

Разработан эффективный метод удаления окалины с помощью высокочастотного индукционного нагрева. Экспериментальным путем определена прочность промышленной окалины и изучен механизм ее отделения в зависимости от температуры. Создана схема расчета температурных напряжений в окалине, установлены температурные напряжения, возникающие на границе окалины-металл при тепловом ударе, определены параметры высокочастотного нагрева, которые обеспечивают высокое качество очистки металла от окалины (до 95 %) при отсутствии закалки поверхности металла. Метод экологически чист и в 3 раза дешевле, чем химическое травление.

ПРОГРЕССИВНЫЙ МЕТОД ОЧИСТКИ ОКАЛИНЫ С КРУГЛОГО ПРОКАТА

В.О. Костик

*Кафедра металловедения и термической
обработки металла Национального
технического университета «Харьковский
политехнический институт»
Ул. Фрунзе, 21, Харьков, 61002 УКРАИНА*

С.С. Дьяченко

*Кафедра технологии металлов
и материаловедения Национального
автомобильного технического университета
Ул. Петровского, 21, Харьков, 61002 УКРАИНА*

1. Введение

Очистка металла от окалины является необходимой и обязательной технологической операцией на машиностроительных, метизных и металлургических заводах. Проблема очистки от окалины в последнее время стала одной из основных в отделке металлопродукции прежде всего из-за дороговизны и вредности основных способов удаления окалины — кислотного травления и механической очистки.

Несмотря на регенерацию травильных растворов, нейтрализацию сточных вод, сложные системы вентиляции и усиление герметичности травильных ванн, кислотное травление оказывает вредное воздействие на окружающую среду. Усложнение оборудования и технологии приводит к увеличению себестоимости. Широко применяемая в промышленности механическая очистка из-за интенсивного пылевыведения также загрязняет окружающую среду. Кроме этого, возникают сложности, связанные с разделением смеси окалины и рабочего материала и с быстрым износом дорогостоящих режущих инструментов. В связи с этим, разработка эффективных и экологически чистых методов является острой проблемой, которой посвящена данная статья.

2. Экологически чистые методы удаления окалины

К числу экологически чистых методов относится удаление окалины путем создания напряженно-деформированного состояния на границе «окалина-металл», которое получают механическим, термическим или термомеханическим способами. Тепловая деформация предпочтительней, чем механическая, поскольку позволяет создать наиболее высокий уровень напряжений в слое окалины без значительных энергетических затрат. Самым эффективным способом получения напряженно-деформированного состояния на границе «окалина-металл» является тепловой удар, создаваемый при индукционном нагреве токами высокой частоты. Этот метод основан на различии в характере деформации материалов, составляющих в совокупности единое тело, но имеющих различные механические и теплофизические свойства при скоростном нагреве поверхности металлопроката. Огромное значение для применения данного метода очистки имеет расчет температурно-временных параметров процесса. Неверный выбор ведет к ухудшению качества очистки и образованию закаленного слоя, что во многих случаях недопустимо при дальнейшей обработке металлопроката.

Известно, что при нагреве токами высокой частоты глубина разогретого поверхностного слоя определяется по зависимости [1]:

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho \cdot 10^9}{\mu f}}, \text{ см,} \tag{1}$$

где ρ — удельное сопротивление, Ом·см,
 μ — магнитная проницаемость,
 f — частота тока, Гц.

Из этой зависимости следует, что чем больше частота тока, тем меньше глубина его проникновения. Для удаления окалины требуется разогреть только сам слой окалины, тогда как температура основного металла не должна превосходить критическую точку.

После горячей прокатки на поверхности круглого проката обычно образуется трехслойная окалина, состоящая из вюстита ~ 80 %, магнетита ~ 18 % и гематита 1-2 %, толщиной от 80 до 300-350 мкм. Расчеты показали, что для нагрева такой толщины частота тока должна составить 400-450 кГц. В данной работе был использован индуктор с частотой 440 кГц.

Мощность P_δ , требуемая для нагрева поверхностного слоя толщиной δ , имеет следующий вид [2]:

$$P_\delta = 0,865 S q, \tag{2}$$

где S — площадь разогретой поверхности,
 q — удельная мощность.

Из формулы (2) следует, что 86,5 % мощности выделяется в поверхностном слое, а 13,5 % теряется на конвекцию и излучение. Этими потерями для приближенных расчетов можно пренебречь и считать, что вся тепловая энергия сосредоточена в поверхностном слое, т.е. в слое окалины.

Прогрев же металла, благодаря его высокой теплопроводности, осуществляется только за счет теплопередачи от разогретого электромагнитным полем слоя окалины. Для того, чтобы избежать разогрева металла выше критических температур, необходимо наряду с высокой частотой применять большую удельную мощность и малое время нагрева.

3. Формализация термоупругой задачи

Расчеты проводились для круглого проката, поэтому будем его называть цилиндром. Возникшая термоупругая задача может быть сформулирована следующим образом. Неограниченный по длине сплошной круговой цилиндр радиусом R (Рис. 1) вначале, когда время нагрева $\tau=0$, имеет температуру окружающей среды T_0 .

Температура является функцией радиуса r и времени нагрева τ , т.е. $T(r,\tau)$, тогда начальное условие будет :

$$T(r,0) = T_0. \tag{3}$$

При индукционном нагреве окалины действует мгновенный источник тепла q на единицу площади цилиндрической поверхности $r=R$, где происходит теплообмен. С учетом пренебрежения потерями на конвекцию и излучение, можно записать:

$$q = \lambda \frac{\partial T}{\partial r} + \kappa T(r,\tau), \tag{4}$$

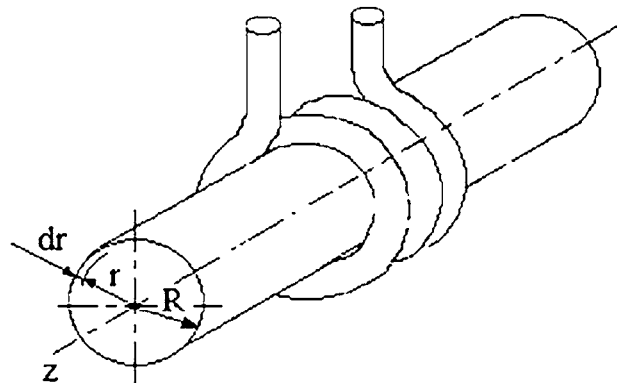


Рисунок 1. Схема расположения заготовки в индукторе

где κ — коэффициент теплоотдачи,
 λ — коэффициент теплопроводности.

Выделение тепла концентрируется в поверхностном слое настолько тонким (в окалине), что этот процесс можно рассматривать как процесс простого поверхностного нагрева. Как показано в работе [2], аналитические решения для частного случая индукционного нагрева токами высокой частоты по форме совпадают с решениями для нестационарного нагрева при граничных условиях третьего рода. Принимаем, что возникающая температура $T(r,\tau)$ не изменяется в окружном и осевом направлениях. Определение температуры сводится к решению уравнения теплопроводности для неограниченного цилиндра, температура которого не зависит от осевой координаты Z [3]:

$$\frac{\partial T(r,\tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T(r,\tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r,\tau)}{\partial r} \right), \tag{5}$$

где a — коэффициент температуропроводности.

Для нахождения распределения температуры по сечению проката решаем в совокупности (3) — (5), тогда уравнение для определения температуры от поверхности проката к центру имеет вид :

$$\begin{aligned} \frac{\kappa}{q Bi} (T(r,\tau) - T_0) &= \\ &= 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_1(\mu_n)}{\mu_n [I_0^2(\mu_n) + I_1^2(\mu_n)]} I_0 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) \exp \left(-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{R^2} \right) \end{aligned} \tag{6}$$

где I_0, I_1 — функция Бесселя первого рода нулевого и первого порядков;

Bi — критерий Био:

$$Bi = \frac{\kappa R}{\lambda}, \tag{7}$$

μ_n — корни характеристического уравнения :

$$\frac{I_0(\mu_n)}{I_1(\mu_n)} = \frac{\mu_n}{Bi}, \tag{8}$$

которые определяются из таблиц, имеющих в монографиях по теплопроводности.

Расчеты распределения температурного поля по формуле (6) показывают, что температура в цилиндре изменяется от поверхности к центру по степенному закону :

$$T_i = T_\pi \left(\frac{r}{R} \right)^n, \quad n \geq 1, \tag{9}$$

где T_π — температура поверхности цилиндра, T_i — температура цилиндра на расстоянии $\frac{r}{R}$ от его центра.

В зависимости от величины теплового потока, аппроксимируя температурное поле (6) по методу наименьших квадратов [2,3], определяется T_i и n , аппроксимируя температурное поле (6) по методу наименьших квадратов [2, 3].

С увеличением теплового потока время нагрева поверхностного слоя до заданной температуры уменьшается. Причем для большего диаметра проката необходимо и большее подведение тепла для обеспечения требуемой температуры в поверхностном слое.

Окалина является хрупким материалом, поэтому предел упругости будет равен пределу прочности. Для разрушения окалины необходимо создать тепловым ударом такие температурные напряжения, чтобы они превышали ее предел прочности. Так как рассматриваемая задача является осесимметричной, то температурные напряжения, выведенные из закона Гука, имеют вид [4]:

$$\sigma_{rr} = \frac{\beta E}{1-\nu} \left(\frac{1}{R^2} \int_0^R Trdr - \frac{1}{r^2} \int_0^r Trdr - T \right); \quad (10)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = \frac{\beta E}{1-\nu} \left(\frac{1}{R^2} \int_0^R Trdr + \frac{1}{r^2} \int_0^r Trdr - T \right); \quad (11)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{\beta E}{1-\nu} \left(\frac{2\nu}{R^2} \int_0^R Trdr - T \right), \quad (12)$$

где $\sigma_{rr}, \sigma_{\varphi\varphi}, \sigma_{zz}$ — радиальные, тангенциальные и осевые напряжения соответственно, β — коэффициент линейного температурного расширения, E — модуль Юнга, ν — коэффициент Пуассона.

Подставляя в (10)–(12) выражение для температуры (6) получаем:

$$\sigma_{rr} = \frac{\beta E}{1-\nu} \frac{Bi q}{\kappa} \sum_{n=1}^{\infty} G_n \left[I_1(\mu_n) - \frac{R}{r} I_1\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) \right] \exp\left(-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{R^2}\right); \quad (13)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = \frac{\beta E}{1-\nu} \frac{Bi q}{\kappa} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} G_n \left[I_1(\mu_n) + \frac{R}{r} I_1\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) - \mu_n I_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) \right] \exp\left(-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{R^2}\right); \quad (14)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{\beta E}{1-\nu} \frac{Bi q}{\kappa} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} G_n \left[2I_1(\mu_n) - \mu_n I_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) \right] \exp\left(-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{R^2}\right), \quad (15)$$

$$\text{где } G_n = \frac{2}{\mu_n^2 I_0^2(\mu_n) + I_1^2(\mu_n)}.$$

Из формулы (13) для определения радиальных напряжений σ_{rr} видно, что на поверхности, когда $r \rightarrow R$, радиальные напряжения будут стремиться к нулю. Поскольку температура, по принятым нами допущениям для приближенных расчетов, не изменяется в окружном и осевом направлениях, где температура не зависит от координаты Z , осевые напряжения σ_{zz} равны нулю (15).

Тангенциальные напряжения $\sigma_{\varphi\varphi}$ (Рис. 2) на поверхности цилиндра принимают максимальные значения, которые разрушают силы сцепления окалины с металлом.

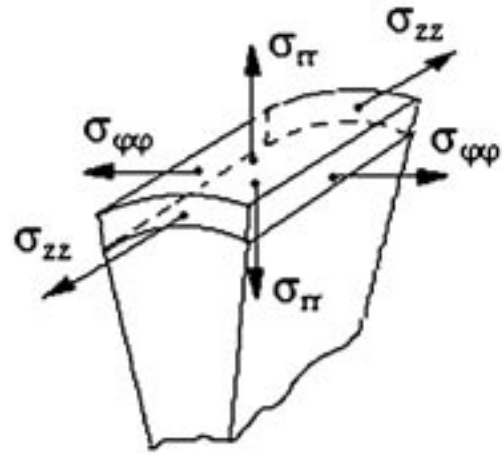


Рисунок 2. Схема распределения напряжений в окалине

4. Экспериментальные и расчетные результаты исследований

На рис.3 показаны расчетные зависимости тангенциальных напряжений $\sigma_{\varphi\varphi}$ от температуры нагрева поверхностного слоя цилиндра диаметром 20 мм за время теплового воздействия (кривые 1, 2, 3 для различного времени нагрева). На этом же рисунке показаны экспериментальные значения предела прочности окалины (кривая 4). Они были определены при осадке цилиндрических образцов с окалиной при нагреве от 20 °С до 1100 °С с интервалом в 100 °С. Напряжения, которые обеспечивают отделение окалины, принимают значения, большие предела прочности окалины.

Из рис.3 видно, что напряжения превышают предел прочности окалины свыше 950 °С. Эта температура и была принята минимальной при высокочастотном нагреве проката [5].

Согласно уравнениям (6)–(9) определяли распространение тепла по сечению проката. При фиксированной удельной мощности индуктора, что характерно для промышленной установки ТВЧ, распределение темпе-

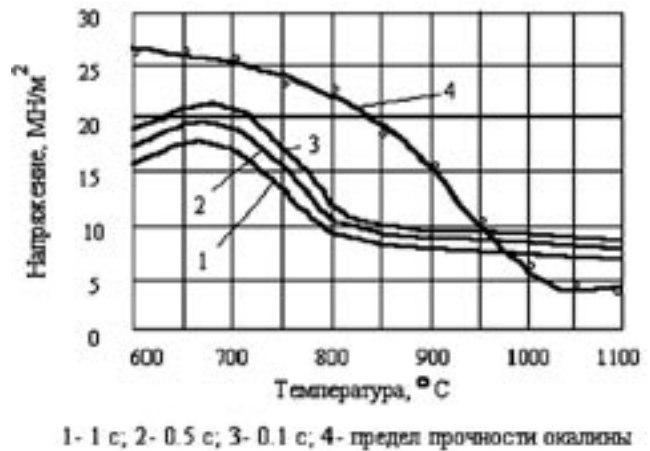


Рисунок 3. Температурная зависимость напряжений $\sigma_{\varphi\varphi}$ в поверхностном слое цилиндра \varnothing 20 мм; время нагрева: 1—0,1 с; 2—0,5 с; 3—1,0 с; кривая 4—экспериментальные значения предела прочности промышленной окалины

ратурного поля от поверхности цилиндра ($r/R=1$) к центру ($r/R=0$) за время τ теплового воздействия показано на рис. 2 для проката \varnothing 10, 20 и 30 мм (а, б, в – соответственно). Толщина слоя окалины отмечена штриховой линией. Оптимальной температурой нагрева приняты 1000 °С в соответствии с превышением значений температурных напряжений предела прочности окалины. Повышение температуры нагрева до 1100 °С дает качественно подобные результаты при кратковременном нагреве (0,1 с). При перегреве поверхности выше 1200 °С наблюдается размягчение и прилипание окалины к металлу, что ухудшает качество очистки.

На рис.4,а показан для проката \varnothing 10 мм максимальный температурный градиент и, следовательно, максимальный удар на границе «окалина-металл», создаваемый за время нагрева 0,1 с (кривая 1). С увеличением времени нагрева разогревается поверхность металла до температур, приводящих к структурным изменениям стали, а при дальнейшем охлаждении – к закаленному слою (кривые 2, 3).

Кроме этого, разогрев внутренних слоев цилиндра приводит к уменьшению температурного градиента на границе раздела «окалина-металл», следовательно, к уменьшению температурных напряжений в поверхностном слое, что ухудшает качество очистки проката от окалины.

С увеличением диаметра проката влияние фактора времени уменьшается (Рис 4, б, в). Чтобы избежать образования закаленного слоя, время теплового воздействия не должно превышать 0,5 с для \varnothing 20 мм и 1,5 с для \varnothing 30 мм. Это благоприятно сказывается на возможности обработки в одном устройстве проката различного диаметра.

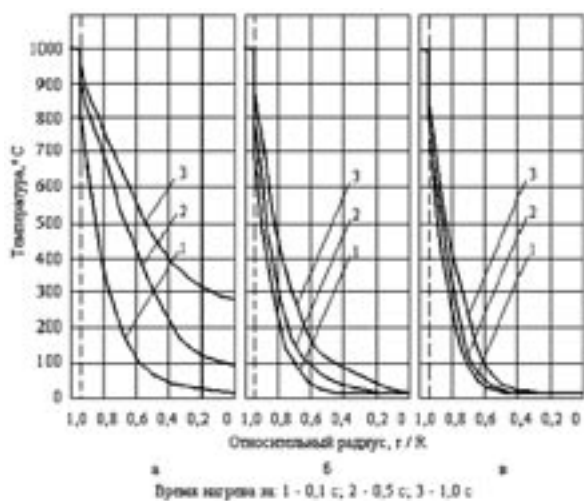


Рисунок 4. Распределение температурного поля от поверхности к центру цилиндра при нагреве ТВЧ до 1000 °С диаметром 10 мм (а); 20 мм (б) и 30 мм (в); время нагрева: 1 – 0,1 с; 2 – 0,5 с; 3 – 1,0 с

Из распределения температурного поля по сечению проката от поверхности к центру следует, что чем меньше диаметр профиля, тем меньшим должно быть время теплового воздействия на поверхность проката. В противном случае будет интенсивный разогрев внутренних слоев. Это снижает температурный градиент между внутренними и поверхностными слоями, и, следовательно, уменьшает температурные напряжения.

5. Выводы

В результате расчетов были получены следующие параметры для скоростного высокочастотного нагрева: $f = 440$ кГц, $T_{\text{н}} = 950 - 1100$ °С, $\tau = 0,1 - 1,5$ с в зависимости от диаметра проката.

Экспериментальные исследования подтверждают расчетные данные. Было показано, что наилучший результат достигается при охлаждении водой после быстрого нагрева до 950 ° – 1100 °С. В этом случае прокат подвергается двойному тепловому удару: сжимающим напряжениям при быстром нагреве и растягивающим при охлаждении. Это приводит к удалению до 95 % окалины без заметной закалки поверхностного слоя стали. Наиболее твердые фазы (магнетит и гематит) удаляются полностью. Оставшаяся окалина представляет собой тонкий (до 5 мкм) слой рыхлого и мягкого вюститита, играющего роль смазки при волочении, а в случае недопущения – легко удаляемого щеткой [6,7].

Таким образом, удаление окалины с поверхности круглого проката тепловым ударом является экологически чистым способом и в три раза дешевле по сравнению с солянокислотным травлением.

Литература

1. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. - Л.: Энергоатомиздат, 1988.- 280с.
2. Бурлаков А.В. Основы теории пластичности и ползучести. - Харьков: ХГУ.-1968.-156 с.
3. Лыков А.В. Тепломассообмен. Справочник.- М.: Энергия, 1972.- 600 с.
4. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости.- М.: Наука, 1975.- 576 с.
5. Костик В.О. Расчет температурно-временных параметров удаления окалины с круглого проката тепловым ударом // Вестник ХГАДТУ.- Харьков.- Вып 8, 1998.- С.79-83.
6. А.С. № 1772176 / Вакула Л.А., Верчиков С.В., Костик В.О. и др.
7. Костик В.О. Прогрессивная технология очистки металла от окалины токами высокой частоты / Вестник Инженерной академии Украины.-Харков.-№ 3.- Часть 1, 2001.-С.99-101.



Костик Виктория Олеговна, кандидат технических наук, доцент кафедры металловедения и термической обработки металлов Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»

Круг научных интересов: Проблемы термической обработки металлов, очистка поверхности сталей от окалины, поверхностное упрочнение металлов и сплавов; 15-ти летний опыт научной работы, автор 30 научных трудов; кроме того, автор дистанционного курса «Новые функциональные материалы машиностроения, полученные путем поверхностного упрочнения».

Контактный телефон:
(0572) 400-435.
E-mail: vkostik@kpi.kharkov.ua



Дьяченко Светлана Степановна, доктор технических наук, профессор кафедры технологии металлов и материаловедения Харьковского национального автомобильно-дорожного университета.

Круг научных интересов: Проблема повышения конструкционной прочности материалов рациональным легированием и созданием новых технологий комбинированной обработки, использующих субструктурное упрочнение; 50-ти летний опыт научной работы, автор 350 научных трудов, заслуженный деятель науки и техники Украины, Соросовский профессор.

Контактный телефон:
(0572) 459-192.

РЕФЕРАТИВНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЧИСКИ МЕТАЛЛА ОТ ОКАЛИНЫ ТЕПЛОВЫМ УДАРОМ

Цикл исследований [1-6] посвящен вопросу очистки металла от окалины. Этот процесс является необходимой и обязательной технологической операцией на машиностроительных и металлургических заводах. К числу экологически чистых методов относится удаление окалины путем создания напряженно-деформированного

состояния на границе «окалина-металл», особенно тепловым ударом, создаваемым индукционным нагревом токами высокой частоты. Создана схема расчета температурных напряжений, возникающих на границе «окалина-металл» при тепловом ударе. Разработан эффективный, экологически чистый метод удаления окалины

токами высокой частоты, который в 3 раза дешевле, чем химическое травление. Изучен механизм ее отделения в зависимости от температуры, определены параметры обработки, которые обеспечивают высокое качество очистки металла от окалины (до 95 %) при отсутствии закалки поверхностного слоя металла.

Литература

1. Вакула В.А., Костик В.О. Экспериментальные исследования процесса удаления окалины с поверхности проката при различных температурах // Производство сортовых и гнутых профилей проката: Отрасл. сб. науч. тр. - Харьков: УкрНИИМет. - 1996. - с. 79-82
2. Костик В.О. Расчет температурно-временных параметров удаления окалины с круглого проката тепловым ударом // Вестник ХГАДТУ.- Харьков.- Вып 8, 1998.- С.79-83.
3. А.С. № 1772176 / Вакула Л.А., Верчиков С.В., Костик В.О. и др.
4. С.С. Дьяченко, В.О. Костик. Изучение механизма процесса отделения окалины от металла при разных температурах // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. - Харьков: ХГПУ. - 1999. - №59. - с. 78-80.
5. В.О. Костик, С.С. Дьяченко. Металлографические исследования поверхностного слоя стали 30 после теплового удара в зависимости от времени воздействия // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. - Харьков: ХГПУ. - 2000. - №82. - с. 36-38.
6. Костик В.О. Прогрессивная технология очистки металла от окалины токами высокой частоты / Вестник Инженерной академии Украины.-Харьков.-№ 3.- Часть 1. - 2001.-С.99-101.

В.О. Костик
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
Украина, г. Харьков, кафедра металловедения и термической обработки металлов,
тел. +38 (0572) 400-435, e-mail: vkostik@kpi.kharkov.ua