

УДК 621.365.52

## РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕМОНТНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДИСКОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Базаров Александр Александрович<sup>1</sup>,  
aleksbazarov@yandex.ru

Данилушкин Александр Иванович<sup>1</sup>,  
aidanilushkin@mail.ru

<sup>1</sup> Самарский государственный технический университет,  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

**Актуальность** работы обусловлена экономической необходимостью повышения надежности и ресурса работы деталей и узлов газотурбинных двигателей, широко применяемых в качестве привода газоперекачивающих агрегатов в нефтегазовой отрасли. Диски и колеса турбин и компрессоров относятся к наиболее ответственным элементам газотурбинных двигателей, испытывающим в процессе работы критические нагрузки. Существенное влияние на выносливость этих деталей оказывает качество поверхностного слоя. Для увеличения ресурса работы деталей используются различные методы поверхностного упрочнения. Одним из методов повышения качества поверхностного слоя является термопластическое упрочнение, включающее две стадии: нагрев до заданной температуры и последующее спрейерное охлаждение. Данное исследование посвящено решению задачи применения эффективного экологически чистого способа локального нагрева обрабатываемых поверхностей диска в процессе термопластического упрочнения.

**Цель работы:** создание математических моделей электромагнитных и тепловых процессов при индукционном нагреве изделий сложной геометрической формы с учетом нелинейной зависимости электро- и теплофизических характеристик нагреваемого металла изделия от температуры для расчета конструктивных параметров системы индукционного нагрева, а также режимных параметров – мощности и времени нагрева.

**Методы.** Для решения взаимосвязанной электротепловой задачи использовались методы теории электромагнитного поля и теплопроводности, методы математического моделирования. Численное моделирование проводилось с помощью метода конечных элементов в современных инженерных пакетах.

**Результаты.** Разработан комплекс электромагнитных и тепловых моделей процесса индукционного нагрева изделий сложной формы, ориентированный на решение задач проектирования и автоматического управления специализированными нагревательными установками для ремонтных технологий роторов газотурбинных двигателей; предложен алгоритм определения конструктивных и режимных параметров индукционной системы, включающий последовательный расчет электромагнитных и тепловых полей с учетом их взаимного влияния и наличия ограничений на предельно допустимые температуры.

### Ключевые слова:

Индукционный нагрев, математическое моделирование, тепловые процессы, электромагнитная задача, метод конечных элементов, подвижные источники тепла.

### Введение

На предприятиях добычи, хранения и транспортировки газа эксплуатируется большое количество газоперекачивающих агрегатов с газотурбинными двигателями. Надежность газотурбинных двигателей в значительной степени зависит от действующих термических и механических нагрузок, возникающих в отдельных элементах конструкции в процессе эксплуатации [1–3]. Диски и колеса турбин и компрессоров относятся к наиболее ответственным элементам газотурбинных двигателей, испытывающим в процессе работы критические нагрузки, причем большая часть повреждений связана с возникновением и развитием усталостных трещин в местах соединения наиболее нагруженных деталей – лопаток и дисков турбин. Как показывает практика, большой процент выхода из строя таких деталей, как валы, лопатки, диски турбин и др., связан с усталостными разрушениями. Замена выработавшего свой ресурс диска или колеса турбины новым является дорогостоящей операцией. По причине износа дисков турбины наблюдается тенденция увеличения числа ремонтов газотурбинных агрегатов [4–10]. В связи с этим важной задачей является вос-

становление работоспособности дисков и колес, выработавших свой ресурс. Существенный интерес представляет проблема создания такой ремонтной технологии, которая позволяет продлить срок службы диска. Восстановление дисков осуществляется в несколько этапов [6, 8–13]. На первой стадии выявляются места с трещинами и производится их механическая обработка для обеспечения качественного заполнения трещин жидким металлом. Следующий этап – наплавление с помощью электросварки – во избежание возникновения недопустимых термонапряжений осуществляется с предварительным подогревом зоны сварки до температуры, находящейся в диапазоне 200–300 °С [6, 8, 13–17]. По окончании сварочных работ и механической обработки зоны шва производится отпуск обрабатываемого участка. Подогрев зоны сварки и отпуск после сварки осуществляется с помощью индукционной системы индуктором специальной конструкции. Наиболее эффективным вариантом является индуктор, рассмотренный в работах [18–22].

Заключительной стадией является термупрочнение, которое включает в себя операции нагрева и спрейерного охлаждения.

В настоящее время на отечественных заводах машиностроительных отраслей для увеличения ресурса работы деталей используются различные методы поверхностного упрочнения. При использовании упрочняющей технологии, основанной на поверхностно-пластическом деформировании, поверхностный слой детали, как правило, имеет высокую степень деформационного упрочнения при соответствующем уровне сжимающих остаточных напряжений. При этом пластическая деформация поверхностного слоя сопровождается увеличением числа дефектов и искажений кристаллической решетки, изменением микроструктуры поверхностного слоя детали. В нем резко возрастает количество дислокаций и других несовершенств кристаллической решетки, повышая её напряженность [10–12].

Предложенный рядом авторов метод термомпластического упрочнения [4, 9–12] позволяет существенно продлить срок службы агрегата. Способ нагрева при термомпластическом упрочнении значительно определяет энергоэффективность и качество всего процесса термообработки [20, 23–32]. Применяемый в ряде случаев пламенный нагрев или нагрев в печах сопротивления не позволяет обеспечить нагрев отдельных элементов конструкции без их разборки или локальный и интенсивный нагрев отдельных участков узла или детали при разборке или сборке таких сложных изделий, каким является ротор газотурбинного двигателя. В связи с этим в работе ставится задача разработки быстродействующей системы индукционного нагрева, включающей нагревательные устройства для локального нагрева обрабатываемых участков диска и систему управления, обеспечивающие в совокупности избирательный нагрев, высокую интенсивность нагрева, быстродействие, минимум энергозатрат, экологичность процесса и требуемое качество упрочняемых изделий при полной автоматизации процесса термообработки.

#### Основная часть

Высокую избирательность и интенсивность нагрева позволяет осуществить экологически чистый энергоэффективный способ индукционного нагрева. Компактность источников нагрева при высокой плотности удельной мощности, передаваемой в изделие, позволяет выполнять ремонтно-восстановительные работы дисков и колес турбоагрегатов без трудоемких и дорогостоящих операций полной разборки и сборки.

Создание индукционной нагревательной системы для каждого технологического процесса требует индивидуального подхода к моделированию электромагнитных и тепловых полей в системе «индуктор–металл». Моделирование процессов энергообмена при индукционном нагреве [22, 24, 31, 33–36] осложняется тем, что детали и узлы ротора турбоагрегата имеют сложную геометрическую форму, а электрофизические и теплофизические характеристики нагреваемого металла зави-

сят от температуры. В этой связи при создании конструкции нагревательных устройств на основе индукционных технологий актуальными задачами являются: моделирование электромагнитных и тепловых полей при индукционном нагреве изделий сложного профиля, разработка методики проектирования энергоэффективных нагревательных устройств и создание на этой основе специализированных индукционных нагревательных систем для ремонтных технологий.

Для сложного профиля зубцовой зоны диска (рис. 1) точный учет условий теплообмена при расчете температурных полей чрезвычайно труден, так как невозможно определить зависимости коэффициентов теплообмена от формы, температуры, режимов и физического состояния системы на различных поверхностях изделия. Это вносит дополнительные трудности в определение температурных полей. Математический анализ режимов конвективного и лучистого теплообмена является чрезвычайно сложным, а получение точных аналитических решений для определения коэффициентов теплообмена не представляется возможным. В связи с этим моделирование температурных полей при индукционном нагреве тел сложной геометрии осуществляется при некоторых допущениях, не искажающих принципиальной сущности физических явлений, но позволяющих решить задачу с требуемой точностью приближения. В зависимости от этапа процесса погрешность расчета составляет от 5 до 15 %. Большее значение соответствует этапу спрейерного охлаждения [22].



Рис. 1. Вентиляторный диск газотурбинного двигателя

Fig. 1. Fan disk of a gas turbine engine

Температурное поле диска в процессе нагрева является одним из основных факторов, влияющих на качество упрочняемого изделия. На характер температурного распределения, кроме мощности нагревателей, влияют условия теплообмена в процессе нагрева. В процессе термообработки необходимо учитывать все три вида теплообмена – теплопроводность, конвективный и лучистый теплообмен, которые являются нелинейными и в значительной степени зависят от формы, физического

состояния и температуры диска. Проведенный анализ режимов конвективного и лучистого теплообмена показал, что для большинства практических задач достаточной оказывается оценка коэффициента теплообмена по эмпирическим зависимостям, полученным обработкой экспериментальных результатов.

Операция охлаждения осуществляется путем подачи под большим давлением струй воды на упрочняемые поверхности диска. Коэффициент конвективного теплообмена на этих поверхностях, согласно данным [11, 12] и проведенным расчетам, составляет от 1000 до 100000 Вт/(м<sup>2</sup>град) в зависимости от вида охлаждающей жидкости, способа охлаждения (спокойная жидкость, струйное охлаждение) и давления. На других поверхностях из-за отсутствия информации о движении потоков стекающей воды сложно определить достаточно достоверно значение коэффициентов конвективного теплообмена, поэтому принимаем условия прежними, то есть как при теплообмене с воздушной средой.

Основным отличием установок индукционного нагрева от установок с внешним теплообменом является наличие распределенных по объему нагреваемого изделия внутренних источников тепла, индуцированных электромагнитным полем индуктора. Характер распределения вихревых токов зависит от многих факторов, обусловленных электро- и теплофизическими свойствами материала, частотой источника питания, температурой нагрева и др. Нагрев немагнитных материалов сопровождается существенным изменением удельного сопротивления в процессе нагрева, а индукционный нагрев ферромагнитных материалов, кроме того, характеризуется существенным изменением магнитной проницаемости металла и, соответственно, глубины проникновения тока. К тому же, как известно из работы [18], даже для тел правильной цилиндрической формы, у которых продольные и поперечные размеры соизмеримы, характерно наличие существенных краевых эффектов в распределении напряженности магнитного поля, которые в конечном итоге оказывают влияние на характер распределения внутренних источников тепла. Следовательно, для анализа динамических свойств объекта управления, синтеза высокоточных систем регулирования температуры необходимо знать зависимость характера распределения внутренних источников тепла в металле от температуры в процессе нагрева.

Для составления целостной картины изменения характера распределения плотности тока и мощности в нагрузке в процессе нагрева и возможности аналитического описания функции распределения внутренних источников тепла требуется последовательное решение электромагнитной и тепловой задач. Разделение во времени процедур расчета электромагнитного поля и теплового поля объясняется разной инерционностью этих процессов, а также возможностью изменения параметров

внутренних источников тепла в тепловой задаче без решения электромагнитной задачи. Электромагнитная задача формулируется как квазистационарная, а тепловая имеет в дифференциальном уравнении временную производную первого порядка. Все это позволяет создать полностью или частично независимые процедуры расчетов электромагнитных и тепловых полей.

Решение задачи моделирования электромагнитных процессов требует использования трехмерной постановки.

Для описания электромагнитного поля в трехмерной постановке требуется использовать формулировку в терминах векторного магнитного потенциала  $A$  и электрического скалярного потенциала  $V$ , чтобы обеспечить замыкание магнитных потоков и токов при повороте вектора тока на 90 градусов.

$$\begin{cases} -\nabla(j\omega\sigma\mathbf{A} + g\nabla V - \mathbf{J}^e) = 0; \\ j\omega g\mathbf{A} + \nabla \times \left( \frac{\nabla \times \mathbf{A}}{\mu_0\mu_r} \right) + g\nabla V = \mathbf{J}^e. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $\nabla$  – оператор набла,  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$ ;

где  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  – единичные векторы по осям  $x, y, z$  соответственно;  $\mu_0, \mu_r$  – магнитная проницаемость вакуума и относительная магнитная проницаемость материала;  $g$  – электропроводность материала диска,  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота тока.

Оператор набла при применении к вектору  $A$  записывается в виде векторного произведения  $\nabla \times A$ , а при применении к скалярной величине  $V$  – в виде скалярного произведения  $\nabla V$ .

В качестве граничных условий задана магнитная и электрическая изоляция в виде равенства нулю нормальной к поверхности границы составляющей векторного магнитного потенциала и электрического скалярного потенциала

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0; V = 0. \quad (2)$$

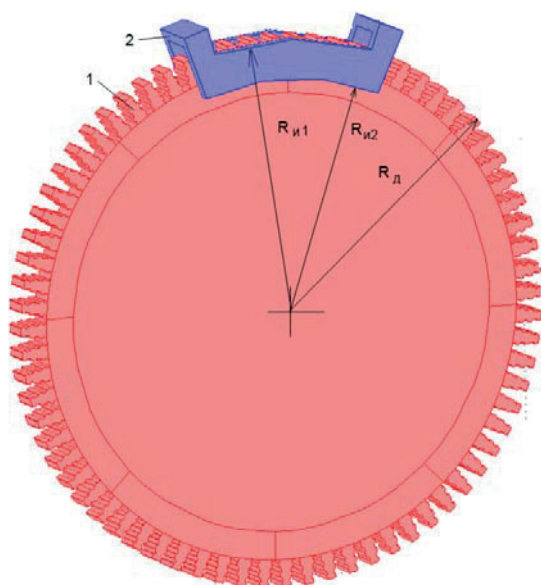
В качестве материала при изготовлении рассматриваемого диска используются ферромагнитные стали. Магнитная проницаемость зависит от напряженности магнитного поля и описывается кривой намагничивания. При решении нелинейной электромагнитной задачи применяется итерационный метод.

Поиск параметров системы нагрева осуществляется с учетом цели нагрева. Для локального подгрева участка диска перед сваркой или после сварки с целью отпуска металла температура не превышает значения, при котором происходит переход в немагнитное состояние. При использовании термоупрочнения возможен нагрев выше точки Кюри. В таком случае изменение магнитной проницаемости может быть учтено в связанной постановке электромагнитной и тепловой задач.

Моделирование тепловых процессов само по себе не столь ресурсоемко. Однако, учитывая увели-

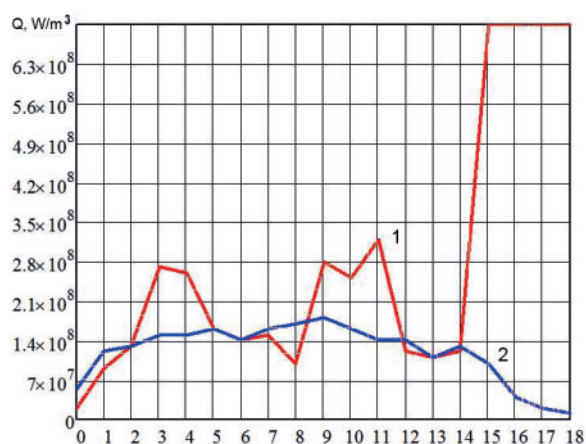






**Рис. 2.** Внешний вид диска с одновитковым щелевым индуктором: 1 – диск; 2 – индуктор

**Fig. 2.** Appearance of the disk with a single-screw slot inductor: 1 is the disk; 2 is the inductor



**Рис. 3.** Диаграммы распределения объемной мощности тепловыделения вдоль линии боковой поверхности зубца диска: 1 – угловые точки; 2 – точки срединной линии

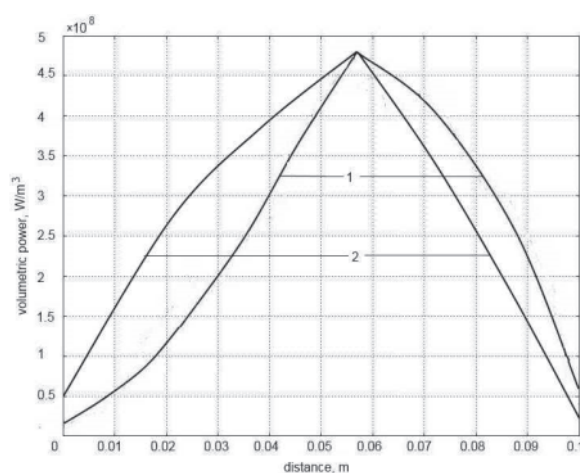
**Fig. 3.** Diagrams of distribution of heat release volumetric power along the line of the disk tooth lateral surface: 1 are the angular points; 2 are the points of the equidistant line

Конструкция индуктора (рис. 2) позволяет смещать его по радиальной координате в зависимости от места расположения участка термоупрочнения. За радиус диска  $R_{д}$  принимается координата крайней точки на выступе зубца диска, за радиус индуктора  $R_{и1}$  – максимальный радиус линейного участка индуктора. Требуемое распределение температуры в области основания зубца или в верхней части зубцовой зоны обеспечивается перемещением индуктора вверх или вниз по радиальной координате.

На рис. 4 представлены диаграммы распределения удельной мощности вдоль осевой линии зуб-

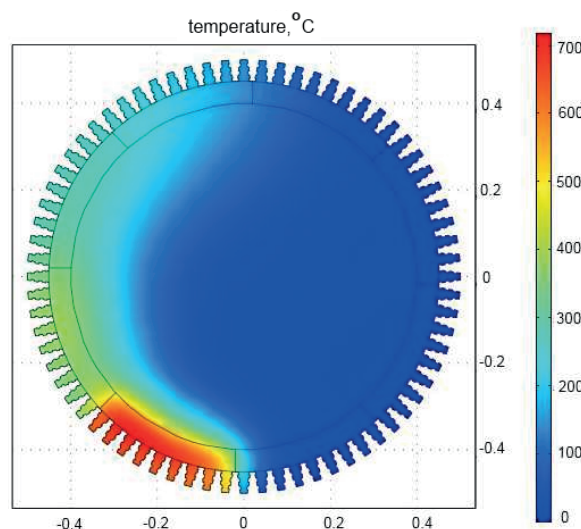
ца. Ось абсцисс соответствует участку от верхнего края зубца до точки, находящейся ниже основания зубца на 50 мм. На рис. 2 показано, что индуктор перекрывает область под зубцами для обеспечения требуемых температурных распределений в упрочняемой зоне.

Расчетные параметры приведены для тока, равного 1375 А, при числе витков, равном пяти. Ширина индуктора равна 70 мм. Мощность в области зубца составляет 1570 Вт, а в нижней зоне 1230 Вт для верхнего положения индуктора. Для индуктора, смещенного вниз на 20 мм, мощность в области зубца составляет 1300 Вт, а в нижней зоне 1900 Вт. Суммарная мощность тепловыделения в нагрузке для верхнего расположения индуктора равна 25200 Вт, а для нижнего – 28800 Вт.



**Рис. 4.** Диаграммы распределения плотности мощности на осевой линии зубца при разных перепадах по высоте между краем зубца и индуктором: 1) 0 мм; 2) 20 мм

**Fig. 4.** Diagrams of power density distribution on the tooth center line at height differences between the edge of the tooth and the inductor: 1) 0 mm; 2) 20 mm

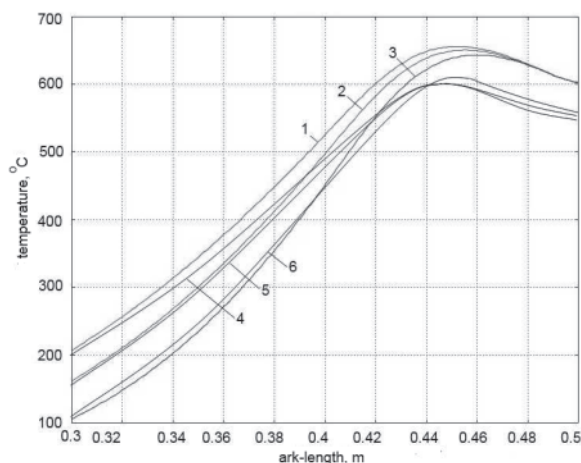


**Рис. 5.** Температурное поле на поверхности диска после нагрева четвертого сектора

**Fig. 5.** Temperature field on the disk surface after the fourth sector heating

Моделирование тепловых процессов выполнено при задании источников тепла в поверхностном слое зубцов и плоской части диска. Для имитации поворота диска на угол, соответствующий ширине нагреваемого сектора, при моделировании применено ступенчатое переключение функции внутренних источников тепла. Естественное охлаждение диска, обусловленное процессами конвективного и лучистого теплообмена, приводит к тому, что участки, выходящие из зоны действия индуктора, быстро снижают температуру (рис. 5). Здесь оказывает значительное влияние отвод тепла в центральные области диска, что благодаря большой площади ограничивает среднюю температуру диска. Установившееся распределение температуры в каждом секторе диска достигается при указанных значениях мощности за 400 секунд. Этот режим нагрева приемлем для этапов разогрева перед наплавкой и для отпуска. Отмеченные ранее проблемы с неравномерным распределением мощности полностью нивелируются за счет сравнительно невысокой скорости нагрева. Отдельно рассматривается вопрос поддержания температуры в длительном режиме. Во время сварочных работ индуктор закрывает доступ к рабочей поверхности. Поэтому после подогрева участка и поворота диска на заданный угол нужно вести наплавку в непрерывном режиме, чтобы мощность дуги компенсировала отвод тепла в окружающую среду.

Показанное на рис. 5 распределение температуры для режима отпуска стали претерпевает некоторые изменения, так как при выдержке в течение нескольких часов средняя температура диска несколько возрастает (рис. 6).



**Рис. 6.** Диаграммы температур вдоль осевой линии зубца: при стабилизации температуры на вершине зубца: 1, 2, 3 – в моменты времени 600, 800, 1000 с; при стабилизации температуры в основании зубца: 4, 5, 6 – в моменты времени 600, 800, 1000 с.

**Fig. 6.** Diagrams of temperatures along the tooth center line: during temperature steadying at the tooth apex: 1, 2, 3 – at the moments 600, 800, 1000 s from start; during temperature steadying at the tooth base: 4, 5, 6 – at the moments 600, 800, 1000 s from start

Диаграммы температуры на осевой линии плоской поверхности зубца показывают, что перепад температуры в прилегающей к месту наплавки области может быть снижен за счет правильного подбора смещения индуктора. Моделирование режима стабилизации температуры показало, что через 15 минут нагрева перепад температуры снижается до 50 градусов при смещении индуктора на 20 мм ниже верхнего положения индуктора.

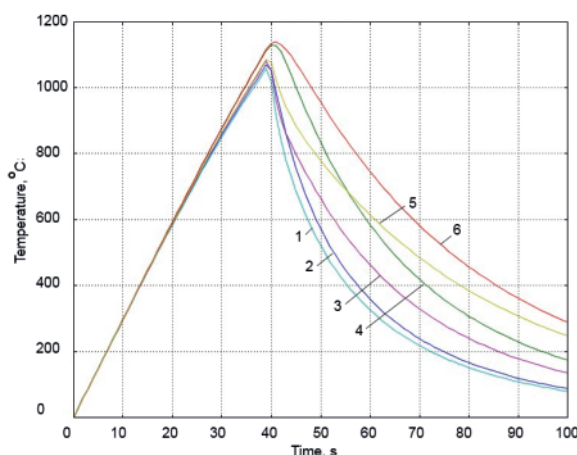
Задача термоупрочнения требует более высоких скоростей охлаждения для того, чтобы в поверхностном слое не изменилась кристаллическая структура. При сложном профиле зубцовой зоны обеспечить равномерное распределение температуры в поверхностном слое при высокой скорости нагрева не представляется возможным. Поэтому процесс выравнивания температуры в поверхностном слое будет сопровождаться прогревом всего зубца. Применяемое при закалке спрейерное охлаждение с высоким давлением жидкости может обеспечить быстрое снижение температуры поверхностного слоя в течение короткого промежутка времени. Однако при этом внутренние области в течение длительного времени останутся горячими, и за их счет произойдет повторный нагрев закаленного слоя и его отпуск. Поддерживать высокое давление в системе охлаждения из-за большого расхода воды сложно. Расход охлаждающей жидкости становится очень большим, что создает проблему при реализации. Представленные на рис. 7 диаграммы температур в процессе упрочнения для нескольких точек зубца иллюстрируют возможность снижения температуры в зубцовой зоне в течение одной минуты при коэффициенте конвективного теплообмена  $=1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{град})$ . Такое значение соответствует водяному струйному орошению при давлении в трубопроводе не более 2 атм. Увеличение интенсивности охлаждения позволяет обеспечить более высокие градиенты температуры и сформировать нужную глубину упрочненного слоя.

На базе полученных моделей разработан алгоритм процесса термообработки, предусматривающий выполнение последовательности операций наплавки, отпуска и термопластического упрочнения дисков. Разработана и реализована программа изменения мощности индуктора в процессе термообработки.

Управление процессом термообработки осуществляется с автоматизированного рабочего места оператора, реализованного на персональной ЭВМ, работающей под управлением операционной системы Microsoft и SCADA-системы сбора и предоставления информации. В качестве управляющего контроллера используется программируемый логический контроллер WAGO – I/O-SYSTEM.

В состав системы управления входит промышленный компьютер, который используется для отображения текущего состояния процесса термообработки диска. Кроме того, с его помощью выполняется управление установкой, на нём хранятся данные по проведению операций упрочнения.





**Рис. 7.** Диаграммы температур в точках зубца при нагреве и последующем охлаждении: 1, 2 – точки на поверхности и на оси верхнего выступа; 3, 4 – точки на поверхности и на оси среднего выступа; 5, 6 – точки на поверхности нижней впадины

**Fig. 7.** Diagrams of temperatures at the tooth points during heating and subsequent cooling: 1, 2 are the points on the surface and on the axis of the upper projection; 3, 4 are the points on the surface and on the axis of the middle projection; 5, 6 are the points on the surface of the lower depression

Автоматическое управление предусматривает последовательное управление следующими действиями: позиционирование диска; нагрев перед наплавкой; наплавка; отпуск; нагрев для операции термоупрочнения; поворот диска для выхода упрочняемого сектора из зоны нагрева; подача воды на спрейер. Операция повторяется до завершения полного цикла упрочнения, после чего дается команда на завершение операции.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безъязычный В.Ф. Влияние качества поверхностного слоя после механической обработки на эксплуатационные свойства деталей машин // Справочник. Инженерный журнал. – 2001. – № 4. – С. 9–16.
2. Усталость материалов при высокой температуре / под ред. Р.П. Скелтона / пер. с англ. – М.: Металлургия, 1988. – 341 с.
3. Чижик А.А., Лапик А.А., Ермаков Б.С. Распространение коррозионных трещин в дисках паровых турбин // Энергомашиностроение. – 1988. – № 11. – С. 32–34.
4. An investigation on crack growth rate of fatigue and induction heating thermo-mechanical fatigue (TMF) in Hastelloy X superalloy via LEFM, EPFM and integration models / M. Esmailzadeh, F. Qods, H. Arabi, B.M. Sadeghi // International Journal of Fatigue. – 2017. – V. 97. – P. 135–149.
5. Investigation of effect of post weld heat treatment conditions on residual stress for ITER blanket shield blocks / Hun-Chea Jung, Sa-Woong Kim, Yun-Hee Lee, Seung-Wook Baek, Min-Su Ha, Hee-Jin Shim // Fusion Engineering and Design. – 2016. – V. 109–111. – P. A. – P. 747–751.
6. Jijin Xu Ligong, Chen Chunzhen Ni. A study on the mechanical stress relieving and safety assessment without post-weld heat treatment // Materials Science and Engineering: A. – 2007. – V. 443. – Iss. 1–2. – P. 107–113.
7. Исследование упрочнения поверхности сталей при комбинированном ионном и лазерном воздействии / А.М. Борисов,

## Выводы

В работе предложено решение актуальной задачи проектирования конструкций и режимов работы индукционных нагревателей в специализированных технологиях по восстановлению работоспособности и увеличению ресурса турбоагрегатов газотурбинных двигателей. Выполненные исследования позволили получить следующие результаты.

1. Проведённый анализ существующих технологий нагрева деталей роторов газотурбинных двигателей в процессе ремонтно-восстановительных работ показал, что эффективным способом нагрева, позволяющим обеспечить высокую надежность, экологическую чистоту, оперативность и удобство управления процессом термоупрочнения, является индукционный нагрев.
2. Предложено численное решение взаимосвязанных электромагнитной и тепловой задач для осесимметричных тел сложного профиля, которое дает возможность достаточно точно учитывать основные нелинейности путем коррекции изменяющихся величин на каждом шаге по времени.
3. По результатам исследований предложено устройство индукционного нагрева и система автоматического управления, обеспечивающие программное управление всеми устройствами. Система автоматического управления режимами термообработки, реализованная на базе микропроцессорного программируемого контроллера WAGO-I/O-SYSTEM и станции оператора АСУ IPC-510-SYSI-3, обеспечивает требуемое качество управления в стационарных и переходных режимах и высокое качество процесса термоупрочнения.

- Б.Л. Крит, В.С. Куликаускас, Н.Л. Семенова, И.В. Суминов, С.А. Тихонов // Известия ТПУ. – 2014. – Т. 324. – № 2. – С. 137–142.
8. Борздыка А.М., Гецов Л.Б. Релаксация напряжений в металлах и сплавах. – М.: Металлургия, 1978. – 256 с.
9. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением / Л.А. Хворостухин, С.В. Шишкин, И.П. Ковалев, Р.А. Ишмаков. – М.: Машиностроение, 1988. – 144 с.
10. Кривошолом В.Г. Повышение усталостной прочности и износоустойчивости лопаток и дисков ГТД термопластическим упрочнением // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18. – № 4 (2). – С. 336–340.
11. Термоупрочнение рельсовой накладки струйным водяным охлаждением / Ю.И. Липунов, К.Ю. Эйсмонт, Ю.Г. Ярошенко, М.В. Старцева, Е.В. Некрасова // Сталь. – 2014. – № 8. – С. 88–91.
12. Струйное водяное охлаждение при термоупрочнении проката несимметричного профиля / Ю.И. Липунов, К.Ю. Эйсмонт, Е.В. Некрасова, М.В. Захарченко, Ю.Г. Ярошенко, Э.В. Абрамов // Сталь. – 2015. – № 3. – С. 83–87.
13. Rational approaches to high temperature induction heating / B. Drobenko, P. Vankevych, Y. Ryzhov, M. Yakovlev // International Journal of Engineering Science. – 2017. – V. 117. – P. 34–50.
14. Panchal V.D. Relieving stress in stainless steels // World Pumps. – 2013. – V. 2013. – Iss. 1. – P. 28–32.

15. Pingsha Dong Shaopin, Song Jinmiao Zhang. Analysis of residual stress relief mechanisms in post-weld heat treatment // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 2014. – V. 122. – P. 6–14.
16. Stress relieving and its effect on life of welded tubular joints / A.M. Paradowska, J.W.H. Price, B. Kerezi, P. Dayawansa, X.L. Zhao // *Engineering Failure Analysis*. – 2010. – V. 17. – Iss. 1. – P. 320–327.
17. Hong Tae Kang, Yung-Li Lee, Xichen Jackson Sun. Effects of residual stress and heat treatment on fatigue strength of weldments // *Materials Science and Engineering: A*. – 2008. – V. 497. – Iss. 1–2. – P. 37–43.
18. Расчет и анализ щелевого индуктора для термообработки замковой зоны диска турбины / А.А. Базаров, А.Л. Головачев, А.И. Данилушкин, В.А. Данилушкин // *Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки»*. – 2008. – Вып. 1 (21) – С. 144–148.
19. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
20. Кувалдин А.Б. Индукционный нагрев ферромагнитных сталей. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 200 с.
21. Индукционный нагрев ферромагнетиков плоским круговым многовитковым соленоидом / А.В. Гнатов, Щ.В. Аргун, Е.А. Чаплыгин, О.С. Сабокаръ // *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. – 2015. – Вып. 70. – С. 113–118.
22. Демидович В.Б. О точности вычисления температурных полей при индукционном нагреве // *Индукционный нагрев*. – 2013. – № 1 (23). – С. 46.
23. Иванов И.А., Киселев И.Г. Исследование термических процессов при индукционном нагреве железнодорожных колес при ремонте // *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. – 2010. – № 4. – С. 38–45.
24. Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р. Исследования теплового и термонапряженного состояния цилиндрических заготовок при скоростном индукционном нагреве // *Индукционный нагрев*. – 2008. – № 2. – С. 4–13.
25. Установка для предварительного индукционного нагрева трубопроводов перед сваркой / А.А. Шуляк, Н.И. Петриди, А.В. Старцев, Е.В. Токарев, А.К. Белкин // *Индукционный нагрев*. – 2008. – № 3. – С. 17–20.
26. Жуков Д.А., Иванов И.А., Соболев А.А. Влияние индукционного нагрева на структуру колесной стали в процессе ремонта // *Новые материалы и технологии в машиностроении*. – 2013. – № 17. – С. 31–33.
27. Effect of magnetizer geometry on the spot induction heating process / Kai Gao, Xunpeng Qin, Zhou Wang, Shengxiao Zhu, Zhongming Gan // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2016. – V. 231. – P. 125–136.
28. Shiou-Yueh Shih, Shih-Chih Nian, Ming-Shyan Huang. Comparison between single- and multiple-zone induction heating of large curved mold surfaces // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2016. – V. 75. – P. 24–35.
29. Optimization of the Induction Heating Process in Order to Achieve Uniform Surface Temperature / L. Jakubovičová, A. Gašparec, P. Kopas, M. Sága // *Procedia Engineering* – 2016. – V. 136. – P. 125–131.
30. Koudela L., Kotlan V. High-speed rotation induction heating in thermal clamping technology // *Applied Mathematics and Computation* – 2015. – V. 267. – P. 445–455.
31. An axisymmetrical non-linear finite element model for induction heating in injection molding tools / P. Guerrier, K.K. Nielsen, S. Menotti, J.H. Hattel // *Finite Elements in Analysis and Design*. – 2016. – V. 110. – P. 1–10.
32. Chovan J., Slodička M. Induction hardening of steel with restrained Joule heating and nonlinear law for magnetic induction field: Solvability // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. – 2017. – V. 311. – P. 630–644.
33. Simulation of steel microstructure evolution during induction heating / B.J. Yang, A. Hattiangadi, W.Z. Li, G.F. Zhou, T.E. McGreevy // *Materials Science and Engineering: A* – 2010. – V. 527. – P. 2978–2984.
34. A novel method of measurement of loss in a track of a turn of a planar transformer for induction heating application / A.Z. Khemakhem, K.B. Smida, A. Ammouri, F. Kourda // *Electric Power Systems Research*. – 2018. – V. 154. – P. 95–109.
35. Numerical analysis and thermographic investigation of induction heating / M. Kranjc, A. Zupanec, D. Miklavcic, T. Jarm // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2010. – V. 53. – Iss. 17–18. – P. 3585–3591.
36. Huaiyu Wen, Yi Han. Study on mobile induction heating process of internal gear rings for wind power generation // *Applied Thermal Engineering*. – 2017. – V. 112. – P. 507–515.

Поступила 03.04.2018 г.

#### Информация об авторах

**Базаров А.А.**, доктор технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий электротехнического факультета Самарского государственного технического университета.

**Данилушкин А.И.**, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий электротехнического факультета Самарского государственного технического университета.



UDC 621.365.52

## DEVELOPMENT OF ENERGY EFFICIENT INDUCTION SYSTEM FOR REPAIR-RESTORATION TECHNOLOGIES OF DISKS OF GAS TURBINE ENGINES

Alexander A. Bazarov<sup>1</sup>,  
aleksbazarov@yandex.ru

Alexander I. Danilushkin<sup>1</sup>,  
aidanilushkin@mail.ru

Samara State Technical University,  
244, Molodogvardeyskaya street, Samara, 443100, Russia.

**The relevance** of the discussed issue is caused by the economic need to improve the reliability and service life of parts and components of gas turbine engines widely used as a drive for gas pumping units in the oil and gas industry. Disks and wheels of turbines and compressors belong to the most critical elements of gas turbine engines, which experience critical loads during operation. The quality of the surface layer has a significant effect on the endurance of these parts. To increase the service life of parts, various methods of surface hardening are used. One of the methods for improving the quality of the surface layer is thermoplastic hardening, which involves two steps: heating to a predetermined temperature and subsequent spray cooling. This research is devoted to the solution of the problem of applying an efficient, environmentally friendly method of local heating of the machined surfaces of a disk during thermoplastic hardening.

**The main aim** of the study is to develop the mathematical models of electromagnetic and thermal processes for induction heating of products of complex geometric shape, taking into account the nonlinear dependence of the electro- and thermophysical characteristics of the heated metal of the article on temperature for calculating the structural and regime parameters of the induction heating system.

**Methods.** To solve the interconnected electrothermal problem the authors have used the methods of the theory of electromagnetic field and thermal conductivity, methods of mathematical modeling. Numerical simulation was carried out using the finite element method in modern engineering packages.

**Results.** The authors developed the complex of electromagnetic and thermal models of induction heating of products with complex shape, designed to solve the problems of design and automatic control of specialized heating installations for repair technologies of rotors of gas turbine engines; proposed the algorithm for determining the design and regime parameters of an induction system, including a sequential calculation of electromagnetic and thermal fields, taking into account their mutual influence and the presence of restrictions on the maximum permissible temperatures.

### Key words:

Induction heating, mathematical modeling, thermal processes, electromagnetic problem, finite element method, mobile heat sources.

### REFERENCES

1. Bezyazychny V.F. Vliyaniye kachestva poverkhnostnogo sloya posle mekhanicheskoy obrabotki na ekspluatatsionnye svoystva detaley mashin [The influence of the quality of the surface layer after machining on the performance properties of machine parts]. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal*, 2001, no. 4, pp. 9–16.
2. *Uсталост materialov pri vysokoy temperature* [Fatigue of materials at high temperature]. Ed. by R.P. Skeltona. Translated from English. Moscow, Metallurgiya Publ., 1988. 341 p.
3. Chizhik A.A., Lapik A.A., Ermakov B.S. Rasprostraneniye korrozionnykh treshchin v diskakh parovykh turbin [Spread of corrosion cracks in steam turbine disks]. *Energomashinostroeniye*, 1988, no. 11, pp. 32–34.
4. Esmailzadeh M., Qods F., Arabi H., Sadeghi B.M. An investigation on crack growth rate of fatigue and induction heating thermo-mechanical fatigue (TMF) in Hastelloy X superalloy via LEFM, EPFM and integration models. *International Journal of Fatigue*, 2017, vol. 97, pp. 135–149.
5. Hun-Chea Jung, Sa-Woong Kim, Yun-Hee Lee, Seung-Wook Baek, Min-Su Ha, Hee-Jin Shim. Investigation of effect of post weld heat treatment conditions on residual stress for ITER blanket shield blocks. *Fusion Engineering and Design*, 2016, vol. 109–111, P. A, pp. 747–751.
6. Jijin Xu Ligong, Chen Chunzhen Ni. A study on the mechanical stress relieving and safety assessment without post-weld heat treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, vol. 443, Iss. 1–2, pp. 107–113.
7. Borisov A.M., Krit B.L., Kulikauskas V.S., Semenova N.L., Suminov I.V., Tikhonov S.A. Investigation of the surface hardening of steels with combined ion and laser effects. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 2, pp. 137–142. In Rus.
8. Borzdyka A.M., Getsov L.B. *Relaksatsiya napryazheniy v metallakh i splavakh* [Stress relaxation in metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978. 256 p.
9. Khvorostukhin L.A., Shishkin S.V., Kovalev I.P., Ishmakov R.A. *Povysheniye nesushchey sposobnosti detaley mashin poverkhnostnym uprochneniem* [Increasing the bearing capacity of machine parts by surface hardening]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1988. 144 p.
10. Krutsilo V.G. *Povysheniye ustalostnoy prochnosti i iznosoustoychivosti lopatok i diskov GTD termoplasticheskim uprochneniem* [Increasing fatigue strength and wear resistance of blades and disks of gas turbine engines by thermoplastic hardening]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2016, vol. 18, no. 4 (2), pp. 336–340.
11. Lipunov Yu.I., Eysmond K.Yu., Yaroshenko Yu.G., Startseva M.V., Nekrasova E.V. Termouprochneniye relsovoy nakladki struynym vodyanym okhlazhdeniem [Thermal hardening of the rail pad by water-cooled jet]. *Stal*, 2014, no. 8, pp. 88–91.
12. Lipunov Yu.I., Eysmond K.Yu., Nekrasova E.V., Zakharchenko M.V., Yaroshenko Yu.G., Abramov E.V. Struynoe vodyanoie okhlazhdeniye pri termouprochnenii prokata nesimmetrichnogo profilya [Jet water cooling during heat strengthening of rolled asymmetric profile]. *Stal*, 2015, no. 3, pp. 83–87.

13. Drobenko B., Vankevych P., Ryzhov Y., Yakovlev M. Rational approaches to high temperature induction heating. *International Journal of Engineering Science*, 2017, vol. 117, pp. 34–50.
14. Panchal V.D. Relieving stress in stainless steels. *World Pumps*, 2013, vol. 2013, Iss. 1, pp. 28–32.
15. Pingsha Dong Shaopin, Song Jinmiao Zhang. Analysis of residual stress relief mechanisms in post-weld heat treatment. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2014, vol. 122, pp. 6–14.
16. Paradowska A.M., Price J.W.H., Kerezsi B., Dayawansa P., Zhao X.L. Stress relieving and its effect on life of welded tubular joints. *Engineering Failure Analysis*, 2010, vol. 17, Iss. 1, pp. 320–327.
17. Hong Tae Kang, Yung-Li Lee, Xichen Jackson Sun. Effects of residual stress and heat treatment on fatigue strength of weldments. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, vol. 497, Iss. 1–2, pp. 37–43.
18. Bazarov A.A., Golovachev A.L., Danilushkin A.I., Danilushkin V.A. Raschet i analiz shchelevogo induktora dlya termobrabotki zamkovoy zony diska turbiny [Calculation and analysis of a slotted inductor for heat treatment of the locking zone of the turbine disk]. *Vestnik SamGTU. Seriya «Tekhnicheskie nauki»*, 2008, vol. 1 (21), pp. 144–148.
19. Nemkov V.S., Demidovich V.B. *Teoriya i raschet ustroystv induktsionnogo nagreva* [Theory and calculation of induction heating devices]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1988. 280 p.
20. Kuvaldin A.B. *Induktsionny nagrev ferromagnitnykh staley* [Induction heating of ferromagnetic steels]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 200 p.
21. Gnatov A.V., Argun Shch.V., Chaplygin E.A., Sabokar O.S. Induktsionny nagrev ferromagnetikov ploskim krugovym mnogovitykovym solenoidom [Induction heating of ferromagnets by a flat circular multi-turn solenoid]. *Vestnik Kharkovskogo natsionalnogo avtomobilno-dorozhnogo universiteta*, 2015, vol. 70, pp. 113–118.
22. Demidovich V.B. O tochnosti vychisleniya temperaturnykh poley pri induktsionnom nagreve [On accuracy of calculating temperature fields for induction heating]. *Induktsionny nagrev*, 2013, no. 1 (23), pp. 46.
23. Ivanov I.A., Kiselev I.G. Issledovanie termicheskikh protsessov pri induktsionnom nagreve zheleznodorozhnykh koles pri remonte [Investigation of thermal processes during induction heating of railway wheels during repairs]. *Vestnik Uralskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya*, 2010, no. 4, pp. 38–45.
24. Kuvaldin A.B., Lepeshkin A.R. Issledovaniya teplovogo i termopryazhennogo sostoyaniya tsilindricheskikh zagotovok pri skorstnom induktsionnom nagreve [Investigations of thermal and thermally stressed state of cylindrical blanks with high-speed induction heating]. *Induktsionny nagrev*, 2008, no. 2, pp. 4–13.
25. Shulyak A.A., Petridi N.I., Startsev A.V., Tokarev E.V., Belkin A.K. Ustanovka dlya predvaritelnogo induktsionnogo nagreva truboprovodov pered svarkoy [Device for pre-induction heating of pipelines before welding]. *Induktsionny nagrev*, 2008, no. 3, pp. 17–20.
26. Zhukov D.A., Ivanov I.A., Sobolev A.A. Vliyanie induktsionnogo nagreva na strukturu kolesnoy stali v protsesse remonta [Influence of induction heating on wheel steel structure in repairing]. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii*, 2013, no. 17, pp. 31–33.
27. Kai Gao, Xunpeng Qin, Zhou Wang, Shengxiao Zhu, Zhongming Gan. Effect of magnetizer geometry on the spot induction heating process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, vol. 231, pp. 125–136.
28. Shiou-Yueh Shih, Shih-Chih Nian, Ming-Shyan Huang. Comparison between single- and multiple-zone induction heating of large curved mold surfaces. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2016, vol. 75, pp. 24–35.
29. Jakubovičová L., Gašparec A., Kopas P., Sága M. Optimization of the Induction Heating Process in Order to Achieve Uniform Surface Temperature. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 136, pp. 125–131.
30. Koudela L., Kotlan V. High-speed rotation induction heating in thermal clamping technology. *Applied Mathematics and Computation*, 2015, vol. 267, pp. 445–455.
31. Guerrier P., Nielsen K.K., Menotti S., Hattel J.H. An axisymmetrical non-linear finite element model for induction heating in injection molding tools. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2016, vol. 110, pp. 1–10.
32. Chovan J., Slodička M. Induction hardening of steel with restrained Joule heating and nonlinear law for magnetic induction field: Solvability. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2017, vol. 311, pp. 630–644.
33. Yang B.J., Hattiangadi A., Li W.Z., Zhou G.F., McGreevy T.E. Simulation of steel microstructure evolution during induction heating. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, vol. 527, pp. 2978–2984.
34. Khemakhem A.Z., Smida K.B., Ammouri A., Kourda F. A novel method of measurement of loss in a track of a turn of a planar transformer for induction heating application. *Electric Power Systems Research*, 2018, vol. 154, pp. 95–109.
35. Kranjc M., Zupanic A., Miklavcic D., Jarm T. Numerical analysis and thermographic investigation of induction heating. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, vol. 53, Iss. 17–18, pp. 3585–3591.
36. Huaiyu Wen, Yi Han. Study on mobile induction heating process of internal gear rings for wind power generation. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 112, pp. 507–515.

Received: 3 April 2018.

#### Information about the authors

**Alexander A. Bazarov**, Dr. Sc., associate professor, Samara State Technical University.

**Alexander I. Danilushkin**, Dr. Sc., professor, Samara State Technical University.