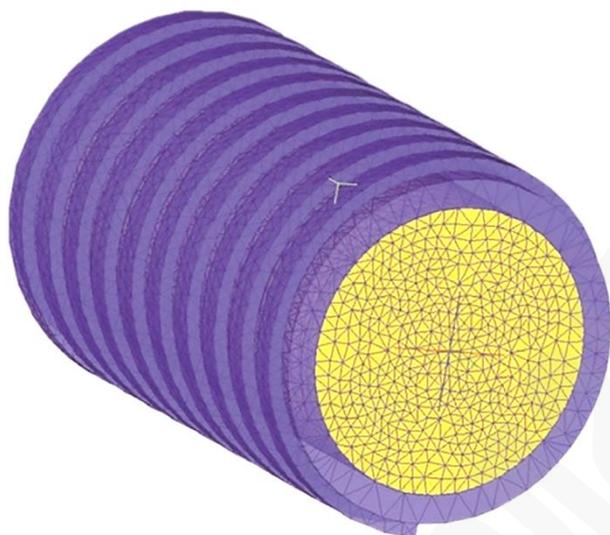


Рис. 3. Конечно-элементная модель индуктора с заготовкой

В результате тестовых расчетов (рис. 4) обнаружилось, что максимальная температура нагрева образуется не на поверхности заготовки, а на ее подповерхностных слоях. Это связано с отводом тепла с внешней ее поверхности (граничные условия отражают модель лучистого и конвективного теплообмена с воздухом на всех поверхностях заготовки). Поскольку контроль нагрева в будущей автоматической системе будет вестись пирометрами, измеряющими температуру на поверхности заготовки, этот эффект может привести к ошибочному перегреву внутренних слоев стали, что должно быть учтено при программировании системы управления КИН.

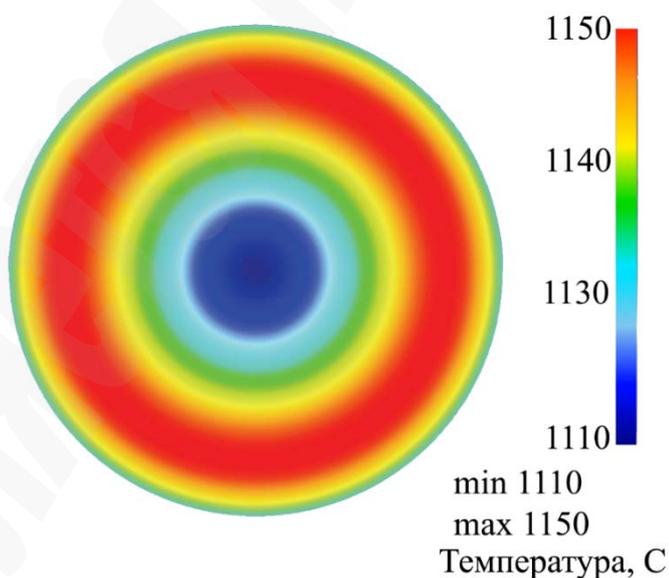


Рис. 4. Результаты модельных расчетов

Для перехода к последующей технологической операции – штамповке кольца необходимо решить задачу остывания заготовки в виде нестационарной задачи теплопроводности с учетом полученного после нагрева температурного поля. На рис. 5 приведено температурное поле заготовки после остывания в

течении $t=5$ с, которые представляют собой среднее время поступления заготовки от установки индукционного разогрева (КИН) до первой ковочной операции в прессе (прошивка).

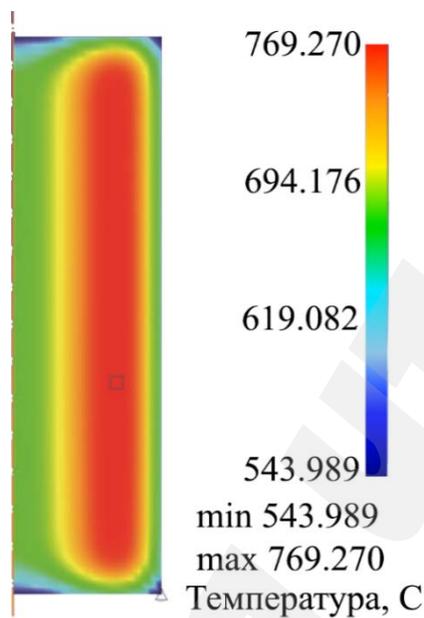


Рис. 5. Температурное поле заготовки после остывания в течение 5 сек

5.2. Математическое моделирование объемной штамповки заготовки

Для анализа технологического процесса объемной штамповки подшипникового кольца была использована математическая модель связанной нелинейной термо-вязко-пластической контактной задачи, учитывающая нелинейные физические и геометрические связи (с учетом больших деформаций и скоростей деформаций):

$$\begin{aligned} \dot{\rho} &= -\frac{\partial v_i}{\partial x_i}, \\ \rho \dot{e} &= \sigma_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \rho r - \frac{\partial q_i}{\partial x_j}, \\ \rho \dot{v}_i &= \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i^B, \end{aligned} \tag{10}$$

где ρ , $\dot{\rho}$ – плотность и скорость изменения плотности; v_i , \dot{v}_i – скорость и ускорение; $e=e(\rho, T)$ – удельная внутренняя энергия; σ_{ij} – тензор напряжений; r – внутренние распределенные источники тепла; q_i – компоненты вектора теплового потока; f_i^B – составляющие вектора объемных сил; T – температура.

При этом физические уравнения приняты в виде:

$$\begin{aligned}\sigma_{ij}^T &= C_{ijkl} D_{kl}, \\ \sigma_{ij}^T &= \sigma_{ij} + \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \sigma_{ij} - \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \sigma_{jk} - \frac{\partial v_j}{\partial x_k} \sigma_{ik}, \\ D_{kl} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_k}{\partial x_l} + \frac{\partial v_l}{\partial x_k} \right),\end{aligned}\quad (11)$$

где σ_{ij} – тензор скоростей напряжений; C_{ijkl} – тензор физического закона «напряжения-деформации»; D_{kl} – тензор скоростей деформаций при больших пластических деформациях, включающий пластическую и температурную составляющие:

$$D_{ij} = D_{ij}^p + D_{ij}^T, \quad (12)$$

При этом пластическое деформирование описывается теорией течения в скоростной форме:

$$D_{ij}^p = \lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (13)$$

где λ – параметр пластичности; F – пластический потенциал, определяемый при расчетах как:

$$F(\sigma_{ij}, \sigma_y) = f(\sigma_{ij}) - \sigma_y, \quad (14)$$

где σ_y – функциональная зависимость для текущего предела текучести; $f(\sigma_{ij})$ – функция пластичности. Естественно, учитывалась зависимость физико-механических свойств материала от уровня температур и скоростей деформаций, характерная для высокоскоростного и высокотемпературного деформирования.

Решение контактной задачи осуществлялось с учетом проскальзывания:

$$\begin{aligned}|\tau_i| &\leq \mu_s |p_n| \\ f_{cn}^I &= H^I f_{cn}^K, \\ f_{cn}^J &= H^J f_{cn}^K,\end{aligned}\quad (15)$$

где $p_n = \sigma_n = f_{cn}$ – контактное давление, а $\tau_i = f_{ct}$ – касательное усилие в точке контакта; μ_s – коэффициент трения.

Разумеется, параллельно решается взаимосвязанная задача нестационарной теплопроводности с соответствующими граничными условиями конвективного

теплообмена на свободных поверхностях матрицы и учетом контактного теплообмена в зонах контакта заготовка-матрица и пуансон-заготовка.

Ранее, для верификации модели были проведены тестовые расчеты с применением метода Ньютона-Рафсона для решения во времени перечисленных взаимосвязанных нелинейных уравнений.

Заготовка после моделирования индукционного нагрева с распределением температур, приведенном на рис. 6, поступает на первую ковочную операцию (осадка), в результате моделирования которой образуется «блин» с распределением температур, приведенном на рис. 6, *а*. На рис. 6, *б* представлен результат аналогичного расчета, но для виртуальной заготовки с равномерным распределением температуры $T=1140$ °С.

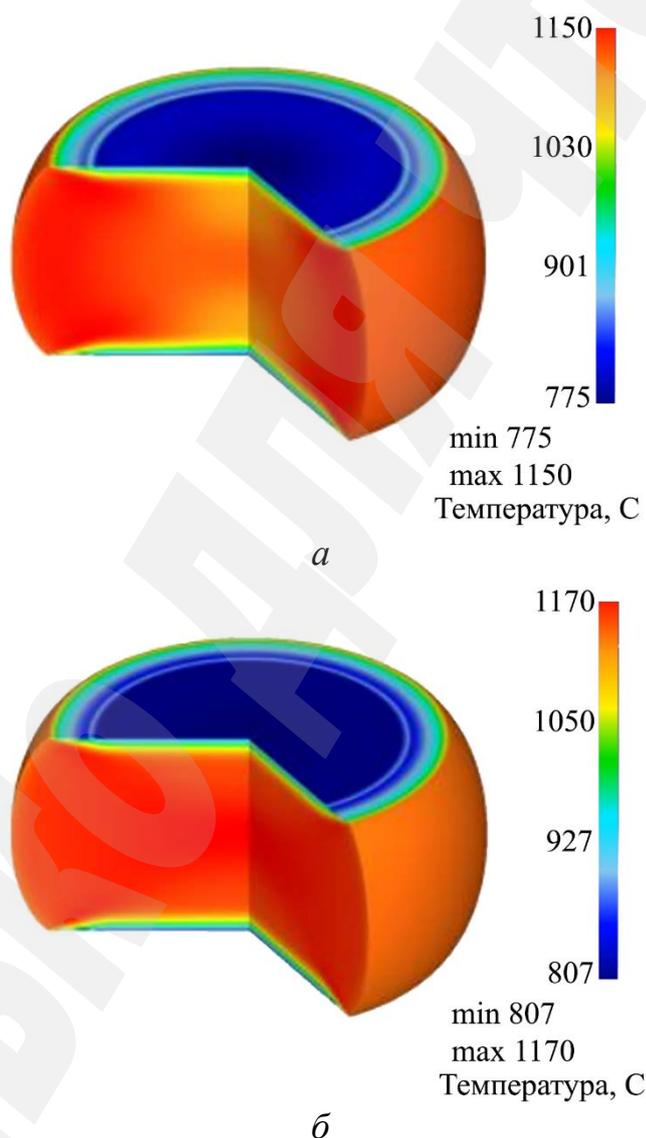


Рис. 6. Распределение температурного поля в заготовке после осадки:

а – предварительное неравномерное распределение температур;

б – предварительное постоянное распределение температур

Также было проведено моделирование изменения во времени усилия, необходимого при формовке в зависимости от различной картины

распределения температур по объему заготовки после индукционного нагрева. Результаты сравнения тестовых расчетов с замерами свидетельствуют о расхождении с экспериментом не более ± 15 °С по температурному полю (что составляет около 1 % ошибки на фоне максимальных температур в диапазоне 1140–1190 °С) и расхождении в ± 3 % по усилию в прессе на главном ковочном этапе формовки в прессе. Результаты тестовых расчетов и их сравнения с натурным экспериментом позволяют считать математические КЭ-модели и применяемые численные методы адекватными для проведения с их помощью оптимизации конструктивных параметров и технологических режимов.

6. Результаты исследований

Для разработки проекта модернизации и последующего изготовления компонентов новой ковочной линии ОИЦ УПЭК был проведен тендер среди производителей индукционных систем нагрева, а также гидравлического оборудования и систем управления для модернизации прессов. Этот тендер выиграли две чешские компании: Roboterm spol. s.r.o. и Hydroma, spol. s.r.o., которые предложили свои проекты нового оборудования, базирующиеся на проведенных в работе моделировании и предварительных расчетах. Уточненные расчеты выполнялись по уже разработанным названными компаниями конструкциям. На рис. 7 приведена трехмерная твердотельная модель линии в сборе, разработанная совместно с фирмами Roboterm и Hydroma. На рис. 8 представлен сборочный чертеж новой линии индукционного нагрева Roboterm.

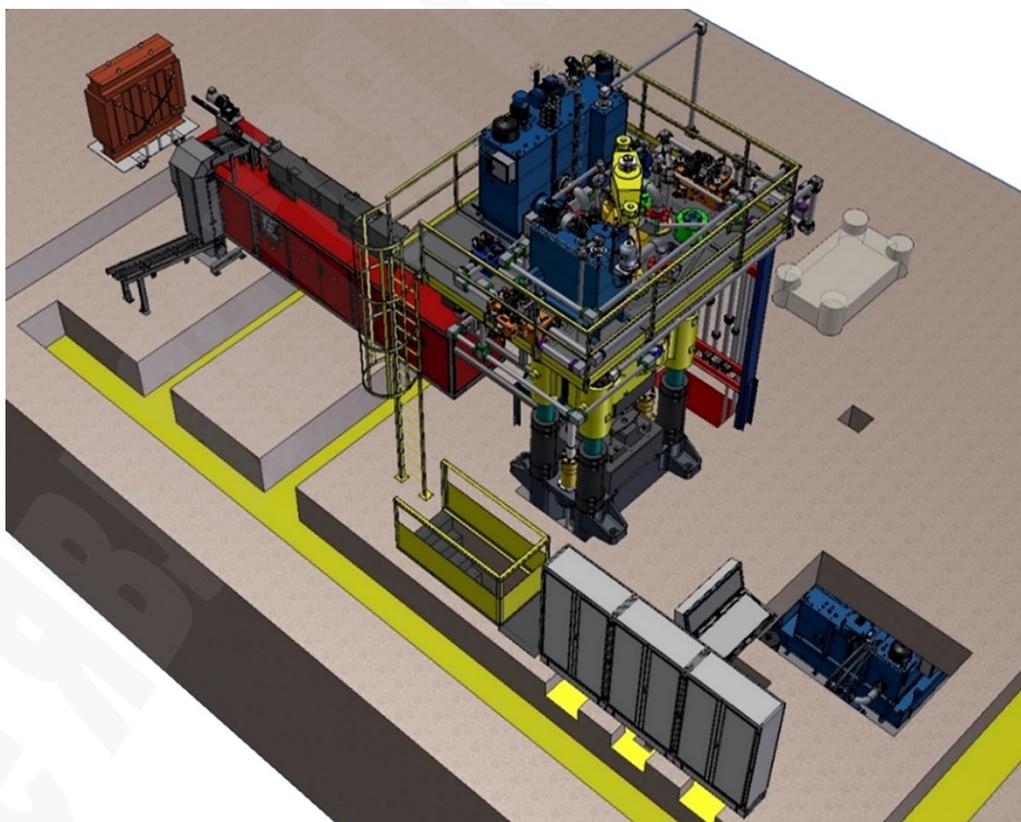


Рис. 7. Трехмерная твердотельная модель линии в сборе

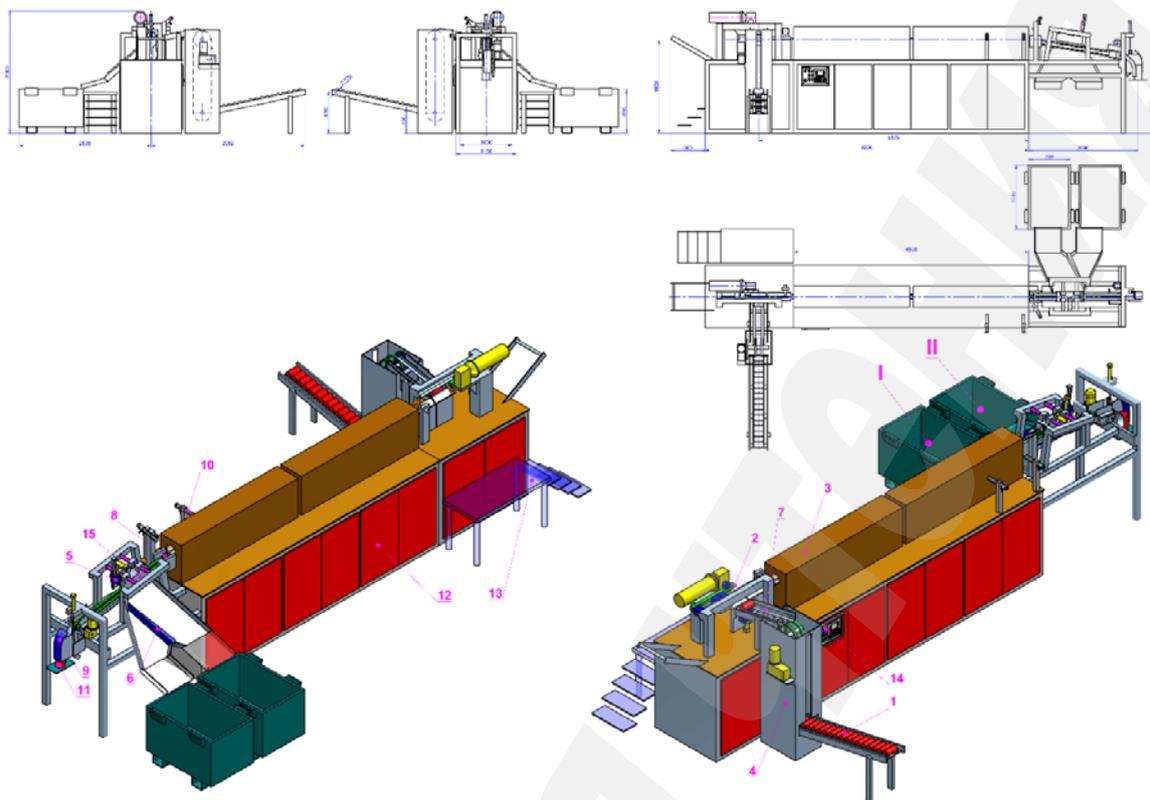


Рис. 8. Сборочный чертеж новой линии индукционного нагрева Roboterm:
 1 – входной приемник; 2 – толкатель; 3 – индуктор; 4 – вертикальный конвейер;
 5 – ограничитель; 6 – сортировщик; 7 – соединительный приемник;
 8 – выходной ролик; 9 – подъемная шторка; 10 – пирометры; 11 – место
 выгрузки заготовок; 12 – корпус нагревателя; 13 – платформа для
 обслуживания; 14 – управляющая панель; 15 – рычаг

В конце двухсекционного индуктора в качестве обратной связи находятся два датчика температуры (пирометра), предназначенные для корректировки мощности индуктора, и третий датчик, предназначенный для отбраковки колец по типу пережога или, наоборот, недогрева. В результате работы системы управления с обратной связью и жестко-настроенным регулятором реальная картина управления мощностью выглядела нерегулярной (рис. 9).

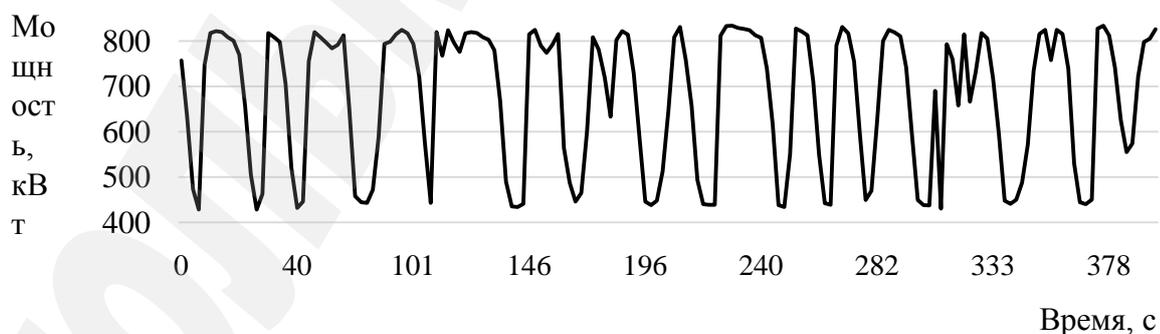
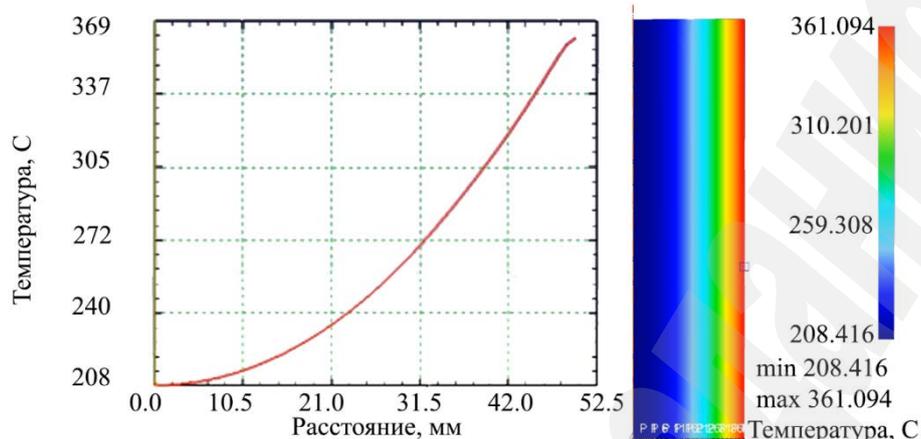
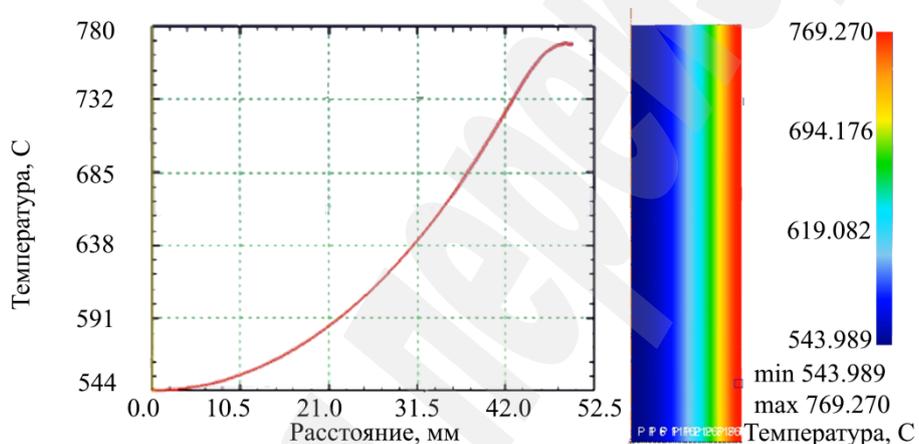


Рис. 9. График управления индуктором

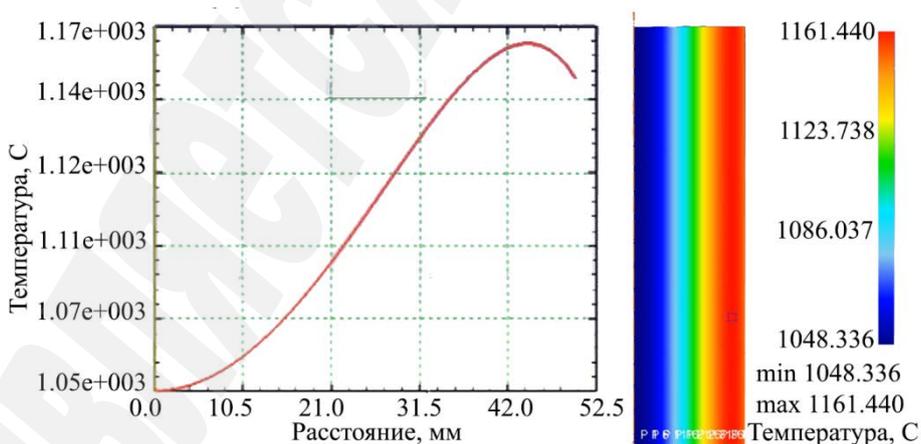
Задавая график на рис. 9 изменения мощности индуктора, расчетным путем была смоделирована динамика нагрева заготовки (рис. 10).



a



б



в

Рис. 10. Распределение температур в заготовке (график изменения температуры по радиусу и поле температур): *a* – пройдено 25 % индуктора; *б* – пройдено 50 % индуктора; *в* – заготовка в конце индуктора

За отрезки времени падения мощности индуктора до минимальных значений тепло успевает проникнуть вглубь заготовки с периферийных слоев, которые в

свою очередь успевают охладиться, отдавая тепло внутренним слоям материала и на воздух за счет конвективного и радиационного теплообмена. Была проведена 4-х параметрическая оптимизация управления индуктором. Варьировались значения максимальной и минимальной мощности и длительности их удержания. В качестве критерия оптимизации прямо условия минимума потребляемой мощности. Функциональные ограничения – значение температуры на цилиндрической поверхности заготовки равно 1160 ± 10 °С, значение температуры в ядре заготовки равно 1080 ± 10 °С, разброс температур от заготовки к заготовке не более ± 20 °С. В результате был получен график оптимального периодического управления индуктором, представленный на рис. 11 и обеспечивший картину распределения температур, представленную на рис. 12.



Рис.11. График оптимального периодического управления индуктором

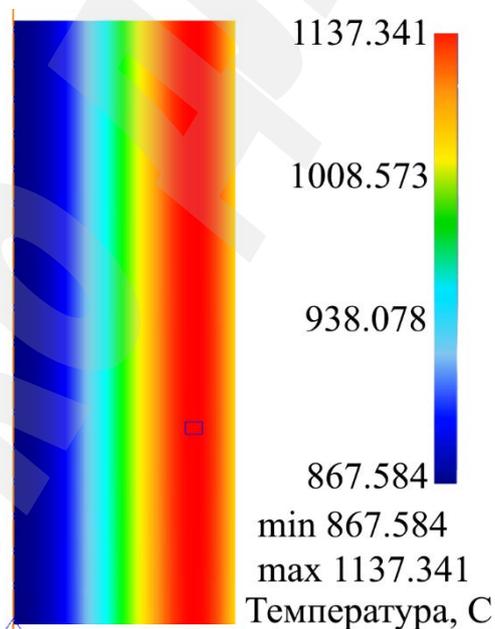


Рис. 12. Картина распределения температур

На рис. 13 представлена трехмерная твердотельная модель модернизированного гидравлического пресса, разработанного совместно с компанией Hydroma.

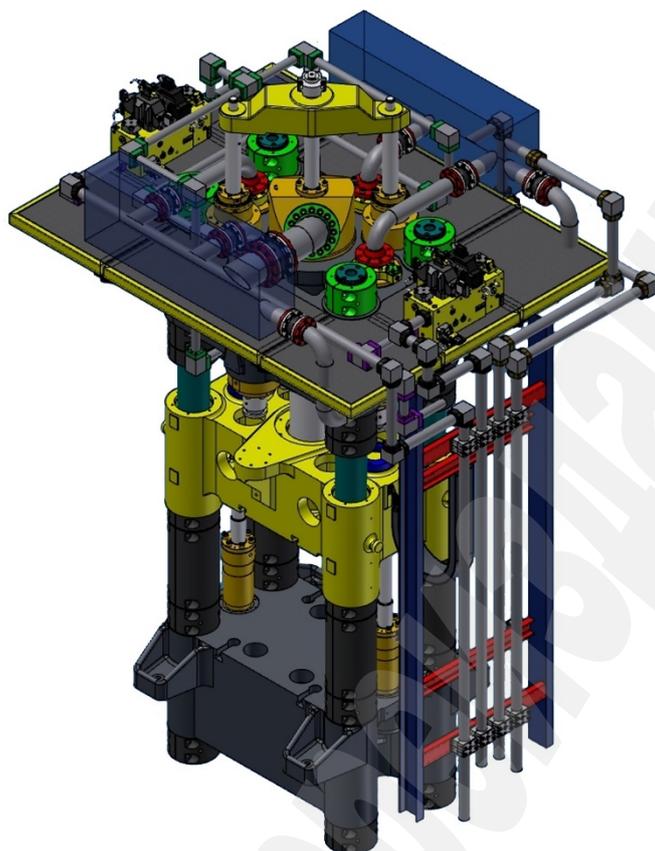


Рис. 13. Трехмерная твердотельная модель модернизированного гидравлического пресса, разработанного совместно с компанией Hydroma.

Новая система (рис. 14) использует гравитационную силу свободного падения траверсы (free fall downstroke), которая позволяет существенно выиграть в потреблении суммарной энергии на всех ковочных операциях (осадка, формовка, прошивка), но прежде всего на совмещенных операциях – осадки и прошивки.

В холостом режиме пресс работает при минимальном потреблении энергии. Скорость холостого хода настраивается с помощью управляющих гидравлических клапанов. Скоростью задвиги цилиндров HV2 и HV3 обеспечивается также торможение внутреннего ползуна.

Максимальная скорость холостого хода траверсы и внутреннего ползуна «приближена» к скорости свободного падения. Когда кинетическая энергия «падающего» внутреннего ползуна HV1 исчерпывается, клапаны переключаются и включается гидравлический насос для завершения операции формовки.

Аналогично и движение траверсы для совмещенных операций «осадка» и «прошивка» начинается с помощью кинетической энергии свободного падения траверсы. Открытием клапана обеспечивается всасывание гидравлического масла из дополнительного бака, расположенного над прессом, в гидравлические цилиндры HV4+HV5+HV6+HV7. У гидравлических цилиндров HV8 и HV9 управлением спускаем гидравлическое масло в бак. Скорость движения определена настройкой гидравлических клапанов.

Когда кинетическая энергия падения траверсы исчерпывается, о чем свидетельствует датчик скорости, у гидравлических цилиндров

HV4+HV5+HV6+HV7 при закрытии клапана наполнения одновременно включается насос, обеспечивая подачу гидравлического масла и, соответственно, обеспечивая необходимое давление.

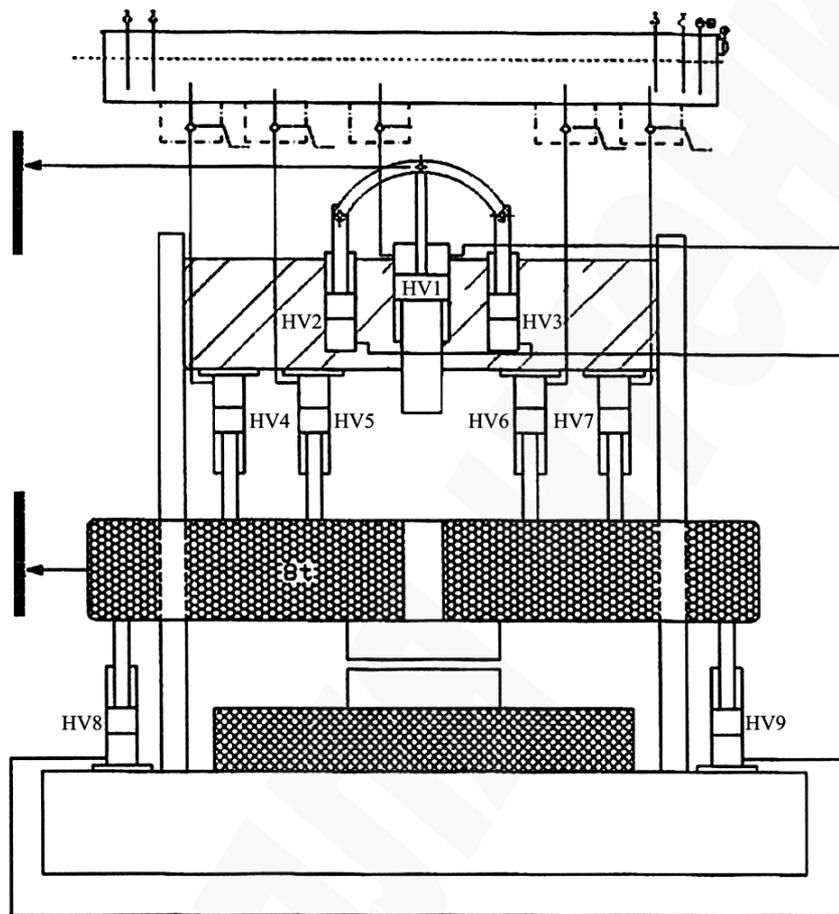


Рис. 14. Гидравлическая схема прессы

На рис. 15 приведены результаты моделирования двух первых ковочных операций (осадка и формовка) в виде графика «усилие – время». На рис. 15, б–е изображены расчеты формы заготовки во время разных фаз пластического деформирования – от стартового состояния заготовки до начала приложения усилия (рис. 15, б) до близкого к завершению формовки (рис. 15, е).

Установлено, что разогрев, обеспечиваемый КИН Roboterm с температурой поверхности 1120 °С и еще более, чем на 100 °С более холодным «ядром» заготовки дает неприемлемую картину формовки с браком «недоформовки» в верхних углах пресс-формы. На рис. 16 представлены результаты недоформовки заготовки:

– для нагрева КИН Roboterm и штатного усилия прессы Hydroma при формовке до 600 т (рис. 16, а);

– для «идеального» прогрева заготовки до 1160 °С по всему ее объему и максимального усилия в 600 т (рис. 16, б);

– для «идеального» прогрева заготовки до 1160 °С по всему ее объему и форсированного усилия в 730 т (рис. 16, в).

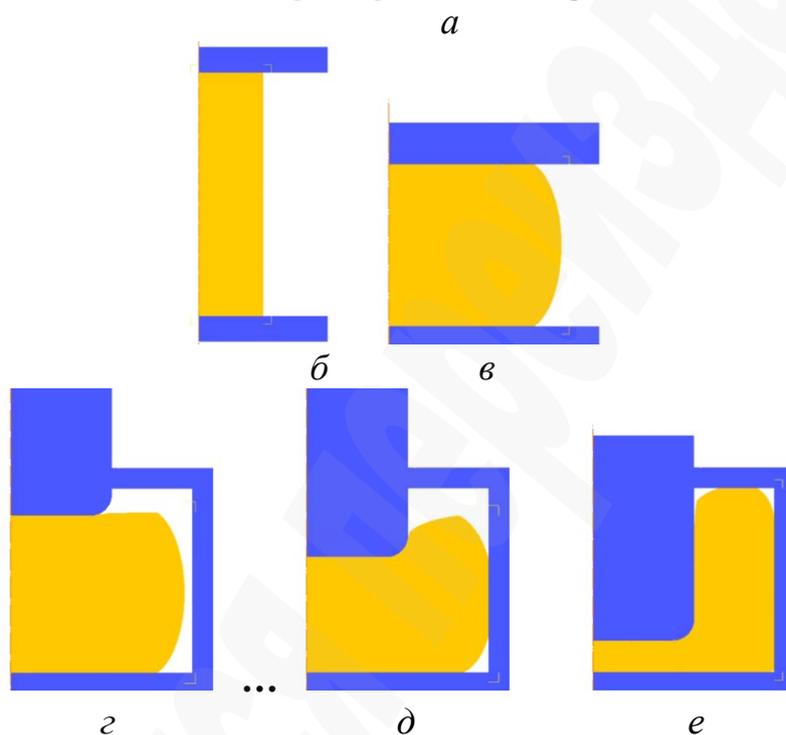
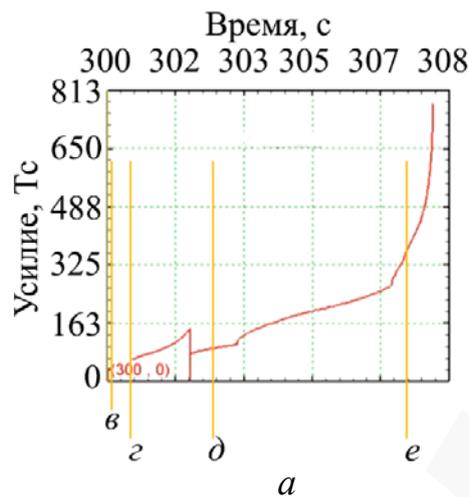


Рис. 15. Результаты моделирования двух первых ковочных операций (осадка и формовка) в виде графика «усилие – время»: *а* – зависимость усилия, развиваемого прессом от времени; *б–е* – формы заготовки во время разных фаз пластического деформирования

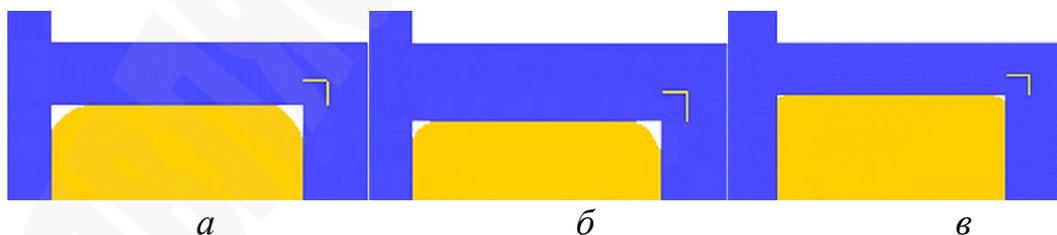


Рис. 16. Результаты недоформовки заготовки: *а* – для нагрева установки индукционного разогрева и при формовке до 600 т; *б* – для прогрева до 1160 °С и усилия в 600 т; *в* – для прогрева до 1160 °С и усилия в 730 т

На рис. 17 представлена картина остывания заготовки во время выполнения трех последовательных ковочных операций.

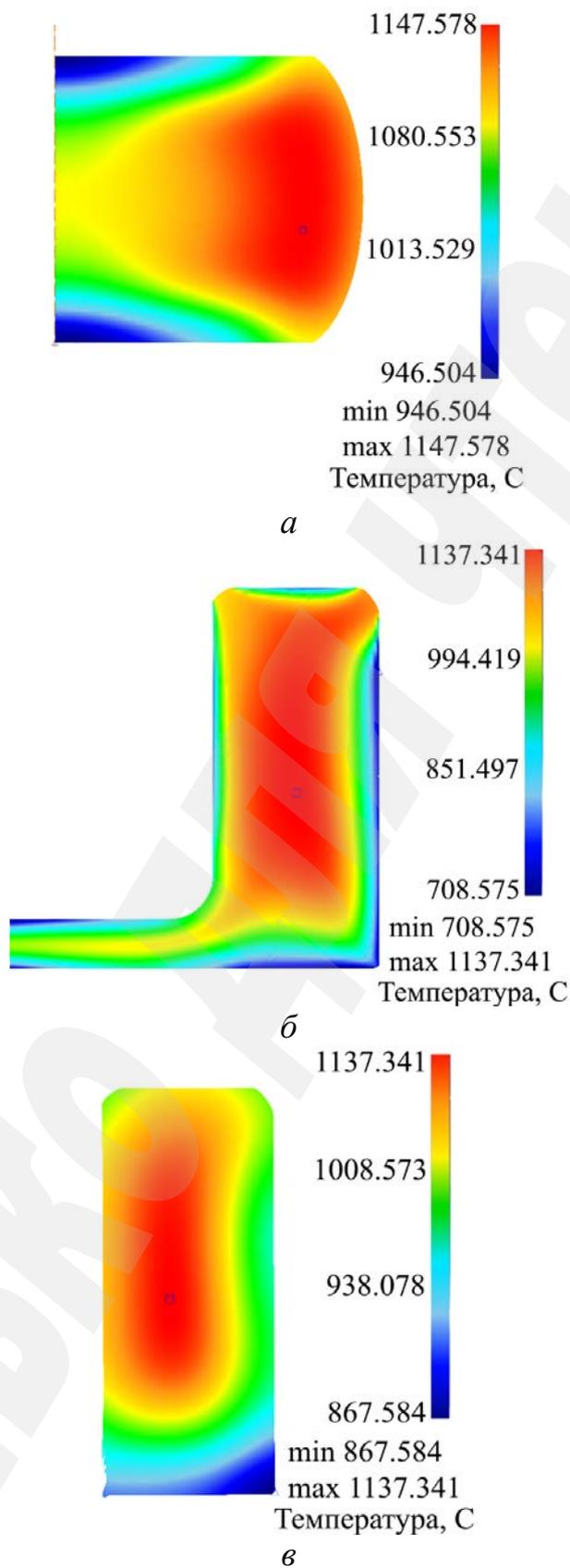


Рис. 17. Результаты остывание заготовки во время выполнения ковочных операций: *a* – осадка, *б* – формовка, *в* – прошивка

Как видно из приведенных выше результатов остывания заготовки, максимальная температура заготовки после штамповки составляет 1137 °С, минимальная – 708 °С, что является приемлемым результатом. Следовательно, расчетного прогрева заготовки до 1160 °С достаточно для выполнения всего цикла формовочных операций.

7. SWOT-анализ результатов исследования

Strengths. В результате проведенного исследования, включающего математическое моделирование, конструктивное 3-х мерное проектирование, изготовление и большой цикл тестовых и натуральных экспериментов можно утверждать, что вновь разработанное оборудование имеет такие сильные стороны:

1. Система индукционного нагрева КИН Roboterm обладает увеличенным КПД по сравнению с существовавшей ранее линией индукционного нагрева КИН 750, поскольку выполнена на современной элементной базе и оснащена электронным тиристорным преобразователем энергии вместо электромеханического.

2. Тиристорный преобразователь в силу своего устройства автоматически настраивается на резонансную частоту индуктора, что сильно уменьшает реактивную составляющую мощности, и таким образом уменьшается расход электроэнергии.

3. Система управления на базе ПЛК предоставляет возможность программного управления мощностью нагрева в широких пределах.

4. Выполненная модернизация прессы с автономной насосной станцией мощностью 132 КВт (вместо центральной станции мощностью 900 КВт), а также использование кинетической энергии ползуна и траверс дает радикальное снижение энергопотребления. Особенно в условиях работы нескольких или тем более одной из шести ковочных линий Л-408.

Weaknesses. Однако, новое оборудование обладает и рядом недостатков, среди которых наиболее важные:

1. Выполненный из двух равных по длине половин индуктор управляется единой системой управления. Таким образом, КИН не имеет возможности задавать различную мощность нагрева в половинах, как это сделано в оборудовании с ускоренным нагревом. Эта особенность конструкции не позволяет получить максимальный эффект по экономии потребляемой электроэнергии и равномерности прогрева заготовки;

2. Регулятор системы управления настроен фирмой Roboterm таким образом, что корректно «отрабатывает» только поддержание стабильности нагрева наружного слоя заготовок на уровне 1120 ± 20 °С. Это недостаточно для работы прессы без брака из-за недоформовки и последующей качественной горячей раскатки.

3. В результате математического моделирования доказано, что мощности одного гидронасоса на этапе формовки недостаточно для качественного завершения всех трех ковочных операций с суммарным циклом 18 с. На многих заготовках остаются недоформованными верхние края. Кроме того, более длительное, чем нужно согласно целевой циклограмме, пребывание заготовки в форме приводит к ее остыванию и браку на последующем этапе раскатки.

Opportunities. В качестве задач для дальнейших исследований, которые позволят улучшить производительность линии и повысить качество производимой продукции, можно выделить 2 направления:

1. Настройка существующей системы управления КИН для максимального приближения к целевым показателям температуры поверхности 1170 ± 15 °С, температуры ядра не менее 1120 °С, времени цикла 15 с. Приведенное изменение настроек системы управления КИН позволит сократить процент недоформованных из-за недогрева заготовок.

2. Настройка системы управления пресса таким образом, чтобы обеспечить быстрый рост усилия формовки в течение последних 1–1,5 с этапа формовки. Таким способом возможно добиться соответствия времени пребывания заготовки в форме, необходимой согласно целевой циклограммы значению. И следовательно, уменьшить процент брака из-за недогрева на последующей операции раскатки.

Наилучших показателей по энергоэффективности, производительности и качеству производимой продукции можно добиться путем модернизации разработанного оборудования. Для установки индукционного нагрева она состоит во внедрении отдельного управления половинами индуктора, как это сделано в установках с ускоренным нагревом, производящихся фирмами ISR, Inductoheat, GH Induction, EFD и другими. Для пресса модернизация состоит в установке дополнительного гидронасоса и гидроаккумулятора (бустера), увеличивающих усилие пресса на конечном этапе формовки. Описанные мероприятия потребуют существенных инвестиций, что значительно увеличит цену типовой модернизации ковочных линий Л-408, поэтому проведение модернизации должно предваряться анализом целесообразности и эффективности проведения приведенных выше работ.

Threats. Авторы данной работы предполагают, что суммарная стоимость старого оборудования и работ по модернизации станет выше стоимости покупки полностью нового оборудования с высокими показателями энергоэффективности, производительности и качества продукции. В этом случае придется признать проект модернизации ковочной линии экономически нецелесообразным.

8. Выводы

1. Для моделирования индукционного нагрева была использована математическая модель индукционного нагрева, состоящая из систем уравнения Максвелла для описания электромагнитного поля и нестационарных уравнений теплопроводности Фурье. На ее базе создана имитационная конечно-элементная модель заготовки из стали ШХ15 длиной 190 мм и радиусом 50 мм, помещенной в двухсекционный индуктор с частотой тока в нем 800 Гц. Проведено моделирование нагрева, получено распределение температур внутри заготовки. Обнаружено, что после окончания операции нагрева участки с максимальной температурой расположены не на поверхности заготовки, а на ее подповерхностных слоях, разница температур самой горячей точки и поверхности достигает 18 °С. Разница температур между поверхностью и ядром

заготовки составила 65 °С. Для моделирования операции штамповки кольца использована математическая модель связанной нелинейной термо-вязко-пластической задачи, учитывающая нелинейные физические и геометрические связи. Было проведено имитационное моделирование ковочных операций заготовки, имеющей определенное ранее распределение температур по объему. В результате моделирования получены распределение температуры заготовки после ковочных операций, зависимости необходимых для формовки усилий пресса от различных распределений температуры заготовки после нагрева. По результатам моделирования определена целевая циклограмма работы пресса.

2. По результатам расчетов и моделирования ОИЦ УПЭК совместно с фирмами Roboterm spol. s.r.o. и Hydroma, spol. s.r.o. были разработаны конструкции новой установки индукционного нагрева KSO 1200/1,2-A30 мощностью 1200 кВт и модернизированного пресса П-2038А. Обе установки получили современную систему управления на базе ПЛК с необходимым набором датчиков и исполнительных механизмов. Разработанные твердотельные модели оборудования позволили быстро скомпоновать линию из нового и существующего оборудования линии.

3. В работе проведена серия имитационных и натуральных экспериментов индукционного нагрева и штамповки заготовки. После сравнения результатов получено расхождение по температурному полю не более ± 15 °С (что составляет около 1 % ошибки). По усилиям в прессе на главном ковочном этапе формовки получено расхождение в ± 3 %. Проведена 4-х параметрическая оптимизация управления индуктором, в качестве критерия оптимизации принято условия минимума потребляемой мощности, получен оптимальный график управления мощностью нагрева. Обнаружено, что после нагрева заготовки КИНОм фирмы Roboterm температура поверхности составляет ≈ 1160 °С, разница температур между ядром и поверхностью достигает 90 °С. Установлено, что разница температур между ядром и поверхностью заготовки порядка 100 °С и более приводит к неприемлемой картине формовки с браком «недоформовки» в верхних углах пресс-формы.

Как следует из результатов SWOT-анализа, на настоящий момент не все целевые показатели модернизации достигнуты текущими версиями КИН Roboterm и гидросистемой пресса Hydroma.

Благодарности

Авторы признательны г-ну Рихарду Фойтику за помощь в проведении экспериментов.

Литература

1. Nemkov, V. S., Demidovich, V. B. (1988). *Teoriia i raschet ustroistv indukcionnogo nagreva*. Leningrad: Energoatomizdat, 279.
2. Kuvadin, A. B. (1988). *Indukcionnii nagrev ferromagnitnoi stali*. Moscow: Energoatomizdat, 198.
3. Elshin, V. V., Zhilcov, Iu. V. (2011). *Modelirovanie processa indukcionnogo nagreva s ispolzovaniem programmnoho kompleksa ANSYS*. *Sovremennye tekhnologii*.

Sistemii analiz. Modelirovanie, 1–5. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-protsesta-induktsionnogo-nagreva-s-ispolzovaniem-programmnogo-kompleksa-ansys>

4. Zabet, A., Mohamadi Azghandi, S. H. (2012). Simulation of induction tempering process of carbon steel using finite element method. *Materials & Design (1980-2015)*, 36, 415–420. doi: <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.10.052>
5. Grozenok, I. D., Simson, E. A., Stepuk, A. V., Shergin, S. Y. (2016). Numerical simulation of the workpieces' temperature field for manufacturing bearing rings during induction heating. *Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series: Dynamics and Strength of Machines*, 26, 50–53. doi: <http://doi.org/10.20998/2078-9130.2016.26.79927>
6. Drobenko, B., Hachkevych, O., Kournyts'kyi, T. (2007). A mathematical simulation of high temperature induction heating of electroconductive solids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50 (3-4), 616–624. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.07.013>
7. Díaz Moreno, J. M., García Vázquez, C., González Montesinos, M. T., Ortegón Gallego, F. (2012). Analysis and numerical simulation of an induction–conduction model arising in steel heat treating. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 236 (12), 3007–3015. doi: <http://doi.org/10.1016/j.cam.2011.04.007>
8. Clain, S., Rappaz, J., Swierkosz, M., Touzani, R. (1993). Numerical modeling of induction heating for two-dimensional geometries. *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 3 (6), 805–822. doi: <http://doi.org/10.1142/s0218202593000400>
9. Vollrath, D.-I. K. (2013). *Simulation of forging processes*, Forging Industry Information Service. Industrieverband Massivumformung e. v., 63.
10. Shirgaokar M., Ngaile G., Shen G. (2005). Process Modeling in Impression-Die Forging Using Finite-Element Analysis. *Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications*, 16, 193–200.
11. Avtonomova, L. V., Grozenok, E. D., Simson, E. A., Stepuk, A. V. (2017). Modelirovanie processa obemnoi shtampovki podshipnikovogo kolca. *Visnik NTU «KHPI». Transportne mashinobuduvannia*, 14, 135–139.
12. Basic, H., Duharkic, M., Burak, S. (2019). Numerical simulation of hot forging process in production of axisymmetric automobile parts. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, 7 (4), 1572–1581. doi: <http://doi.org/10.21533/pen.v7i4.487>
13. Behrens, B.-A. (2008). Finite element analysis of die wear in hot forging processes. *CIRP Annals*, 57 (1), 305–308. doi: <http://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.087>
14. L-Cancelos, R., Varas, F., Martín, E., Viéitez, I. (2016). Analysis of the thermo-mechanical deformations in a hot forging tool by numerical simulation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 119, 012021. doi: <http://doi.org/10.1088/1757-899x/119/1/012021>
15. Aydın, M., Kisioglu, Y. (2013). Hydraulic press design under different loading conditions using finite element analysis. *Engineering Science and Technology*, 16, 129–138.