

И. И. Вегера, А. И. Маталыго, И. А. Скавыш, П. Ю. Цыкунов

Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ ТРУБ

Аннотация. Представлен индукционный закалочный комплекс, предназначенный для поверхностной закалки определенной номенклатуры деталей, который разработан и функционирует в Физико-техническом институте НАН Беларуси. Приведен пример последовательности разработки технологии закалки, начиная от момента получения данных о закаленном слое конкретной детали до определения технологии закалки, типа используемого индуктора и необходимых параметров закалки, включая величину зоны нагрева и охлаждения, скорость взаимного перемещения детали и индуктора, а также тип и давление закалочной жидкости. Представлены примеры результатов моделирования различных процессов нагрева и охлаждения деталей с использованием программы UNIVERSAL 2D, предложен пример анализа полученных данных и возможные пути корректировки параметров нагрева с целью получения закаленных слоев деталей нужного размера и твердости. Отмечается важность этапа моделирования режимов нагрева, когда объектом обработки служат крупные заготовки. Так, недостаточная скорость охлаждения таких деталей может приводить к короблению, что имеет место при слишком высокой температуре закалки и глубине нагрева. Самоотпуск значительно влияет на значения твердости глубинных слоев детали. Различные комбинации режимов нагрева для одного вида деталей подбираются индивидуально – согласно требованию заказчика и типу используемого генератора. Показано, что с увеличением глубины зоны нагрева растет влияние процесса самоотпуска на формирование глубинных слоев.

Ключевые слова: индукционный нагрев, поверхностная закалка, глубинная закалка, моделирование, температурное поле

Для цитирования: Расчет и моделирование параметров поверхностной высокочастотной термообработки труб / И.И. Вегера [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2021. – Т. 66, № 1. – С. 20–27. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-1-20-27>

Ivan I. Vegeera, Aleksey I. Matalygo, Ilya A. Sakavysh, Pavel U. Tsykunou

Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

CALCULATION AND MODELING OF SURFACE HIGH-FREQUENCY PIPE HEAT TREATMENT PARAMETERS

Abstract. This article describes a device developed and manufactured on the basis of the Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, an induction hardening complex, and a range of parts suitable for processing. In addition, the article provides an example of the development of a technology for hardening parts from the moment a drawing of a part is obtained, indicating the required parameters of the hardened layer, until the determination of the technology of hardening, determining the type of inductor used and determining the necessary parameters of hardening, such as: size of the heating zone, size of the cooling zone, speed of mutual movement of the part and inductor, as well as the type and pressure of the quenching fluid. The article also presents examples of simulation results, various processes of heating and cooling parts using the UNIVERSAL 2D program, and offers an example of analysis of the data and possible ways to adjust the heating parameters in order to obtain the desired result, which allows to obtaining hardened layers of parts of the desired size and hardness. The importance of the stage of modeling of heating modes, especially in the case of large workpieces, is noted. Thus, the insufficient cooling rate of such parts can lead to warping, especially at a too high quenching temperature and heating depth. Self-tempering significantly affects the hardness values of the deep layers. Various combinations of heating modes for one type of parts are selected individually, according to the requirement of a customer and the type of generator used. The higher the depth of the heating zone, the higher the effect of self-tempering on the deeper layers is.

Keywords: induction heating, surface hardening, deep hardening, modeling, temperature field

For citation: Vegeera I. I., Matalygo A. I., Sakavysh I. A., Tsykunou P. U. Calculation and modeling of surface high-frequency pipe heat treatment parameters. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 1, pp. 20–27 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-1-20-27>

Введение. Проведенный анализ известных работ по закалке цилиндрических деталей (заготовок) металлоизделий с помощью индукционного нагрева показал перспективность использования для этих целей многовиткового или одновиткового индуктора [1, 2]. Многовитковый индуктор применяется преимущественно для нагрева деталей с большой площадью поверхности или получения закаленных слоев большой толщины h . При этом представляется возможным существенно уменьшить температурный перепад по длине нагреваемой детали L и, следовательно, величину механических напряжений, обеспечив минимальную вариацию толщины закаленного слоя. Одновитковый индуктор может применяться как для закалки локальной зоны поверхности детали, так и по всей длине детали. Во втором случае выбираются оптимальные скорость поступательного движения детали и ее вращения, а также скорость охлаждения, что необходимо для получения мартенситной структуры в закаленном слое. При этом существенно нивелируется коробление детали из-за возникающих термических напряжений [4, 5]. Мощность электроэнергии, подаваемой на индуктор, подбирается в соответствии с необходимой температурой закалки, что обеспечивает требуемое время нагрева зоны под витком. Давление и тип охлаждающей жидкости, а также способ ее подачи (спрейерный, ламинарный) устанавливаются таким образом, чтобы достигнуть скорости охлаждения выше критической.

Результаты исследований и их обсуждение. Приведенные в данной работе результаты получены на закалочной установке ФТИ 3.178.01, разработанной в Физико-техническом институте НАН Беларуси (рис. 1). Являясь устройством для термообработки полуавтоматического действия, она используется для поверхностной закалки деталей при индукционном нагреве. При этом представляется возможным проводить закалку несколькими способами, включая «последовательную» (сканирующую), «одновременную» (полный нагрев всей зоны и последующую закалку как различные стадии) закалку детали, а также последовательную закалку нескольких зон детали. Для работы установки предусмотрено спрейерное охлаждение деталей, позволяющее использовать воду, эмульсии или различные аквапласты в качестве закалочных жидкостей.

Несущая система установки – станина 1, служит для монтажа деталей и узлов. Относительно нее ориентируются и перемещаются подвижные узлы. Также на станине размещены направляющие движения, приводы и моторы, редукторы для осуществления главного движения. Габариты станины прямо пропорциональны максимальной длине обрабатываемой на станке детали. В узел нижнего центра 2 включены бак для слива охлаждающей жидкости, в котором расположен привод вращения, предназначенный для более равномерной закалки поверхности, и нижний центр для центрирования детали и индуктора. Узел верхнего центра 3 состоит из кронштейна, верхнего центра и прижимного устройства. Кронштейн осуществляет перемещение верхнего центра по вертикальным направляющим для поджатия детали и закрепления ее в центрах. Закаливаемая заготовка устанавливается в вертикальном положении в центрах, с помощью которых термообрабатываемая деталь совершает вращательное движение, одновременно с этим вдоль ее оси движется индуктор с генератором.

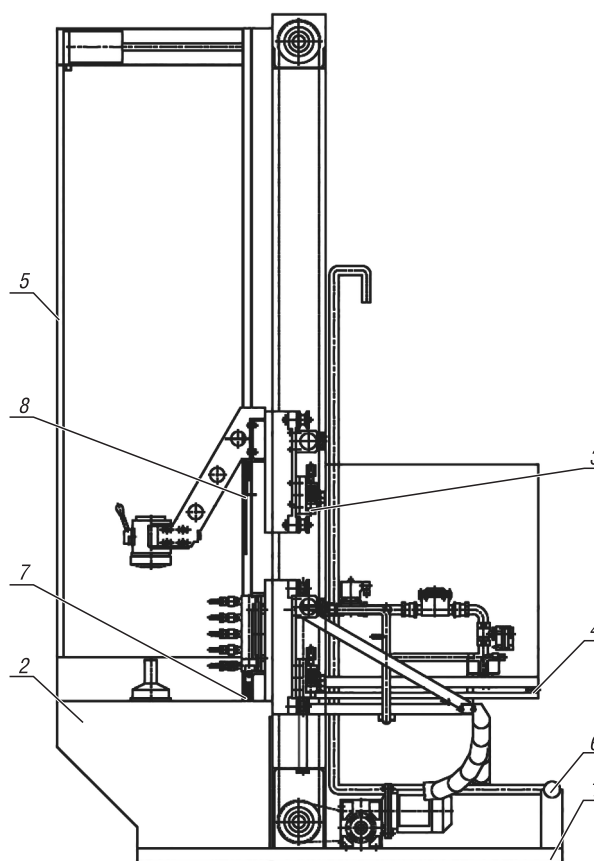


Рис. 1. Общий вид закалочной установки ФТИ 3.178.01: 1 – станина; 2 – узел нижнего центра; 3 – узел верхнего центра; 4 – каретка; 5 – ограждение; 6 – трубопровод напорный; 7, 8 – штора защитная

Fig. 1. General view of the vertical hardening plant ФТИ 3.178.01: 1 – bed; 2 – node of lower center; 3 – node of top center; 4 – carriage; 5 – fence; 6 – pressure pipe; 7, 8 – protective curtain

Т а б л и ц а 1. Установка высокочастотная закалочная ФТИ 3.178.01

Table 1. High-frequency quenching installation FTI 3.178.01

Техническая характеристика	Норма
Напряжение, В	380/220 В, 50 Гц
Мощность потребляемая, кВт	240
Частота рабочая, Гц	2000–66 000
Глубина закаливаемого слоя	До 10 мм
Расход закалочной жидкости, м ³ /ч	16
Расход охлаждающей воды, м ³ /ч	14
Скорость вращения закаливаемой детали, об/мин	30–1200
Скорость рабочего хода, мм/с	0,1–30
Максимальная длина закаливаемой детали, мм	3000
Максимальный диаметр закаливаемой детали, мм	400
Максимальная масса закаливаемой детали, кг	400
Максимальная длина закаливаемой зоны, мм	2500

лочного станка. Для очистки закалочной жидкости в конструкции станции предусмотрен специальный фильтр – магнитный грязевик-шламоотводитель. Слив охлаждающей жидкости из двух баков системы охлаждения станка осуществляется через сливные краны. Заливка новой охлаждающей жидкости производится через заливные горловины в верхних частях резервуаров хранения охлаждающей жидкости. Используемые закалочные жидкости: дисциллированная вода, Бреокс Термо А, Aquatensid BW 3 [6, 7]. Характеристики закалочной установки представлены в табл. 1.

Для моделирования процессов нагрева и охлаждения использовалась программа UNIVERSAL 2D, а в качестве исследуемых образцов – шток и ось спутника. Температурное поле цельной цилиндрической заготовки диаметром 50 мм и длиной 370 мм при непрерывно-последовательном режиме нагрева представлено на рис. 2. Мощность индукционной установки составляла 100 кВт, скорость движения – 10 мм/с. Применялось охлаждение дистиллированной водой с использованием станции подготовки охлаждающей жидкости, входившей в комплект установки, через спрейер, что обеспечивало скорость охлаждения до 100–130 °С/с.

Из рис. 2 видно, что заданные параметры мощности индукционной установки, скорости перемещения детали и системы охлаждения позволяют достичь требуемых значений температуры в поверхностном слое для получения мартенситной структуры. При этом наблюдается нагрев за счет тепла внутренних слоев в районе спрейера до температуры начала отпуска мартенсита (200 °С). Данное явление самоотпуска происходит по причине того, что программа не учитывает стекание воды по заготовке, расположенной вертикально. В то же время самоотпуск благотворно сказывается на снятии внутренних напряжений в закаленном слое и снижает риск хрупкого разрушения. Полученные зависимости используются для корректировки процесса закалки деталей различной геометрии. Так, для закалки полого штока диаметром 60 мм и толщиной стенки 10 мм (рис. 3) выбрана мощность $N = 100$ кВт. Относительная же скорость движения детали относительно источника переменного поля, необходимая для упрочнения только ее поверхности, выбрана равной $V = 13$ мм/с.

Первое пересечение кривой 1 и кривой 3 (см. рис. 3) показывает, что температура на поверхности (R) становится значительно ниже температуры на глубине $R/2$. Именно в данной зоне располагается закалочный спрейер. Отсюда следует, что температура поверхности под спрейером охлаждается быстрее, чем глубинные слои относительно радиуса $R \rightarrow 0$. В то же время средняя температура в зоне закалки достаточна для получения нужной структуры металла (рис. 4).

Согласно технологическому процессу закалка деталей производится с использованием закалочных жидкостей, что зависит от теплофизических, физико-механических свойств объекта обработки, а также его геометрии. Например, дистиллированная, деминерализованная или техническая вода используется для закалки среднеуглеродистых сталей типа 35, 40, 45, 40Х. Водные же растворы полимеров, аквапластов либо других закалочных жидкостей используются для закалки легированных сталей типа 40ХН, 45ХН2МФА, 35ХГСА или деталей сложной геометрической формы с концентраторами напряжений в виде шлицев, шпонок, острых кромок и т. д. Для обеспечения этого условия станция подготовки закалочной жидкости (не изображенная на рис. 1, но входящая в состав оборудования) имеет два бака-накопителя. Подача закалочной жидкости к спрейеру и щекам (креплениям к генератору) индуктора осуществляется насосами, расположенными на станции подготовки закалочной жидкости, а насосы откачки размещены на станине зака-

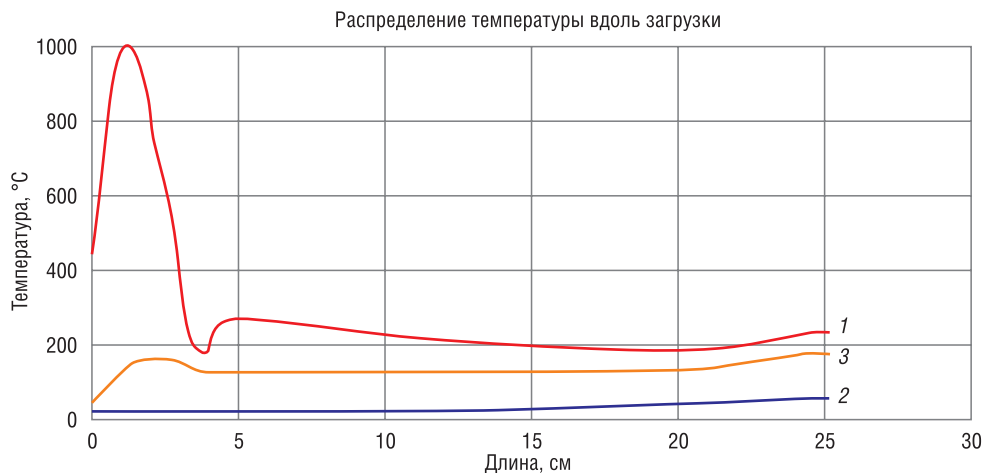


Рис. 2. Температурное поле заготовки при непрерывном режиме нагрева на конечной стадии: 1 – температура на поверхности заготовки, 2 – в окрестности ее оси, 3 – средняя температура $R/2$ (R – относительный радиус цилиндра в диапазоне от центра (0) до поверхности (1))

Fig. 2. Temperature field of the workpiece during continuous heating at the final stage: 1 – surface temperature; 2 – temperature in the center, 3 – average temperature $R/2$ (R is the relative radius of the cylinder in the range from center (0) to surface (1))

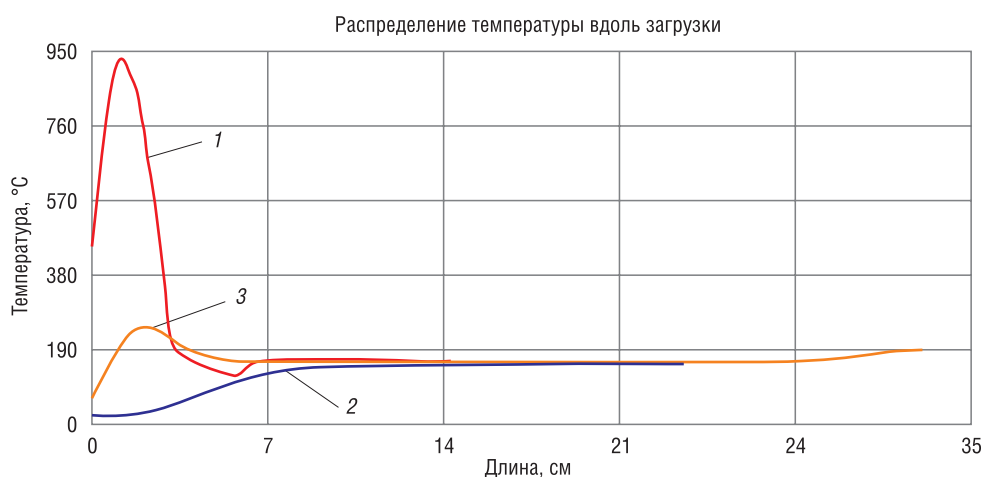


Рис. 3. Температурное поле штока в конечный момент времени при непрерывной закалке: 1 – температура на поверхности заготовки, 2 – в окрестности ее оси, 3 – средняя температура $R/2$ (где R – относительный радиус цилиндра в диапазоне от центра (0) до поверхности (1))

Fig. 3. Temperature field of the rod at a finite point in time during continuous hardening: 1 – surface temperature, 2 – temperature in the center, 3 – average temperature $R/2$ (R is the relative radius of the cylinder in the range from center (0) to surface (1))

С увеличением диаметра нагреваемой детали возрастает мощность индукционной установки. На продолжительность процесса также влияет толщина стенки трубы (детали, заготовки). Для тонкостенных же труб с толщиной стенки 5 ± 1 мм во многих случаях выполняется сквозная закалка. Для труб с толщиной стенки 10 мм и более – поверхностная или глубинная (в зависимости от требований чертежа). На эффективности процесса закалки также сказывается и наружный диаметр трубы. В табл. 2 представлены сравнительные параметры технологического процесса поверхностной закалки труб с наружным радиусом $R = 20\text{--}100$ мм и толщиной стенки $h = 5\text{--}18$ мм.

При закалке на глубину 3–5 мм прежде всего необходимо понижение рабочей частоты генератора f , что сопровождается увеличением толщины скин-слоя и выделением тепла в более глубоких слоях детали. К примеру, для такой детали, как ось спутника, может быть использована рабочая частота генератора в диапазоне $f = 10\text{--}20$ кГц. Для прогрева детали на нужную глубину требуется повышение времени выдержки и снижение мощности нагрева. Если же объектом

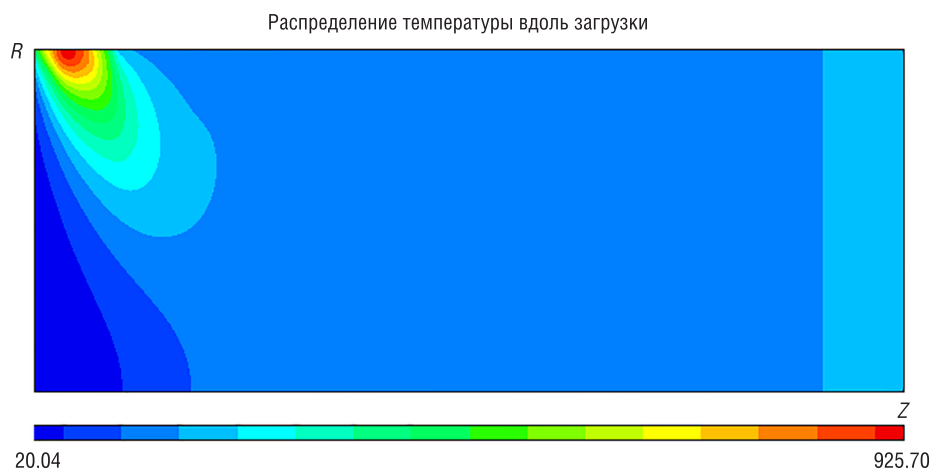


Рис. 4. Температурное поле штока

Fig. 4. Temperature field of the rod

Таблица 2. Параметры нагрева под закалку труб различного радиуса и толщины стенки

Table 2. Heating parameters for hardening pipes of various radius and wall thickness

Геометрические размеры, мм	Частота, кГц	Мощность генератора, кВт	Скорость перемещения, мм/с	Требуемая величина закаленного слоя, мм
$R = 20$ мм, $h = 5$ мм	70	120	25	1,2–1,7 мм
$R = 40$ мм, $h = 8$ мм	70	150	20	1,2–1,7 мм
$R = 40$ мм, $h = 25$ мм	30	100	7	2,5–4,0 мм
$R = 50$ мм, $h = 10$ мм	60	150	21	≥ 2 мм
$R = 80$ мм, $h = 10$ мм	30	170	12	1,5–2,2 мм
$R = 80$ мм, $h = 18$ мм	10	100	2	3–5 мм
$R = 100$ мм, $h = 31$ мм	10	160	3	≥ 3 мм

Альтернативным вариантом может быть нагрев детали при мощности 110 кВт и величине $f = 10$ кГц при скорости перемещения детали $V = 1,8$ мм/с (рис. 6). Однако при закалке следует учесть и возможное удлинение заготовки. Неизменность частоты генератора (в сравнении с предыдущим вариантом) обусловлена глубиной закаливаемого слоя. Причем при такой скорости перемещения необходимо применение охлаждающей жидкости (или режима охлаждения) с более высоким коэффициентом теплоотдачи для достаточно быстрого охлаждения глубоких слоев детали.

Полученные в ходе экспериментальных исследований результаты позволили установить оптимальные режимы нагрева всей номенклатуры деталей для закалки токами высокой частоты (ТВЧ) на разработанном оборудовании. Проведены тестовые испытания с последующим исследованием структуры и физико-механических свойств упрочненных деталей на предмет соответствия техническому заданию. В настоящее время нами разрабатывается система автоматизации с учетом возможных режимов (диапазонов) термообработки деталей указанной спецификации.

Необходимо отметить, что при разработке технологии рассматриваемого способа закалки деталей и повышенных требованиях к качеству их упрочнения непосредственно в процессе

закалки является деталь в виде полого цилиндра, то при глубинной закалке стенки детали мощность генератора и его частоту понижают более значительно. На рис. 5 показано температурное поле в зоне индуктор–спрейер по истечении 90 с нагрева. Параметры нагрева: мощность 25 кВт, скорость перемещения детали относительно индуктора 0,4 мм/с, $f = 5$ кГц, охлаждение спрейерное.

При данных параметрах обеспечивается нагрев детали на глубину до 5 мм. Охлаждение детали производится не только в зоне расположения спрейера, но и вне ее. Однако с увеличением диаметра (а следовательно, и массы) сплошной заготовки наблюдается соразмерное снижение к.п.д. оборудования. Это обусловлено отводом тепла вглубь заготовки, что делает нагрев зоны закалки достаточно длительным. В таких случаях рекомендуется применять многвитковые индукторы или использовать предварительный нагрев детали.

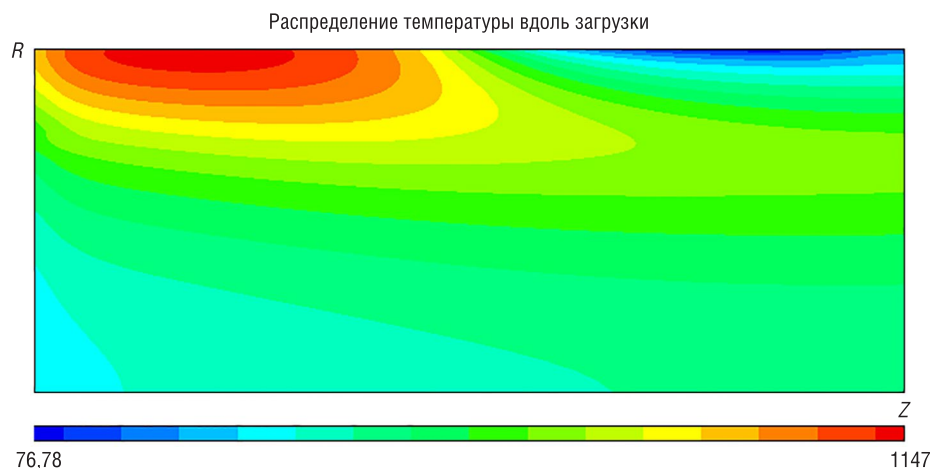


Рис. 5. Температурное поле стальной заготовки радиусом 60 мм, применяемое для создания закаленных слоев большой глубины

Fig. 5. Temperature field of the steel billet with a radius of 60 mm when heated under deep quenching

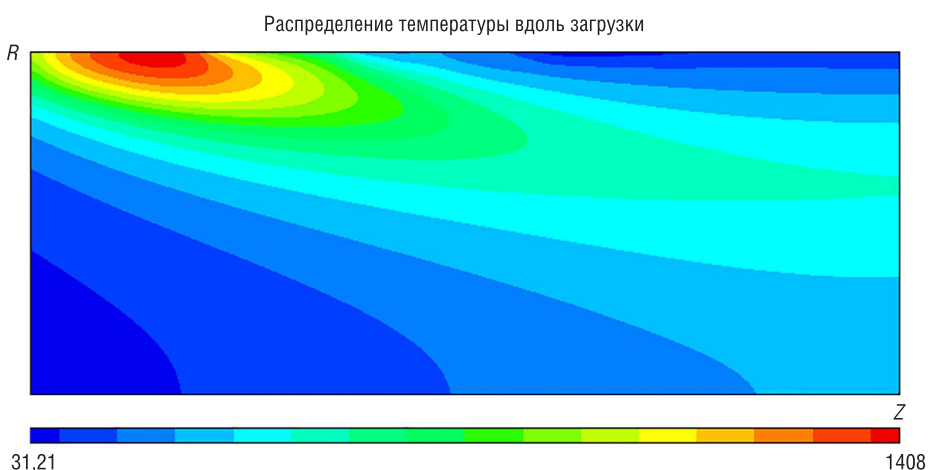


Рис. 6. Альтернативный вариант нагрева цилиндрической детали радиусом 60 мм для получения большой толщины упрочненного закалкой токами высокой частоты слоя металла.

Fig. 6. An alternative option for heating the part with a radius of 60 mm for deep hardening

производства рекомендуется использовать методы неразрушающего контроля. Как показывают данные проведенного нами информационного поиска и опытных испытаний, наиболее перспективным является именно ультразвуковой метод диагностирования глубины упрочненных слоев, разработанный в лаборатории ультразвуковых методов диагностики Института прикладной физики НАН Беларуси [8, 9]. Этот метод может быть использован не только для контроля упрочнения деталей закалкой ТВЧ, но и цементированием, лазерным отжигом, азотированием и др. Суть его заключается в наличии стабильной корреляции между изменением твердости металла $\Delta B = B_0 - B(z)$ (где $B(z)$ – твердость на глубине z) и скорости поверхностной волны (ПАВ) $\Delta C_{\text{ПАВ}} = C_0 - C(z)$ (где $C(z)$ скорость волны на глубине z) по высоте упрочненного слоя, где $\Delta C_{\text{ПАВ}}$ зависит от частоты f или длины зондирующей волны $\lambda_{\text{ПАВ}}$. Причем в [9] показана принципиальная возможность восстановления зависимости $B(z)$ исходя из скорости ПАВ, измеренной на характерных частотах f_i .

Реализованный в виде ультразвукового прибора (типа ИЧ) метод внедрен на ряде предприятий России, Беларуси и Южной Кореи. Погрешность измерения глубины упрочненного слоя от 0,3 мм и выше составляет 10–15 %. Контролируемая же поверхность может иметь форму цилиндра радиусом от 5 мм и более, галтельного перехода, зубчатого колеса, лезвия и др. Кроме того,

в [9] показана принципиальная возможность восстановления зависимости изменения твердости упрочняемого слоя по его глубине $B(z)$ по данным скорости поверхностной волны (ПАВ) на характерных частотах f_i . Другой же путь заключается в проведении анализа изменения спектра импульсного сигнала, прошедшего характерное расстояние L между двумя приемными преобразователями.

Заключение. Представлены результаты разработки и функционирования индукционного закалочного комплекса, предназначенного для поверхностной закалки деталей цилиндрической формы разной геометрии. Приведены примеры моделирования процессов термообработки деталей с использованием программы UNIVERSAL 2D, начиная от момента получения данных о закаленном слое конкретной детали до момента определения технологии закалки, типа используемого индуктора и необходимых параметров закалки, включая частоту и амплитуду возбуждаемого тока в индукторе, величину зоны нагрева и охлаждения, скорость взаимного перемещения детали и индуктора, а также тип и давление закалочной жидкости. В зависимости от условий предложены возможные пути корректировки параметров индукционного нагрева для получения глубины и твердости упрочненных слоев и деталей нужного размера. В особенности это касается этапа моделирования режимов нагрева, когда объектом обработки служат крупные заготовки. Разработанную установку и режимы можно использовать для индукционной термообработки различной номенклатуры стальных изделий во всех областях промышленности. В том числе возможна обработка сложных поверхностей (плоских, шаровых, многогранных) при наличии физической возможности доступа и специально разработанной оснастки.

Список использованных источников

1. Demidovich, V.B. Control of inductors for formation of the required temperature profile in tasks of control and design / V. B. Demidovich, F. V. Chmilenko, I. I. Rastvorova // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – 2018. – Vol. 194. – Art. 062029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/194/6/062029>
2. Demidovich, V. B. A combined method of simulation of an electric circuit and field problems in the theory of induction heating / V. B. Demidovich, I. I. Rastvorova // Russ. Electr. Engin. – 2014. – Vol. 85, №8. – P. 536–540. <https://doi.org/10.3103/S1068371214080057>
3. Головин, Г. Ф. Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева / Г. Ф. Головин, Н. В. Зимин. – Л.: Машиностроение, 1979. – 120 с.
4. Горбунов, А. Д. Расчет нестационарных температур и термических напряжений при вычислении коэффициента теплообмена, учитывающего излучение / А. Д. Горбунов, С. В. Уклеина // Проблемы региональной энергетики. – 2016. – №2. – С. 69–76.
5. Андрушкевич, В. В. Энергоэффективные технологии с применением индукционного нагрева в трубной промышленности: дис. ... канд. техн. наук : 05.09.10 / В. В. Андрушкевич. – СПб., 2016. – 141 л.
6. Гуль, Ю. П. Современные аспекты закалочного охлаждения стали / Ю. П. Гуль, В. С. Чмелева, В. В. Кириченко // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1989. – №9. – С. 2–6.
7. Totten, G. E. Canale L. C. F. Polymer Quenchants / G. E. Totten // Encyclopedia of Materials: Science and Technology. – Elsevier, 2005. – P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043152-6/02036-2>
8. Особенности возбуждения ПАВ в металлах с поверхностным упрочненным слоем / А. П. Баев [и др.] // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2012. – №3. – С. 12–16.
9. Особенности распространения поверхностных и подповерхностных волн в объектах со слоистой структурой. Ч. 2. Упрочненный неоднородный поверхностный слой / А. П. Баев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10, №1. – С. 69–79. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2019-10-1-69-79>

References

1. Demidovich V. B., Chmilenko F. V., Rastvorova I. I. Control of inductors for formation of the required temperature profile in tasks of control and design. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 194, art. 062029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/194/6/062029>
2. Demidovich V. B., Rastvorova I. I. A combined method of simulation of an electric circuit and field problems in the theory of induction heating. *Russian Electrical Engineering*, 2014, vol. 85, no. 8, pp. 536–540. <https://doi.org/10.3103/S1068371214080057>
3. Golovin G. F., Zimin N. V. *Technology of Heat Treatment of Metals with the Use of Induction Heating*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1979. 120 p. (in Russian)
4. Gorbunov A. D. Calculation of non-stationary temperatures and thermal stresses in the calculation of the heat-transfer coefficient taking radiation into account. *Problemy regional'noi energetiki = Problems of the Regional Energetics*, 2016, no. 2, pp. 69–76 (in Russian).

5. Andrushkevich V. V. *Energy-Efficient Technologies with the Use of Induction Heating in the Pipe Industry*. St. Petersburg, 2016. 141 p. (in Russian).
6. Gul Y. P., Chmелеva V. S., Kirichenko V. V. Modern aspects of quenching of steel cooling. *Metalovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal Science and Heat Treatment*, 1989, no. 9, pp. 2–6 (in Russian).
7. Totten G. E., Canale L. C. F. Polymer Quenchants. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. Elsevier, 2005. Pp. 1–11. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043152-6/02036-2>
8. Baev A. R., Mayorov A. L., Asadchaya M. V., Konvalov G. E. Peculiarities of surfactant excitation in metals with a surface hardened layer. *Nerazrushayushchii kontrol' i diagnostika [Non-Destructive Testing and Diagnostics]*, 2012, no. 3, pp. 12–16 (in Russian).
9. Baev A. R., Mayorov A. L., Levkovich N. V., Asadchaya M. V. Features of the Surface and Subsurface Waves Application for Ultrasonic Evaluation of Physicomechanical Properties of Solids. Part 2. Strengthened Inhomogeneous Surface Layer. *Pribory i metody izmerenii = Devices and Methods of Measurements*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 69–79 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2019-10-1-69-79>

Информация об авторах

Вегера Иван Иванович – кандидат технических наук, доцент, заведующий отделом индукционных технологий и термической обработки, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: smtotut.by

Матальго Алексей Игоревич – магистр технических наук, младший научный сотрудник лаборатории «Технологии и оборудование индукционного нагрева», Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: matalyshka@mail.ru

Скавыш Илья Александрович – магистр технических наук, младший научный сотрудник лаборатории «Технологии и оборудование индукционного нагрева», Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Ilja.skawish@gmail.com

Цыкунов Павел Юрьевич – магистр технических наук, младший научный сотрудник лаборатории «Технологии и оборудование индукционного нагрева», Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: zamaranthz@mail.ru

Information about the authors

Ivan I. Vegeera – Ph. D. (Engineering), Head of the Department of Induction Technologies and Heat Treatments, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: smtotut.by

Aleksey I. Matalygo – Master (Engineering), Junior Researcher of the Laboratory of Induction Heating Technology and Equipment, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: matalyshka@mail.ru

Ilya A. Skavysh – Master (Engineering), Junior Researcher of the Laboratory of Induction Heating Technology and Equipment, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Ilja.skawish@gmail.com

Pavel Yu. Tsykunov – Master (Engineering), Junior Researcher of the Laboratory of Induction Heating Technology and Equipment, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zamaranthz@mail.ru