

УДК 621.03:699.017:621.9.004.12

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.260319.36.299

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ НОВЫХ И СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ РЕЛЬСОВ

ДЕЙНЕКО Л. Н.<sup>1\*</sup>, *д. т. н., проф.*,  
МОСКАЛЕНКО А. А.<sup>2</sup>, *к. т. н., ст. н. с.*,  
ПЕРЧУН Г. И.<sup>3</sup>, *к. т. н., доц.*

<sup>1\*</sup> Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (095) 653-54-14, e-mail: [leonid\\_deyneko@i.ua](mailto:leonid_deyneko@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-1177-3055

<sup>2</sup> Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2-а, 03142, Киев, Украина, тел. +38 (067) 973-80-00, e-mail: [an.moskalenko@gmail.com](mailto:an.moskalenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-4427-3636

<sup>3</sup> Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (050) 698-21-52, e-mail: [perchun\\_galina@ukr.net](mailto:perchun_galina@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-9013-4659

**Аннотация.** *Цель работы* – определить параметры режима нагрева головки рельса широкой колеи производства металлургического комбината "Азовсталь" (г. Мариуполь) с использованием токов высокой частоты (ТВЧ) и характеристики оборудования, которые необходимы для получения слоя упрочненного металла на глубину 22 мм от поверхности катания в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685-2013. *Методики исследования:* аналитическая и экспериментальная. *Результаты исследований* показали, что для достижения нормируемой глубины упрочненного слоя металла в головке термически обработанных рельсов необходимо определить рациональные величины частоты тока, мощности, подводимой к индуктору, времени нагрева и др. параметры, для чего в лабораторных условиях с привлечением отечественного аппаратно-программного обеспечения провести необходимые эксперименты, что позволит существенно сократить затраты на создание промышленных мощностей для изготовления рельсов с нормируемым уровнем свойств и повысить информативность получаемых результатов. *Научная новизна* результатов исследований определяется параметрами разработок и их влиянием на процессы структурообразования и свойства металла упрочненного слоя головки рельса. *Практическая значимость* разработки заключается в возможности использования их для реконструкции существующего оборудования РБЦ ПАО «МК АЗОВСТАЛЬ».

*Ключевые слова:* рельс широкой колеи; установка для нагрева ТВЧ; структура; твердость

## ВИКОРИСТАННЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ НОВИХ ТА ІСТІСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ І ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ТЕРМІЧНОГО ЗМІЦНЕННЯ РЕЙОК

ДЕЙНЕКО Л. М.<sup>1\*</sup>, *д. т. н., проф.*,  
МОСКАЛЕНКО А. О.<sup>2</sup>, *к. т. н., ст. н. с.*,  
ПЕРЧУН Г. І.<sup>3</sup>, *к. т. н., доц.*

<sup>1\*</sup> Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 653-54-14, e-mail: [leonid\\_deyneko@i.ua](mailto:leonid_deyneko@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-1177-3055

<sup>2</sup> Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2-а, 03142, Київ, Україна, тел. +38 (067) 973-80-00, e-mail: [an.moskalenko@gmail.com](mailto:an.moskalenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-4427-3636

<sup>3\*</sup> Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 698-21-52, e-mail: [perchun\\_galina@ukr.net](mailto:perchun_galina@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-9013-4659

**Анотація.** *Мета роботи* – визначити параметри режиму нагріву головки рейки широкої колії виробництва металургійного комбінату «Азовсталь» (м. Маріуполь) з використанням струму високої частоти (СВЧ) та характеристики обладнання, яке необхідне для отримання зміцненого шару металу на глибині 22 мм від поверхні катання згідно до вимог ГОСТ Р 51685-2013. *Методики* : аналітична та експериментальна. *Результати досліджень* показали, що для досягнення нормованої глибини зміцненого шару металу у головці термічно зміцнених рейок необхідно визначити раціональні величини частоти струму, потужності, яка підводиться до індуктора, часу нагріву та інші параметри, для чого в лабораторних умовах з використанням вітчизняного апаратно-програмного забезпечення провести необхідні експерименти, що дозволить суттєво скоротити витрати на створення промислових потужностей для виготовлення рейок з нормованим рівнем властивостей та підвищити інформативність отриманих результатів. *Наукова новизна* результатів досліджень визначається параметрами розробки та їх впливом на процеси структуроутворення і властивості металу зміцненого шару

головки рейки. *Практична значимість* розробки полягає у можливості використання їх для реконструкції діючого обладнання РБЦ ПАО «МК АЗОВСТАЛЬ».

*Ключові слова:* рейка широкої колії; установка для нагріву СВЧ; структура; твердість

## USE OF THE FIRMWARE FOR OPTIMIZATION OF THE NEW AND EXISTING TECHNOLOGIES AND THE EQUIPMENT FOR THERMAL HARDENING OF RAILS

DEINEKO L.N.<sup>1\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
MOSCALENKO V.O.<sup>2</sup>, *Ph. D., Sen. Res.*,  
PERCHYN G.I.<sup>3</sup>, *Ph. D., Ass. Prof.*

<sup>1\*</sup> National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Gagarina ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (095) 653-54-14, e-mail: [leonid\\_deyneko@i.ua](mailto:leonid_deyneko@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-1177-3055

<sup>2</sup> Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, 2-a, Zhelyabova str, 03142, Kyiv, Ukraine, tel. +38 (067) 973-80-00, e-mail: [an.moskalenko@gmail.com](mailto:an.moskalenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-4427-3636

<sup>3\*</sup> National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Gagarina ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 698-21-52, e-mail: [perchun\\_galina@ukr.net](mailto:perchun_galina@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-9013-4659

**Abstract. The work purpose** – to determine parameters of the mode of heating of a head of a rail of a broad track of production of “Azovstal metallurgical works” (Mariupol) with use of the currents of high frequency (CHF) and also characteristics of an inventory which are necessary for receiving a layer of the strengthened metal on depth of 22 mm from the surface of rolling metal according to requirements of GOST P 51685-2013. **Research techniques:** analytical and the experimental. **Results of researches** showed that for achievement of the normalized depth of the strengthened metal layer in a head of thermally processed rails it is necessary to determine rational magnitudes of frequency of current, the power brought to an inductor, heating time, etc. parameters. For this purpose necessary experiments with engaging of the domestic firmware are made and it allowed to reduce significantly expenses of capacities for manufacture of rails with the normalized level of properties. **The scientific novelty** of results of researches is defined by parameters of developments and their influence on processes of structurization and property of metal of the strengthened rail head layer. **The practical significance** of development consists in a possibility of their use for reconstruction of the existing inventory of RBTs PJSC «МК AZOVSTAL».

*Keywords:* rail of a broad track; installation for heating of CHF; structure; hardness

В металлургии и машиностроении постоянно осваиваются новые материалы (или оптимизируются существующие составы сталей и сплавов), изделия и технологии их изготовления, для которых необходимо разрабатывать параметры их горячей деформации и термической обработки (предварительной и финишной). К наиболее затратным процессам в технологической цепочке изготовления металлоизделий ответственного назначения относится тепловая (термическая) обработка, связанная с неоднократными высокотемпературными нагревами металла и охлаждением для обеспечения ему требуемого структурного состояния. Достижение высококачественного состояния металлов и сплавов в процессе их термической или термомеханической обработки с отдельного или деформационного нагрева часто связано с процессами принудительного охлаждения металлоизделий с различной интенсивностью для достижения требуемого структурного и напряженного состояния в металле и его свойств. При этом с повышением уровня легированности обрабатываемых сталей и сплавов ужесточаются требования по скорости нагрева, времени изотермической выдержки и скорости охлаждения как на стадиях предварительной

термической обработки слитков и поковок, так и при финишной термической обработке готовых изделий (в соответствии с значениями коэффициентов Био или числа Старка). Это связано, прежде всего, с возникновением термических и структурных напряжений при нагреве и охлаждении металлоизделий, превышение которых выше критических уровней приводит к короблению, деформации изделий и растрескиванию металла.

Для реализации новых или оптимизации существующих технологий упрочняющих обработок, разработки конструктивных параметров охлаждающих устройств и подборе наиболее приемлемых закалочных сред требуется проведение достаточно большого количества дорогостоящих лабораторных и опытно-промышленных исследований для определения наиболее приемлемых параметров нагрева, выдержки и охлаждения. В такой ситуации эффективно применение моделирования указанных процессов с целью корректировки существующих температурно-временных параметров нагрева, выдержки и охлаждения изделий. Но для этого требуется наличие аппаратно-программного обеспечения и квалифицированного персонала, способного выполнять такие исследования или проводить

экспертные заключения. В мировой практике производства металлоизделий (особенно крупногабаритных) такое направление давно интенсивно развивается, но при этом стоимость таких услуг остается достаточно высокой. Среди отечественных разработок уже существуют конкурентоспособные решения, которые пока используются авторскими коллективами недостаточно широко. И это связано, прежде всего, с недопониманием производителями (заказчиками) преимуществ совмещения таких аппаратно-программных разработок с большим практическим опытом ученых (экспертов), которые пытаются расширить сферу их использования и уменьшить сроки и стоимость разработки пилотных вариантов технологий.

В данной работе для решения таких достаточно сложных промышленных задач эффективно моделирование процессов термообработки с использованием программы IQLab [1; 2], которая предусматривает возможность использования любой термокинетической или изотермической диаграммы распада аустенита с наложением на нее кривых охлаждения, обеспечивающих требуемое структурное состояние и свойства металла после термической обработки. Следует отметить, что в мировой практике промышленными предприятиями и исследователями используются достаточно много разнообразных зарубежных программных продуктов. Рассматриваемая разработка является отечественной. Такая разработка может эффективно использоваться как при создании новых режимов и технологий термической обработки металлоизделий самых разнообразных форм с использованием объемного охлаждения в баках различного типа, спрейерного водовоздушного или охлаждения диспергированной водой, так и при создании (или оптимизации существующих) конструктивных параметров закалочного оборудования. Примером эффективного применения программы (IQLab, версия – 2) и аппаратно-программного комплекса для диагностики процессов нагрева и нестационарного охлаждения стальных образцов, а также и тестирования закалочных сред является разработка параметров режима нагрева и охлаждения головок магистральных рельсов производства РБЦ ПАО «МК АЗОВСТАЛЬ» (г. Мариуполь\* – в работе принимали участие сотрудники ММК Азовсталь; НМетАУ – Данич В. А.; НПП Интехпром – Рыбалко Е. А., Рыбалко К. Е.; ОАО ТЕРМОЛИТ – Будрин Д. М.; ООО ТЕРМОЛИТ ПЛЮС – Романенко К. А. и др.

Проблема повышения эксплуатационной стойкости магистральных рельсов является актуальной для производителей всех стран и их потребителей в связи с ужесточением условий эксплуатации железных дорог (нагрузки на ось грузовых вагонов могут достигать до 35 т и выше, а скорость движения скоростных поездов повышаются до 250 км/ч и выше) и, соответственно, с

повышением требований к структуре и свойствам металла колес и рельсов.

В связи с переходом рельсового производства в странах Запада и СНГ на новые нормативные требования (EN 13674 –1: 2011; ГОСТ Р 51685-2013 – как межгосударственный для стран СНГ), предусматривающих увеличение глубины упрочненного слоя от поверхности катания рельса до 22 мм (взамен 11 мм по стандарту ДСТУ 4344) возникла необходимость в разработке новых систем поверхностного нагрева головки рельса токами высокой частоты (ТВЧ) и последующего ее охлаждения водо-воздушной смесью с соответствующей интенсивностью.

В данной статье рассматриваются некоторые результаты научно-исследовательской работы (режимы нагрева и охлаждения головки рельса), направленные на проработку новых параметров режима нагрева головки рельсов широкой колеи металлургического комбината "Азовсталь" (г. Мариуполь) с использованием индукционного нагрева<sup>x</sup>.

Промышленные предприятия Украины до 2014 года производили рельсы по стандарту ДСТУ 4344 : 2004 «Рельсы обычные для железных дорог широкой колеи. Общие технические условия» при глубине термически упрочненного слоя в головке рельса до 11 мм. По этой технологии термического упрочнения рельсов с нагрева ТВЧ (в условиях МК «Азовсталь» получение упрочненного слоя на глубину до 11 мм) скорость перемещения рельсов в агрегате для термического упрочнения до 40 мм/с, потребляемая мощность на один ручей 1500 кВт, частота тока 24 000 Гц, напряжение на индукторах 450 В, зазор между головкой рельса и индуктором 5...6 мм. В течение 120–130 секунд поверхность головки нагревается до 980...1 000 °С. Нагретый участок головки рельса, выйдя из под индуктора, 30–40 секунд движется к секции закалки и подстуживается на воздухе до температуры 880...900 °С перед принудительным охлаждением. В секции закалки осуществляется двухступенчатое охлаждение – сначала водо-воздушной смесью до температуры металла 350...400 °С в течение 70...75 сек, затем, после самоотпуска (охлаждение на воздухе с перераспределением тепла от внутренних объемов металла головки) в течение 90 с до температуры 430...480 °С, производится окончательное охлаждение водой головки рельса [3].

Согласно положениям стандарта СНГ ДСТУ 4344:2004 вводятся категории качества рельсов, при изготовлении которых предусмотрено проведение как объемной закалки с отпуском, так и дифференцированного термического упрочнения с прокатного или отдельного нагрева с целью получения в головке рельса структурного состояния – в соответствии с которыми микроструктура металла головки поверхностно-упрочненных рельсов должна представлять собой троостит, троосто –

сорбит или сорбит закалки с переходом к сорбитообразному перлиту и исходной перлитной структуре. Допускаются мелкие разрозненные участки феррита. Наличие структуры бейнита в упрочненном слое металла головки рельса не допускается. Поэтому при переходе на производство магистральных рельсов в соответствии с новыми нормативными требованиями заводу-изготовителю потребовалось провести корректировку параметров финишной термической обработки (нагрева и охлаждения) для достижения глубины термически упрочненного слоя до 22 мм от поверхности катания. При этом учитывались закономерности распределения температуры по сечению головки

рельса с использованием существующего в условиях МК «Азовсталь» оборудования.

Известно, что глубина проникновения магнитного потока и, соответственно, толщина нагреваемого вихревыми токами поверхностного слоя металлоизделия, увеличивается с уменьшением частоты тока и магнитной проницаемости металла и с увеличением удельного электрического сопротивления (при постоянной мощности тока индуктора). Для достижения глубины закаленного слоя свыше 20 мм (табл. 1) в технической литературе рекомендуется уменьшить используемую частоту тока до уровня ~ 800...500 Гц.

Таблица 1

Глубина проникновения тока в металлах при разных его частотах /  
Current penetration depth in metals with its different frequencies

Частота Гц	Глубина проникновения, мм		
	Медь при 15° С	Сталь при 15° С $\mu = 10 \div 40$	Сталь при 800° С $\mu = 1$
50	10,0	10,0—5,0	70,8
500	3,0	3,0—1,5	22,0
2 500	1,3	1,5—0,7	10,0
10 000	0,7	0,70—0,35	5,0
50 000	0,3	0,30—0,15	2,2
250 000	0,13	0,15—0,07	1,0
450 000	0,1	0,11—0,05	0,7

При рассмотрении вопроса корректировки параметров технологии нагрева головок рельсов и выбора соответствующего оборудования целесообразно привести известные данные по влиянию частоты тока, мощности, подводимой к индуктору и времени нагрева при выборе глубины закаленного слоя [4]. Повышение мощности тока ведет к увеличению скорости нагрева и плотности электромагнитного поля индуктора.

На рисунках 1 и 2 приведены данные по влиянию частоты тока, мощности и времени нагрева на глубину закаленного слоя образцов из сталей 45 и 40Х [4]. Из приведенных в качестве примера данных

наглядно видно, что для достижения глубины закаленного слоя 2 мм в детали из стали 40Х при частоте тока 8000Гц требуется подводимая мощность ~94 кВт при времени нагрева 1,5 сек, а для этой же глубины закаленного слоя (2 мм) при частоте тока 150 000 Гц требуется мощность ~36.37 кВт при времени нагрева 6,5...6,6 с, т. е. при высокой частоте тока (но меньшей подводимой мощности) металл будет находиться при высокой температуре аустенитизации в течение более длительного времени (в ~ 4 раза), что может привести к получению существенно более крупного зерна аустенита.

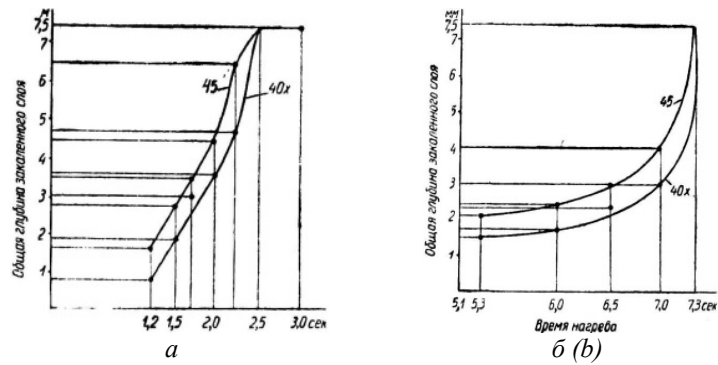


Рис. 1. а – Зависимость глубины закаленного слоя на образцах из стали 45 и 40Х от времени нагрева при частоте тока 8 000 Гц; б – зависимость глубины закаленного слоя на образцах из стали 45 и 40Х от времени нагрева при частоте тока 150 000 Гц / Fig. 1. а – The dependence of the depth of the hardened layer on samples of steel 45 and 40X on the heating time at a current frequency of 8,000 Hz ;b – the dependence of the hardened layer on samples of steel 45 and 40X on the heating time at a frequency of 150 000 Hz

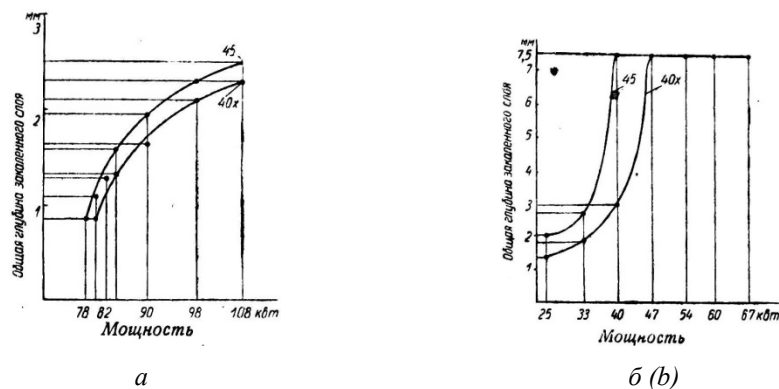


Рис. 2. а – Зависимость глубины закаленного слоя на образцах из стали 45 и 40Х от мощности тока индуктора при нагреве с использованием тока частотой 8000 Гц; б – зависимость глубины закаленного слоя на образцах из стали 45 и 40Х от мощности тока индуктора при нагреве с использованием тока частотой 150 000 Гц / Fig. 2. а – The dependence of the depth of the quenched layer on samples of steel 45 and 40X on the power of the current of the inductor when heated using a current of 8000 Hz; б – the dependence of the depth of the hardened layer on samples of steel 45 and 40X on the power of the inductor current when heated using a current frequency of 150,000 Hz

Поэтому при создании новых режимов нагрева головки рельса для выполнения требований ГОСТ Р 51685 целесообразно было отработать на образцах рельсов параметры режима (температура аустенитизации, время нагрева, равномерность нагрева по сечению) и подобрать рациональные параметры установки ТВЧ (частота тока, мощность тока индуктора, конфигурация индуктора и др.).

При разработке новых параметров режима нагрева ТВЧ использовались рельсовые заготовки длиной ~ 1 500 мм из товарной продукции (рельс Р65, высота рельса 180 мм, ширина головки 75 мм) из конвертерной стали марки К76Ф (С = 0,71...0,82 %; Mn = 0,75...1,25 %; Si = 0,25...0,6 %; S ≤ 0,020 %; P ≤ 0,020 %; V = 0,03...0,15 %; Cr ≤ 0,2 %; Al ≤ 0,004 %). В соответствии с требованиями нового стандарта ГОСТ Р 51685-2013 при производстве рельсов используют 7 марок сталей, при этом в состав всех сталей входит ванадий (до 0,15 %), а в 4 марки стали входит и азот (до 0,020 %). Кроме этого в этих сталях предусмотрена повышенная

концентрация кремния (до 0,6 %), а в стали 76ХСФ концентрация кремния и хрома повышены по сравнению с другими (соответственно, до 1,10 % и до 1,25 %). Наличие легирующих элементов в металле рельсов оказывает влияние на выбор параметров их режима термического упрочнения. Считается, что температура растворения карбидов ванадия при его малых содержаниях при печном нагреве находится в области температур  $\geq 900$  °С, но с учетом повышенной скорости нагрева (например при ТВЧ) эта температура повышается и, вероятно, зона растворения карбидов (карбонитридов) ванадия в такой стали будет находиться при более высоких температурах ~ 1 050 °С. Достижение температуры металла, при которой происходит растворение карбидов (карбонитридов) и ванадий переходит в твердый раствор и повышает устойчивость аустенита при закалке, обеспечивает повышение прочностных характеристик металла изделия. Известно, что при исследовании рельсовых сталей сотрудниками института материаловедения (Троцан А. И. и др.)

было установлено, что в разрывных образцах рельсовой конвертерной стали, на которых получены низкие значения относительного сужения, отсутствуют карбиды ванадия. Исходя из этого для обеспечения требуемого уровня относительного сужения целесообразно снижать температуру нагрева рельсов под закалку, при этом обеспечить, с учетом неоднородности распределения температуры при нагреве ТВЧ, глубину закаленного слоя.

При проведении экспериментов с целью подбора рациональных режимов нагрева головки рельса для получения глубины упрочненного слоя 22 мм использовалось оборудование фирмы Термолит (г. Мелитополь).

Исследование температурного поля в головке рельса при нагреве производили с использованием ранее описанных программного продукта и аппаратно-программного комплекса с учетом влияния таких технологических параметров термической обработки рельсов как частоты и мощности тока индуктора на глубину прогрева металла головки рельса (от плоскости скольжения) выше температуры критических точек.

На опытном стенде ООО «Термолит» с использованием промышленных рельсов (отрезки длиной 1 200 мм) производили отработку параметров нагрева головки рельса, изменяя при этом частоту тока, мощность тока индуктора и время нагрева. Нагрев осуществлялся по поверхности катания и боковым граням головки рельса непрерывно или непрерывно-последовательно до разных температур металла. Для определения параметров нагрева в головку опытных рельсов зачеканивали хромель-алюмеливые термопары (в соответствии с рис. 3) с диаметром электродов 0,12 мм при диаметре чехла из нержавеющей стали 3 мм и записывали кривые изменения скорости нагрева в течение времени (рис. 4–7). При подготовке и проведении исследований считали, что при индукционном нагреве распределение температуры в металле головки рельса происходит вдоль изотермических поверхностей, расположенных параллельно плоскости катания и друг другу. Представляло интерес температурное поле в объемах металла под радиусами скругления головки (в районе точки 5 на рис. 3).

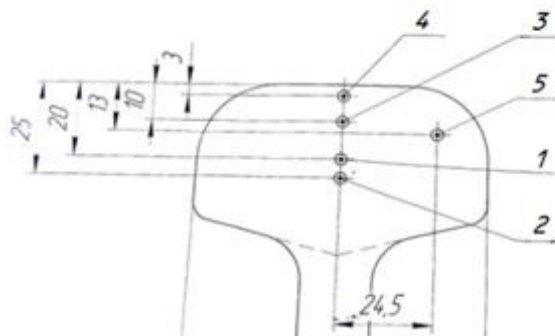


Рис. 3. Схема зачеканки термопар (ХА) в металл головки опытного рельса для записи кривых нагрева ТВЧ /  
Fig. 3. Scheme of thermopair stripping (HA) in the metal of the head of an experimental rail  
for recording the heating curves of HDTV

Известно, что при правильном нагреве сталей до температур аустенитизации при термическом упрочнении рельсов необходимо достигнуть в металле головки температурного интервала, при котором в обрабатываемом металле произойдут фазовое превращение перлита и структурно свободное феррита в аустенит и его гомогенизация до приемлемого уровня, особенно для сталей, содержащих в составе ванадий, азот, алюминий.

При индукционном нагреве, который характеризуется высокими температурами аустенитизации 950...1 150 °С, карбонитриды ванадия (VN; V(C, N) или карбиды ванадия (VC) являются эффективными барьерами, которые тормозят рост зерна аустенита. Их растворение в аустените при этом способе нагрева происходит при температурах выше 1 000...1 050 °С. При этом

важным фактором, влияющим на однородность структурного состояния термически обрабатываемого металла и его свойства, является равномерность нагрева металла по сечению головки рельса.

Поэтому при выборе частоты и мощности тока индуктора важной информацией являлась равномерность нагрева металла головки рельса на глубине 20...22 мм от поверхности катания, которую можно было видеть и фиксировать в режиме реального времени при использовании указанных разработок. На рисунках 4–7 приведены некоторые данные, касающиеся графиков температурных кривых индукционного нагрева металла головки рельса (частота – 700, 670 Гц; мощность на индукторе – 110 и 80 кВт) в сечениях, расположенных на глубине 5...20 мм от поверхности.

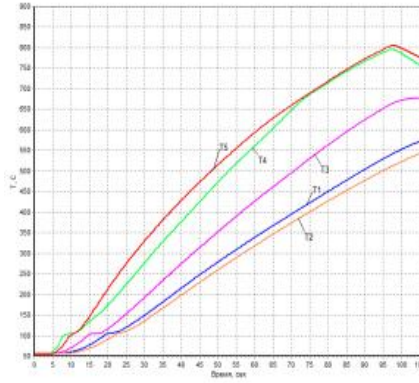


Рис. 4. Кривые нагрева металла головки рельса ТВЧ (частота – 700 Гц; мощность на индукторе – 110 кВт) в разных точках сечения головки (рис. 3) в течение 105 секунд с момента начала работы индуктора / Fig. 4. Heating curves of the metal of the HDTV rail head (frequency – 700 Hz; power on the inductor is 110 kW) at different points of the head cross section (fig. 3) for 105 seconds from the moment the inductor began operation

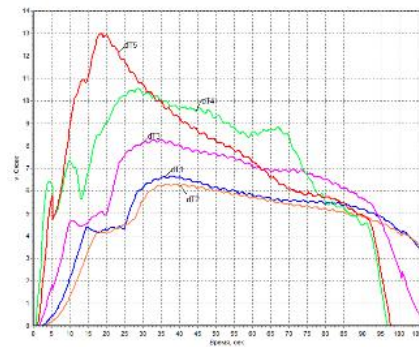


Рис. 5. Кривые распределения интенсивности нагрева (°C/с) ТВЧ металла головки рельса в разных точках сечения головки (рис. 3) в течение 105 секунд с момента начала работы индуктора / Fig. 5. Distribution curves of the heating intensity (°C/sec) of the high-frequency metal of the rail head at different points in the cross section of the head (fig. 3) for 105 seconds from the moment the inductor began operating

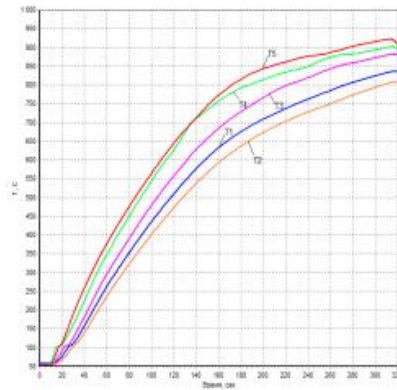


Рис. 6. Кривые нагрева металла головки рельса ТВЧ (частота – 670 Гц; мощность на индукторе – 80 кВт) в разных точках сечения головки (рис. 3) в течение 320 секунд с момента начала работы индуктора / Fig. 6. Heating curves of the metal of the HDTV rail head (frequency – 670 Hz; power on the inductor – 80 kW) at different points of the head cross section (fig. 3) for 320 seconds from the moment the inductor began operation

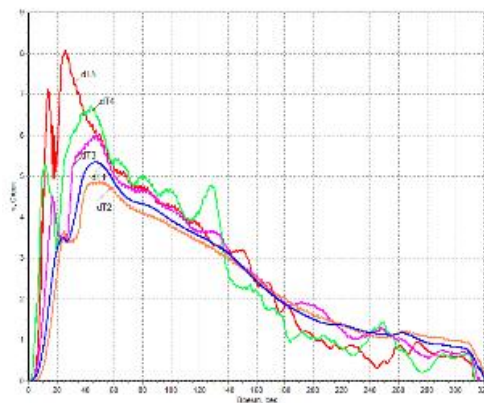


Рис. 7. Кривые распределения интенсивности нагрева ( $^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ) ТВЧ металла головки рельса в разных точках сечения головки (рис. 3) в течении 320 секунд с момента начала работы индуктора / Fig. 7. Distribution curves of the heating intensity ( $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ) of the high-frequency metal of the rail head at different points in the cross section of the head (fig. 3) for 320 seconds after the inductor began operation

Результаты исследований показали целесообразность использования при выполнении исследовательских работ (а также и при внедрении новых режимов в производство) отечественного

аппаратно-программного обеспечения, что позволяет существенно сократить затраты на их проведение и повысить информативность получаемых результатов.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Добривечер В. В. Программный комплекс “IQLab”, коммерчески распространяемый ТОВ «Интенсивные технологии ЛТД» ([iqlab@itl.kiev.ua](mailto:iqlab@itl.kiev.ua)) / В. В. Добривечер, Е. Н. Зотов, Н. И. Кобаско, В. С. Моргунок, Ю. В. Сергеев.
2. Зотов Е. Н. Использование программы IQLab для выбора оптимальных режимов процесса термообработки стальных изделий / Е. Н. Зотов, А. А. Москаленко, В. В. Добривечер, Н. И. Кобаско, Л. Н. Дейнеко // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов (ОТТОМ-6). – Ч. 1. – Харьков : ННЦ ХФТИ, ИПЦ «Контраст», 2005. – С. 106–115.
3. Оборудование термических цехов, технологии термической и комбинированной обработки металлопродукции : монография / [В. И. Большаков, И. Е. Долженков, А. В. Зайцев]. – Днепропетровск : РИА Днепр-VAL, 2010. – 619 с.
4. Ассонов А. Д. Высокочастотный нагрев в процессах поверхностного упрочнения / А. Д. Ассонов, Ю. С. Золотаревский, А. И. Попова // Структура и свойства термически обработанной стали. – Москва : Машгиз, 1951. – С. 34–47.

#### REFERENCES

1. Dobrivecher V.V., Zotov E.N., Kobasko B.I., Morgunuk V.S. and Sergeyev Yu.V. *Programmnyiy kompleks “IQLab”, kommercheski rasprostranyaemyiy TOV «Intensivnyie tehnologii LTD» ([iqlab@itl.kiev.ua](mailto:iqlab@itl.kiev.ua))* [Software complex “IQLab”, commercially distributed TOV “Intensive Technologies LTD”]. (in Russian).
2. Zotov E.N., Moskalenko A.A., Dobrivecher V.V., Kobasko N.I. and Deyneko L.N. *Ispolzovanie programmy IQLab dlya vyibora optimalnyih rejimov protsesssa termoobrabotki stalnyih izdeliy* [Using the IQLab program to select the optimal modes of the process of heat treatment of steel products]. *Oborudovanie i tehnologii termicheskoy obrabotki metallov i splavov (OTTOM-6)* [Equipment and technologies for heat treatment of metals and alloys (OTTOM-6)]. Part 1, Kharkiv : NNTS HFTI, IPTS «Kontrast», 2005, pp. 106–115. (in Russian).
3. Bolshakov V.I., Doljenkov I.E. and Zaytsev A.V. *Oborudovanie termicheskikh tsehov, tehnologii termiche-skoy i kombinirovannoy obrabotki metalloproduksii* [Оборудование термических цехов, технологии термической и комбинированной обработки металлопродукции : монография]. Dnipropetrovsk : RIA Dnepr-VAL, 2010, 619 p. (in Russian).
4. Assonov A.D., Zolotarevskiy Yu.S. and Popova A.I. *Vyisokochastotnyiy nagrev v protsessah poverhnostnogo uprochneniya* [High-frequency heating in surface hardening processes]. *Struktura i svoystva termicheskoi obrabotannoy stali* [Structure and properties of heat-treated steel]. Moscow : Mashgiz Publ., 1951, pp. 34–47. (in Russian).

Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. В. И. Большаковым (Украина), д-ром техн. наук, проф. В. С. Вахрушевой (Украина).

Поступила в редакцию 28.03.2019.

Принята в печать 05.04.2019.