$$-\frac{\partial T(R_0,\tau)}{\partial r}+\frac{\alpha}{\lambda}\cdot\left[T_C-T(R_0,\tau)\right]=0. \qquad (24)$$

Здесь R_0 – радиус капли; T_0 – начальная температура капли; $T_C > T_0$ – температура окружающей среды; α – коэффициент теплоотдачи; λ – коэффициент теплопроводности капли; ω – удельная мощность источника теплоты; C – удельная теплоемкость; γ – плотность капли; a – коэффициент температуропроводности, зависящий от температуры; τ – время; r – текущий радиус капли.

Тестирование решения задачи при ω = *const* проводим по формуле [1]:

$$\theta=\frac{T_{(r,\tau)}-T_0}{T_C-T_0}=1+\frac{1}{6}\cdot P_0\cdot\left(1+\frac{2}{B_i}-\frac{r^2}{R_0^2}\right)-$$

$$-\sum_{n=1}^{\infty}\left(1+\frac{P_0}{\mu_n^2}\right)\cdot A_n\cdot\frac{R_0\cdot\sin\left(\mu_n\cdot\frac{r}{R_0}\right)}{r\cdot\mu_n}\cdot\exp\left(-\mu_n^2\cdot F_0\right), \qquad (25)$$

где $P_0=\frac{\omega\cdot R_0^2}{\lambda\cdot(T_C-T_0)}$ – критерий Померанцева; $\mathrm{Bi}=\frac{\alpha\cdot R_0}{\lambda}$ – число Био; $F_0=\frac{a\cdot\tau}{R_0^2}$ – число Фурье; A_n – начальные тепловые амплитуды, определяемые соотношением:

$$A_n=(-1)^{n+1}\cdot\frac{2\mathrm{Bi}\cdot\sqrt{\mu_n^2+(\mathrm{Bi}-1)^2}}{\mu_n^2+\mathrm{Bi}^2-\mathrm{Bi}}. \qquad (26)$$

Если $\mathrm{Bi}\to\infty$, то $\mu_n = n\cdot\pi$, $A_n = (-1)^{n+1}\cdot 2 = 2\cdot(-1)^{n+1}$.

Если Bi = 1, то

$$\mu_n = (2n-1)\cdot\pi/2,\ A_n = (-1)^{n+1}\cdot 2/\mu_n. \qquad (27)$$

При малых значениях Bi (Bi → 0) все коэффициенты $A_n \to 0$, за исключением первого ($A_1 = 1$), а $\mu_1^2 = 3\mathrm{Bi}$.

Таким образом, решение системы уравнений (2) – (27) позволяет рассчитывать траекторию движения одиночных капель в газовом потоке, содержащем аммиак, с учетом тепло- и массоотдачи.

Литература

1. *Лыков, А.В.* Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М. 1967.
2. *Муштаев, В.И.* Конструирование и расчет аппаратов со взвешенным слоем / В.И. Муштаев, А.С. Тимонин, В.Я. Лебедев. – М., 1991.
3. *Пажи, Д.Г.* Основы техники распыливания жидкостей / Д.Г. Пажи, В.С. Галцетов. – М., 1984.
4. *Перри, Дж.* Справочник инженера-химика / Дж. Перри. – Л., 1969. – Т. 1.
5. *Померанцев, В.В.* Основы практической теории горения / В.В. Померанцев. – Л., 1986.
6. *Рамм, В.М.* Абсорбция газов / В.М. Рамм. – М., 1976.
7. *Рид, Р.* Свойства газов и жидкостей / Р. Рид, Т. Шервуд. – Л., 1969. – Т. 1. – С. 98.
8. *Синицын, Н.Н.* Расчет траекторий движения капли воды с учетом фазовых переходов в системе газоочистки кислородного конвертора / Н.Н. Синицын, Л.А. Полеводова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – Воронеж, 2007. – Т. 3. – № 6. – С. 160 – 164.
9. Справочник по пыле- и золоулавливанию / под ред. А.А. Русакова. – М., 1975.
10. Теплофизические свойства веществ. Справочник / под ред. Н.Б. Варгафтика. – М., 1956. – С. 73.

УДК 621.78.084

М.В. Старцева, Ю.Г. Ярошенко, Ю.И. Липунов

СОЗДАНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО ПРОЦЕССА КОНТРОЛИРУЕМОГО ОХЛАЖДЕНИЯ РЕЛЬСОВЫХ НАКЛАДОК

В статье описано устройство регулируемого охлаждения для термоупрочнения рельсовых накладок, позволяющее сделать процесс управляемым за счет получения равномерного температурного поля по разномассивным элементам (головка, шейка). Устройство прошло апробацию в стендовых условиях и внедрено в промышленность. Получены результаты по механическим свойствам, удовлетворяющие требованиям нормативной документации. Предложенный способ с успехом может заменить традиционный – закалку в баке с маслом.

Рельсовая накладка, ускоренное водяное охлаждение, термоупрочнение проката, спрейерные установки, устройство ускоренного охлаждения.

The paper describes the controlled cooling device for thermohardening of joint bar. The proposed technique can successfully replace the conventional one – oil quenching – due to making the cooling process more controlled by obtaining a uniform temperature distribution over joint bar elements with different mass such as heads and the web. The technique has been validated by a test bench experiment and implemented in the metallurgical industry. The mechanical properties have been obtained to meet the GOST 4133-73 Federal Standard.

Joint bar (fishplate), accelerated water cooling, thremohardening of rolling metal, sprayer system, controlled cooling device (CCD).

Рельсовая накладка является одним из ответственных элементов верхнего строения железнодорожного пути при стыковом соединении рельсов и позволяет продлевать бездефектный срок службы рельсов в бесстыковом пути [2]. Закалка является завершающей ключевой операцией, которая оказывает решающее влияние на структуру и свойства конечного продукта. По этой причине важной задачей является разработка устройства для термообработки рельсовых накладок, которое позволит получить механические и геометрические характеристики согласно требованиям ГОСТ, а также экологично вести процесс.

Закалка может осуществляться в различных средах: воде, полимере, масле в зависимости от требований технологии к скорости охлаждения в определенных интервалах температур для конкретного сортамента сталей [6]. По требованиям действующего ГОСТ 4133-73 термоупрочнение рельсовых накладок осуществляется закалкой в объеме масла. Такой процесс является неуправляемым, сопряжен с множеством трудностей: поддержание и контроль охлаждающей способности масла, промывка изделий после операции, необходимость утилизации после отработки, процесс закалки пожароопасен и требует специальной системы вентиляции. В качестве замены масла была исследована возможность использования полимерных сред, таких как железосодержащая соль полиакриловой кислоты ПК-2 и натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы Na-КМЦ [1].

Исследования ОАО «НКМК» по закалке в водном растворе ПК-2 подтвердили, что существует возможность увеличить эксплуатационные характеристики продукта за счет уменьшения межпластиночного расстояния перлита и количества структурно свободного феррита в поверхностном слое металла [5]. Были получены хорошие результаты по механическим свойствам накладок при определенных концентрациях полимера ПК-2 и выведено уравнение зависимости коэффициента теплоотдачи от начальной его концентрации и температуры ванны при различной температуре поверхности изделия [1].

В работе [8] показано изменение охлаждающих свойств среды ПК-2 с течением времени: раствор, испытавший более 100 закалок полностью поменял свою охлаждающую способность в худшую сторону, так как возросла продолжительность стадии пленочного кипения. Восстановить ее можно добавлением нового раствора, но периодичность и количество подпитки определяются только эмпирически. Несмотря на все преимущества полимерных сред, процесс охлаждения в объеме не позволяет организовать разные условия охлаждения для сложного несимметричного профиля накладки, а также сохраняется необходимость в постоянном тщательном контроле концентрации полимера, его охлаждающей способности, температуры и других параметрах. По прошествии времени раствор нуждается в утилизации, немаловажную роль играет и дороговизна полимерных концентратов. Кроме того, процессом закалки в объеме охладителя невозможно управлять, а значит, не всегда удается обеспечить требования по геометрическим характеристикам к конечному продукту. Ввиду упомянутых и других причин ни один из названных способов, кроме закалки в баке с маслом, не был внедрен в промышленность. В мировой практике имеется опыт струйного водяного термоупрочнения проката различного профиля. Существует, к примеру, ряд внедренных и успешно работающих отечественных устройств для термоупрочнения листа, арматуры и др. [3], [4]. Процесс струйного водяного охлаждения позволяет управлять скоростью охлаждения, обеспечивать разную интенсивность охлаждения элементов с неодинаковой термической массивностью (что особенно важно для сложного профиля), а также экологично вести процесс. Таким образом, анализ литературных данных показывает целесообразность применения данного способа для термоупрочнения рельсовой накладки, что требует создания соответствующего устройства. Для рельсовых накладок такого устройства создано и опробовано не было, и решению именно этой задачи посвящается данная статья.

На первом шаге реализации предложенной идеи в ОАО «ВНИИМТ» было проведено математическое моделирование процесса с применение ранее разработанной во ВНИИМТ модели, в основе которой – решение уравнения теплопроводности Фурье (1) с учетом зависимости теплофизических свойств стали от температуры:

$$\rho c(t)\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda(t)\frac{\partial t}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda(t)\frac{\partial t}{\partial y}\right], \qquad (1)$$

где t – температура; c, ρ, λ – коэффициенты удельной теплоемкости, массовой плотности и теплопроводности материала тела; x, y – координаты в поперечном сечении накладки, τ – время.

Решение уравнения теплопроводности дополняется:

а) начальным условием:

$$t(\tau_0) = t_{\text{нач}},$$

где $t_{\text{нач}}$ – начальное распределение температуры по сечению тела;

б) граничными условиями на поверхности тела:

– при охлаждении на воздухе (граничные условия III рода):

$$\begin{cases} \lambda(t)\dfrac{\partial t}{\partial x}\ \Big|_{x=0} = \alpha(t)\left(T_{\text{пов}} - T_{\text{окр.ср.}}\right) + \varepsilon_{м} c_0 \left[\left(\dfrac{T_{\text{пов}}}{100}\right)^4 - \left(\dfrac{T_{\text{окр.ср.}}}{100}\right)^4\right] \\ \lambda(t)\dfrac{\partial t}{\partial y}\ \Big|_{y=0} = \alpha(t)\left(T_{\text{пов}} - T_{\text{окр.ср.}}\right) + \varepsilon_{м} c_0 \left[\left(\dfrac{T_{\text{пов}}}{100}\right)^4 - \left(\dfrac{T_{\text{окр.ср.}}}{100}\right)^4\right] \end{cases} \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи конвективный на поверхности тела, $\varepsilon_{м}$ – степень черноты поверхности; $c_{о}$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела; $T_{\text{пов}}$ – температура поверхности; $T_{\text{окр.ср}}$ – температура окружающей среды;

в) при струйном водяном охлаждении (граничные условия II рода):

$$\begin{cases} \lambda\dfrac{\partial t}{\partial x}\ \Big|_{x=0} = \begin{cases} q \text{ при } \quad T_{\text{пов}} \geq 100°C \\ \alpha\left(T_{\text{пов}} - T_{\text{окр.ср.}}\right) \quad \text{при } T_{\text{пов}} < 100°C \end{cases} \\ \lambda\dfrac{\partial t}{\partial y}\ \Big|_{y=0} = \begin{cases} q \text{ при } \quad T_{\text{пов}} \geq 100°C \\ \alpha\left(T_{\text{пов}} - T_{\text{окр.ср.}}\right) \quad \text{при } T_{\text{пов}} < 100°C \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

где q – плотность теплового потока на поверхности тела, МВт/м^2.

Плотность теплового потока в граничных условиях II рода (3) определялась по экспериментальным зависимостям, полученным на устройствах струйного водяного охлаждения [7]. На основе полученных зависимостей изменения температуры во времени для различных по сечению точек накладки были определены основные конструктивные характеристики устройства и ориентировочные режимы термоупрочнения. По результатам расчетного моделирования была предложена конструкция, состоящая из двух секций, между которыми имеется воздушный промежуток. Каждая секция состояла из несколько контуров охлаждения, поперечный разрез одного из них представлен на рис. 1. Контур представляет собой систему плоских водяных факелов, пересекающихся в одной вертикальной плоскости и полностью покрывающих поверхность накладки. На каждый коллектор изначально был предусмотрен раздельный подвод воды для возможности создания разных условий охлаждения шейки и головок, а также расположение форсунок под углом, чтобы четко ограничить зоны охлаждения и воздушный промежуток между ними. Все это должно было позволить получить равномерное поле температур по сечению накладки, обеспечив тем самым требования ГОСТ к ее короблению и управляемость процессом охлаждения.

Предложенная конструкция была смонтирована на опытном стенде, где был реализован второй шаг – проведение нескольких серий экспериментальных исследований по термоупрочнению накладок Р65. При проведении эксперимента во внимание принимались требования к процессу нагрева и выдержки – в камерной газовой печи до температуры аустенизации – 870 – 880 °С. Нагретую заготовку подвергали охлаждению в устройстве, непрерывно отслеживая температуру ее поверхности до, во время и после процесса. Для этого на поверхность шейки способом контактной сварки была приварена хромель-алюмелевая термопара, показания которой записывались измерительным комплексом с частотой 0,1 с. Комплекс состоял из: хромель-алюмелевых термопар, компенсационных проводов, модуля ввода/вывода и преобразователя аналогового сигнала в цифровой, а также портативного компьютера, на который производится вывод результатов измерений и автоматическая запись в память. Погрешность всего комплекса составила ±7 °С. Для дополнительного отслеживания температуры в момент выхода из печи и после устройства использовались стационарный пирометр «Тремоскоп-800» и ручной пирометр «Термоскоп-100». Показания термопары в одном из экспериментов приведены на рис. 2. На рис. 3 представлено распределение температуры по длине накладки, измеренное ручным пирометром на выходе из устройства и печи. Из рисунка видно, что при выборе данной конструкции устройства и его технологических параметров достигается равномерное распределение температуры для разномассивных элементов и по ее длине.

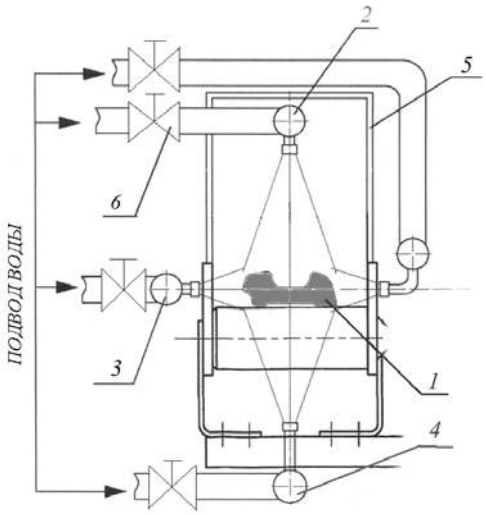


Рис. 1. Схема одного из контуров секции устройства регулируемого охлаждения:

1 – рельсовая накладка Р65;
2 – верхний подводящий коллектор;
3 – боковой подводящий коллектор;
4 – нижний подводящий коллектор;
5 – защитный кожух; 6 – вентиль

В следующей за тепловой серией технологических экспериментов при уточненных параметрах устройства и намеченных режимах был проведен комплекс механических испытаний и исследование микроструктуры. Механические свойства накладки в серии экспериментов и согласно требованиям ГОСТ 4133-73 приведены в табл. 1.

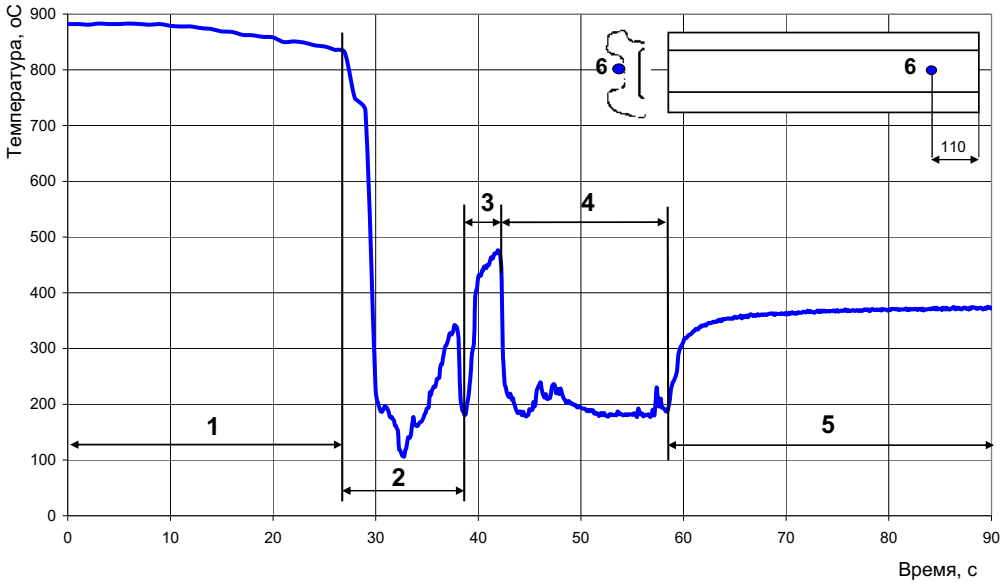


Рис. 2. Изменение температуры шейки во время процесса регулируемого водяного охлаждения (опыт № 2 от 10.02.2012 г.)

1 – охлаждение на воздухе после выхода образца из печи; 2 – охлаждение в секции № 1; 3 – изменение температуры поверхности на воздухе между секциями № 1 и 2; 4 – охлаждение в секции № 2; 5 – изменение температуры поверхности после выхода накладки из устройства; 6 – схема расположение хромель-алюмелевой термопары на поверхности шейки

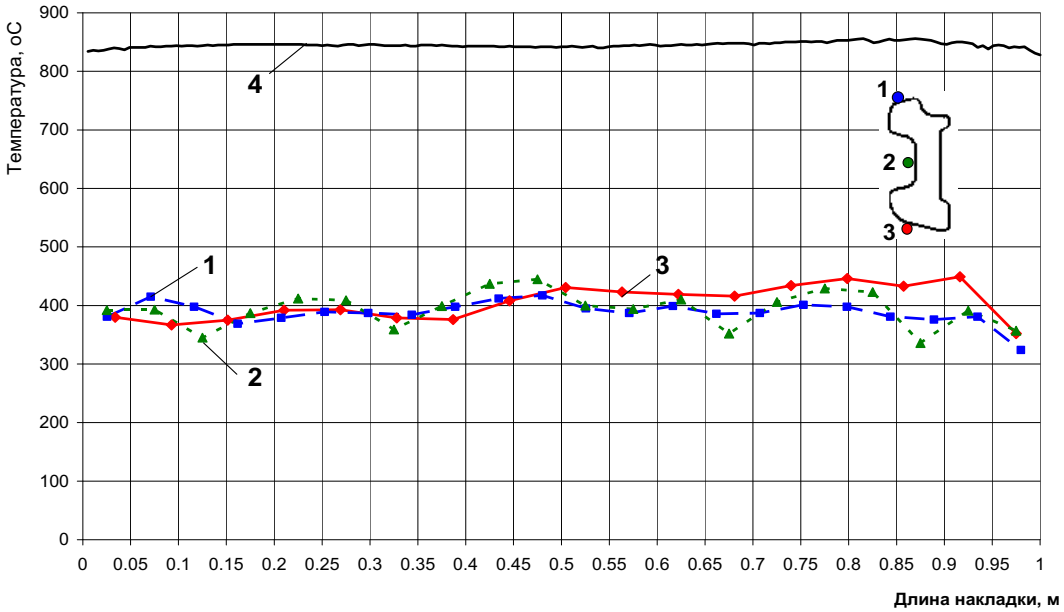


Рис. 3. Распределение температуры по длине накладки после термоупрочнения в устройстве, данные стендового эксперимента № 3 от 27.02.2012 г.

1 – верхняя головка; 2 – шейка; 3 – нижняя головка; 4 – температура шейки на выходе накладки из печи

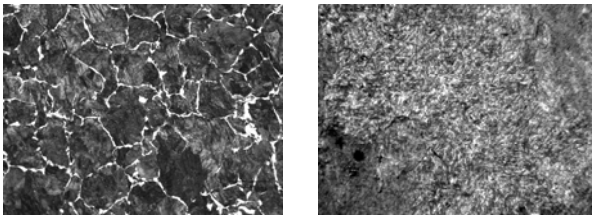
Таблица 1

Механические свойства рельсовой накладки Р65

Накладки	Предел прочности $\sigma_в$, Н/мм^2	Предел текучести $\sigma_т$, Н/мм^2	Относительное удлинение δ_5, %	Относительное сужение ψ, %	Угол холодного загиба, град.	Твердость, НВ в пределах
Стенд ОАО «ВНИИМТ»	893÷1012	570÷ 694	10,4÷17,4	41,6÷49,3	46÷106	285÷363
ГОСТ 4133-73, не менее	844	530	10	30	20	235÷388

Серия проведенных на стенде тепловых экспериментов позволила уточнить конструктивные параметры устройства и определить тепловые режимы, при которых достигается равномерное поле температур для шейки и головок.

Микроструктуры сердцевины нижней головки накладки до и после стендового эксперимента с применение оптического микроскопа показаны на рис. 4.

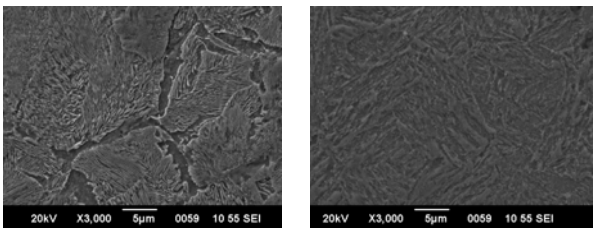


а) (х200) б) (х200)

Рис. 4. Микроструктура нижней головки рельсовой рельсовой накладки до (а) и после термоупрочнения (б)

Исходная структура (до термообработки, рис. 4а) состоит из пластинчатого перлита и феррита, ориентированного по границам зерна, балл зерна 4 – 5 ГОСТ 5639-82. Микроструктура после термообработки (рис. 4б) представляет собой плотный сорбитообразный перлит с выраженной ферритной сеткой по границе зерна, балл зерна 7 – 8 ГОСТ 5639-82.

Изучение структуры после термоупрочнения с более высокой степенью увеличения было проведено с использованием растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6490LV. На рис. 5 приведены структуры центральной части верхней головки и на расстоянии 500 мкм от кромки.



(а)х3000 (б)х3000

Рис. 5. Микроструктура середины верхней головки рельсовой накладки (а) и на расстоянии 500 мкм от кромки верхней головки (б)

В структуре середины также наблюдается пластинчатый перлит и феррит по границе зерна, размер зерна около 10 – 15 мкм, в приповерхностном слое структура представляет собой дисперсный сорбит отпуска.

Таким образом, в процессе термоупрочнения в металле происходит уменьшение размера зерна и расстояния между пластинками перлита. В настоящее время проводятся дальнейшие исследования структуры образцов.

Устройство регулируемого охлаждения внедряется на филиале предприятия ОАО «ЕВРАЗ НТМК» НСМЗ. Прокат на предприятие поставляется двух сортов: с «ЕВРАЗ ЗСМК» (ранее «НКМК») и «ЕВРАЗ НТМК», отличающихся содержанием углерода. На основе требований ГОСТ при участии ВНИИМТ были разработаны технические условия ТУ 14-2Р-463-2011 для НСМЗ. Для каждого из сортаментов были определены соответствующие тепловые режимы работы устройства в процессе пуско-наладочных работ с учетом результатов стендовых исследований и механические свойства на соответствующих режимах. Результаты представлены в табл. 2, где подтверждено обеспечение требований ТУ по механическим свойствам к конечному продукту.

Таблица 2

Механические свойства термоупрочненных накладок в устройстве на филиале ОАО «ЕВРАЗ НТМК» НСМЗ

Накладки	Предел прочности $\sigma_в$, Н/мм^2	Предел текучести $\sigma_т$, Н/мм^2	Относительное удлинение δ_5, %	Относительное сужение ψ, %	Твердость, НВ в пределах
«НТМК» 0,49 – 0,51 % С	963 – 985	640 – 655	12 – 16	31 – 41	236 – 269
«КМК» 0,56 – 0,58 % С	872 – 912	545 – 555	13 – 19	31 – 37	241 – 255
Требования ТУ 14-2Р-463-2011, 0,45 – 0,62 % С	не менее 844	не менее 530	не менее 10	не менее 30	в пределах 235 – 388

В результате проведенных стендовых исследований и математического моделирования прошел апробацию процесс регулируемого водяного охлаждения рельсовых накладок, уточнены конструктивные особенности устройства регулируемого охлаждения и определены тепловые режимы работы, при которых механические свойства накладок соответствуют требованиям нормативной документации и не уступают механическим свойствам накладок, подвергнутых закалке в масле. В настоящее время на производстве внедряется данный способ, позволяющий получать равномерное распределение температуры по разномассивным элементам, а следовательно, обеспечивать требования по короблению. Технология имеет безусловные экологические преимущества перед традиционной объемной закалкой в масле, благодаря использованию воды, циркулирующей в замкнутом контуре.

Литература

1. *Захаров, А.В.* Исследование возможности использования полимерной среды Na-КМЦ для закалки рельсов и деталей рельсовых скреплений / А.В. Захаров // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1991. – № 4. – С. 24 – 27.

2. *Иванов, П.С.* Новые ресурсосберегающие технологии в рельсовом хозяйстве / [П.С. Иванов и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – № 7. – С. 23 – 25.

3. *Липунов, Ю.И.* Исследование процессов охлаждения при термоупрочнении арматуры / [Ю.И. Липунов и др.] // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2007. – № 2. – С. 54 – 57.

4. *Липунов, Ю.И.* Освоение устройств контролируемого охлаждения листа в потоке стана 5000 ОАО «Северсталь» / [Ю.И. Липунов и др.] // Сталь. – 2005. – № 3. – С. 55 – 61.

5. Патент RU 2291206 C1 2005г.

6. *Цзи-Хун, Яо* Охлаждение и выбор сред при закалке стали / Яо Цзи-Хун // Индукционный нагрев. – 2011. – № 18.

7. *Эйсмондт, К.Ю.* Разработка и внедрение в производство устройств термоупрочнения проката регулируемым охлаждением на основе анализа процессов теплообмена: автореф. дис. … канд. техн. наук / К.Ю. Эйсмондт. – Екатеринбург, 2011.

8. *Эйсмондт, Ю.Г.* Исследование возможности закалки рельсовых накладок в полимерной среде / Ю.Г. Эйсмондт, М.А. Гервасьев, Т.А. Трунина // Сталь. – 2000. – № 9. – С. 71 – 73.

УДК 621.7.024

В.А. Стенин

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОМЫВКИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В работе представлено теоретическое обоснование активных способов интенсификации промывки гидравлических судовых систем (турбулизации и аэрирования) и даны рекомендации по их реализации.

Турбулизация, аэрирование, способы интенсификации, промывка системы, частицы загрязнений.

The work presents the theoretical basis of active ways of intensification of flushing hydraulic marine systems (turbulence and aeration) and recommendations on their implementation.

Turbulence, aeration, ways of intensification, rinsing system, particles of dirt.

Рост требований к эксплуатационной надежности и долговечности судовых систем и их оборудования ведет к ужесточению требований к чистоте внутренних полостей систем (ВПС) и рабочих жидкостей. Наличие в рабочих средах даже небольшого количества посторонних примесей способствует преждевременному износу механизмов и арматуры. В системах гидравлики, используемых на современных судах, присутствие механических частиц загрязнений размером свыше 16 мкм опасно [5], [6], [7]. Как правило, при гидродинамических очистках 95 % вымываемых частиц имеют размеры более 0,1 мм. Наиболее трудно удалять абразивную и металлическую пыль и частицы с положительной плавучестью типа древесины и ткани.

Поскольку все судовые трубопроводные системы отличаются сложной разветвленной конфигурацией, значительной протяженностью и насыщенностью различными агрегатами и арматурой, промывка гидросистем является очень ответственной и трудоемкой операцией, составляющей до 15 – 25 % от общей трудоемкости работ при сборке системы. Рекомендованная отраслевым стандартом промывка стационарным потоком рабочей жидкости либо не обеспечивает достижения необходимого уровня чистоты ВПС, либо существенно увеличивает продолжительность технологического процесса промывки.

Операция промывки трубопроводов осуществляется при помощи технологических стендов, создающих в системе циркуляцию воды со скоростью движения, обеспечивающей вымывание из внутренней полости труб загрязняющих частиц и улавливание их в фильтрах стенда. Работа А, Дж, затрачиваемая на перекачку моющей жидкости, равна [4]:

$$A = \rho_{ж} \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot t / \eta , \qquad (1)$$

где Q – подача промывочного насоса, $м^3/с$; H – напор, м; $\rho_{ж}$ – плотность моющей жидкости, $кг/м^3$; g – ускорение свободного падения, $м/с^2$; η – КПД промывочного насоса; t – продолжительность промывки, с.

Величину подачи центробежного насоса представим в виде:

$$Q = \varphi \cdot w , \qquad (2)$$

где φ – площадь живого сечения потока, $м^2$; w – скорость потока моющей жидкости, $м/с$.

В соответствии с уравнениями (1) и (2), повысить энергоэффективность промывки можно путем снижения продолжительности промывки t и подачи Q (скорости потока w). С другой стороны, как показывают исследования, достигаемый класс чистоты системы после промывки зависит напрямую от времени и скорости промывки [6], [7]. Исследованиями, показанными в [5], рекомендована скорость в 8 – 15 м/с, обеспечивающая отрыв частиц от внутренней поверхности стенок трубопроводов. Однако допус-