УДК 621.923

ОБРАЗОВАНИЕ ЖИДКОЙ ФАЗЫ в поверхностном слое стальных деталей в условиях закалки высокоэнергетическим нагревом токами высокой частоты*

В.В. ИВАНЦИВСКИЙ, доктор техн. наук, доцент И.А. БАТАЕВ, канд. техн. наук, доцент Т.Г. МАРТЫНОВА, канд. техн. наук, доцент Н.В. ВАХРУШЕВ, аспирант, ассистент Г.О. ЧА, аспирант (НГТУ, г. Новосибирск)

> Поступила 3 июня 2016 Рецензирование 15 июля 2016 Принята к печати 15 августа 2016

Иванцивский В.В. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, e-mail: ivancivskij@corp.nstu.ru

Для повышения эксплуатационных свойств деталей машин все большее распространения получают методы модифицирования поверхностных слоев деталей с использованием источников энергии высокой концентрации, обеспечивающих скорости нагрева порядка $10^4 \dots 10^5$ °C/с. Объектом данных исследований является поверхностная закалка высокоэнергетическим нагревом токами высокой частоты (ВЭН ТВЧ). Данному источнику энергии свойственно весьма сложное распределение энергии по толщине нагреваемого слоя, что может являться причиной образования в глубине материала микрообъемов расплавленного металла, приводящее к существенному снижению качества обрабатываемого изделия. Следовательно, при назначении технологических режимов, необходимо учитывать характерные особенности обработки данными источниками нагрева.

Натурные эксперименты проводились на круглошлифовальном станке модели 3Б12, оснащенного дополнительным источником энергии, в качестве которого использовался выносной закалочный контур, реализующий высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты. Структурные исследования производили с применением оптической и растровой микроскопии. Математическое моделирование тепловых полей и структурно-фазовых превращений при ВЭН ТВЧ осуществлялось в программных комплексах ANSYS и SYSWELD.

Теоретически обоснована и практически доказана возможность возникновения в процессе поверхностной закалки стали 45 с использованием высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты с одновременным душевым водяным охлаждением жидкой фазы не на поверхности, а на глубине 0,15...0,2 мм. На основании проведенных исследований сделан вывод о том, что назначать режимы поверхностной закалки с использованием ВЭН ТВЧ с одновременным душевым охлаждением необходимо исходя из наиболее теплонапряженного слоя.

Ключевые слова: поверхностная закалка, токи высокой частоты, метод конечных элементов, конструкционная сталь, жидкая фаза.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-41-51

^{*} Исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках Тематического плана НИР НГТУ по проекту ТП-ПТМ-2_15 в плановом периоде 2015–2016 гг.

Введение

Поверхностная закалка стальных деталей с использованием концентрированных источников энергии характеризуется высокими скоростями нагрева (десятки тысяч градусов в секунду). В этих условиях для завершения процесса аустенитизации разогрев стали осуществляют вплоть до температуры плавления [1–8]. При использовании поверхностных источников нагрева (лазер, плазма и др.) максимальные значения темпера-

тур, безусловно, наблюдаются именно на поверхности материала [9–14]. Однако для объемных источников энергии (электронный луч, токи высокой частоты) данный факт не

очевиден. Это объясняется, прежде всего, физической природой объемного источника, т. е. закономерностью распределения энергии по глубине нагреваемого слоя [15]. Так, в работе [16] показана возможность образования в глубине материала микрообъемов расплавленного металла при нагреве в воздушной атмосфере с использованием электронного пучка. На данных участках при поверхностной закалке заэвтектоидной стали была зафиксирована структура ледебурита, характерная для термической обработки чугунов.

При нагреве сталей в воздушной среде с использованием концентрированного электронного пучка распределение выделяемой энергии в материале носит подобный характер, как и при высокоэнергетическом нагреве токами высокой частоты (ВЭН ТВЧ) [17, 18]. В этом случае при поверхностной закале с использованием ВЭН ТВЧ можно также ожидать возможность возникновения локальных объемов жидкой фазы в глубине материала.

Целью данной работы является определение наиболее теплонапряженного слоя при высокоэнергетическом нагреве токами высокой частоты стальных деталей с одновременным душевым охлаждением.

Методика экспериментального исследования

Материалы и методы натурных экспериментов

В качестве образцов для поверхностного упрочнения использовались цилиндрические детали из стали 45. Состав исходного материала проверяли с использованием оптико-эмиссионного спектрометра ARL 3460. Результаты анализа представлены в таблице.

Предварительная подготовка образцов производилась на токарном обрабатывающем центре CTX 310 есо V3 с системой ЧПУ Siemens 810D. Геометрические параметры дисков: Ø 50 мм, высота 10 мм. Контроль размеров осуществлялся на профилографе-профилометре Form Talysurf Series 2.

Химический состав исходных материалов

Материал	Массовая доля элемента, %							
	С	Si	Mn	S	Р	Cr	Ni	Cu
45	0,44	0,23	0,61	0,013	0,019	0,11	0,15	0,17

Поверхностное упрочнение производилось на модернизированном круглошлифовальном станке модели ЗБ12. Для этого станочная система оснащалась дополнительным концентрированным источником энергии, в качестве которого использовался выносной закалочный контур, реализующий высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты (ВЭНТВЧ), характеризующийся высоким термическим коэффициентом полезного действия. В качестве источника энергии был применен ламповый генератор марки ВЧГ 6-60/0,44 с рабочей частотой тока 440 кГц. Процесс нагрева осуществлялся по глубинной схеме (толщина упрочненного слоя не превышала глубины проникновения тока в горячий металл – 0,6...0,8 мм) непрерывно-последовательным способом. Схема обработки представлена на рис.1 [19, 20].

При упрочнении применялся индуктор петлевого типа, оснащенный ферритовым магнитопроводом марки N87 (для работы в диапазоне частот до 500 кГц) с магнитной проницаемостью $\mu_i = 2200$ (рис. 1). Исследования проводились при использовании интенсивного водяного душевого охлаждения поверхности (коэффициент теплоотдачи $\alpha = 30 \cdot 10^3$ Вт/(м^{2.}°C)) в следующем диапазоне режимов обработки: удельная мощность источника $q_{\mu} = (1,5...4,0) \cdot 10^8$ Вт/м², окружная скорость детали $V_{\pi} = (50...100)$ мм/с. Ширина активного провода индуктора составляла $R_{\mu} = 1,2$ мм, обработка осуществлялась с зазором $\delta = 0,1...0,2$ мм. С целью устранения возможности перегорания активного провода и обеспечения надежного отвода тепло-



Рис. 1. Схема обработки при ВЭН ТВЧ

ты толщина стенок индуктора составляет a = 0,12...0,15 мм [21–23].

Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе Carl ZeissAxio Observer A1m и растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 50 XVP. Металлографические шлифы готовили по стандартной технологии, основанной на механическом шлифовании и полировании анализируемого материала.

Математическое моделирование

Подготовка конечно-элементной модели (построение 3D модели образца, назначение типа конечных элементов (КЭ) и создание регулярной КЭ сетки) осуществлялась в программном комплексе *ANSYS*. Генератором *ANSYS Meshing* была сформирована гексаэдрическая КЭ сетка с использованием следующих типов конечных элементов: *Solid bodies* – твердые тела моделировали восьмиузловыми тетраэдрами *SOLID* 45; *Surface bodies* – поверхностные тела моделировали четырехузловыми четырехугольными оболочковыми элементами

SHELL 63; Line bodies – линейные тела моделировали двухузловыми линейными элементами LINK 8. Размер конечных элементов составлял 0,01...1 мм. Общее количество элементов(Elements) – 2 116 119 (рис. 2), при этом узлов (Nodes) – 7 482 433. При создании КЭ модели были созданы следующие компоненты: «Volume» – группа трехмерных элементов, обозначающих обрабатываемый объект; «Trajectory» – группа одномерных элементов, которая определяет траекторию перемещеОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

CM

ния источника энергии высокой концентрации; «*Reference*» – опорная эквидистанта – группа одномерных элементов, способствующая ориентированию локальной системы координат источника энергии; «*StartElem*» – стартовые элементы начала действия источника; «*StartNodes*» и «*EndNodes*» – начальные и конечные узлы на траектории перемещения; «*Skin*» – группа двухмерных элементов, обозначающих поверхности, по которым происходят конвективные и радиационные тепловые потери (*Convective and Radiative Losses*); «*ClampedNodes*» – группа узлов, по которым происходит закрепление диска.

Моделирование процесса ВЭНТВЧ осуществляли в системе SYSWELD, позволяющей посредством использования модели упруго-вязкопластического поведения материала и современного математического аппарата осуществить расчет температурных полей, распределения структурных составляющих, твердости, внутренних напряжений и деформаций [24].

При нагреве ТВЧ источником выделения энергии являются вихревые токи, возникающие в материале при воздействии переменных магнитных и электрических полей. Величина удельной мощности нагрева будет определяться плотностью тока *J*, характер изменения которого по глубине металла описывается зависимостью

$$J_{Z/J_{0}} = e^{-Z\sqrt{\frac{\pi\mu_{0}\mu f}{\rho_{e}}}}$$

Здесь J_Z – плотность тока на глубине $Z; J_0$ – плотность тока на поверхности; ρ_e – удельное электрическое сопротивление; f – частота тока; μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость вакуума;



Рис. 2. Конечно-элементная модель процесса ВЭН ТВЧ

μ – относительная магнитная проницаемость материала.

При нагреве стали изменяются ее удельное электрическое сопротивление и магнитная проницаемость, причем удельное сопротивление возрастает вплоть до точки магнитных превращений, после чего его рост замедляется. Магнитная проницаемость слабо зависит от температуры примерно до 650...700 °С, после чего быстро уменьшается и достигает величины, примерно равной магнитной проницаемости вакуума. Из изложенного следует, что распределение энергии по глубине материла не является постоянным.

Кинетические кривые нагрева ТВЧ поверхности изделия имеют перегиб в интервале температур 700...800 °С. Процесс нагрева разделяется на начальный этап с большой почти постоянной скоростью нарастания температуры и этап замедленного нагрева выше температуры потери сталью магнитных свойств. Основная причина замедления нагрева в точке магнитных превращений заключается в перераспределении энергии по сечению изделия. Действительно, в процессе нагрева всегда создается некоторый температурный градиент по сечению обрабатываемого объекта. Величины ρ_e и μ зависят от температуры материала. Распространение электромагнитного процесса происходит, таким образом, в среде с переменными ρ_e и μ. В работе [25] рассмотрен случай, когда материал состоит из двух слоев, имеющих разные ρ_e и μ. Если бы первый слой был нагрет выше температуры 800 °C, а второй не подвергся нагреву (20 °C), то распределение вихревого тока точно соответствовало бы зависимости, представленной на рис. 3. Следовательно, при условии, когда верхний слой материала потерял ферромагнитные свойства, а нижележащий слой нагрет до температуры, не превышающей температуры точки Кюри, происходит перераспределение плотности



Рис. 3. Распределение плотности тока по глубине в двухслойной среде

тока. Максимум энерговыделения смещается от поверхности в слой, не потерявший ферромагнитных свойств. Алгоритм перераспределения энергии по глубине материала на разных стадиях нагрева представлен на рис. 2.

Важную роль в создании математической модели играет расчет теплофизических и физикомеханических свойств и генерация базы данных материалов. Зависимости теплофизических характеристик (теплопроводность $\lambda(T)$, теплоемкость c(T) и удельная плотность $\rho(T)$) для данных марок сталей приняты по данным работ [26–28]. При описании предела текучести $\sigma_{\rm T}(T)$, модуля Юнга E(T), коэффициента Пуассона v(T), модуля упрочнения H(T) использовались данные, представленные в работах [29–36].

Результаты и обсуждение

В процессе моделирования температурных полей в сталях при ВЭН ТВЧ по алгоритму, представленному в работе [17], было установлено, что при определенном сочетании режимов нагрева температура нижележащего слоя может достигать более высоких значений, чем на поверхности (рис. 4). Так, температура слоя на глубине Z = 0,2 мм от поверхности достигает значений температуры плавления материала, в то время как температура поверхностного слоя ниже этого значения. Это происходит за счет того, что при разогреве поверхностного слоя до температуры точки Кюри Т_к, когда сталь теряет ферромагнитные свойства, большая часть энергии выделяется в нижележащем слое. При этом в поверхностном слое происходит интенсивный отбор тепла охлаждающей жидкостью,



Рис. 4. Термические циклы, реализуемые на различной глубине поверхностного слоя при нагреве ВЭН ТВЧ:

материал – сталь 45; $q_{\mu} = 200 \text{ MBt/m}^2$, $V_{\pi} = 60 \text{ мм/c}$, $R_{\mu} = 1,2 \text{ мм}$; I - Z = 0; 2 - Z = 0,2 мм; 3 - Z = 0,8 мм

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

подающейся непосредственно в зону нагрева, в то время как в нижележащем слое отвод тепла регламентируется условиями теплопроводности. В этом случае становится возможным образование жидкой фазы не на поверхности, а в более глубоких слоях нагреваемого металла.

Для подтверждения полученных результатов моделирования температурных полей был проведен эксперимент, реализующий режимы нагрева, представленные на рис. 4. В процессе обработки цилиндрического образца было зафиксировано возникновение автоколебаний индуктора, вызванного периодическими выбросами расплавленного металла на поверхность (рис. 5).

Рис. 5. Следы проплава на закаленных образцах



Это явление можно объяснить следующим образом. В данных условиях источник энергии является медленно движущимся, т. е. скорость теплопередачи выше скорости движения источника. Поэтому в начальный момент нагрева не наблюдается расплавления металла (см. рис. 4). Через определенный момент времени температура на глубине порядка 0,2 мм достигает значений температуры плавления металла (кривая 2). В этом случае в приповерхностном слое в зоне, расположенной непосредственно под индуктором, происходит образование замкнутого объема расплавленного металла. Тепловое расширение расплава приводит к возрастанию давления в данном объеме. Поверхностный слой металла, разогретый до высоких температур (кривая 1), становится пластичным. Это приводит к кинжальному проплавлению, т. е. расплавленный металл из нижележащего слоя выбрасывается наружу, оставляя на поверхности образца кратер (лунку), а также наплывы и капли расплавленного металла (рис. 6).

Следует отметить, что при определенных сочетаниях режимов поверхностной закалки оплавление материала может начинаться

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

и с поверхностного слоя. Однако, как видно на рис. 6, следов оплавления металла до лунки не наблюдается. Отсутствие следов оплавления после лунки объясняется тем, что в процессе выброса расплавленного металла происходит уменьшение зазора между активным проводом индуктора и обрабатываемой поверхностью, что приводит к увеличению интенсивности магнитного поля между индуктором и нагреваемым объектом. Это, в свою очередь, приводит к возрастанию отталкивающего удельного механического усилия между индуктором и деталью, что вызывает упругую деформацию токоподводящих медных трубок и, как следствие, происходит увеличение зазора и снижение удельной мощности нагрева.

После прохождения зоны расплавления за счет упругости индуктора величина зазора восстанавливается, и цикл нагрева поверхности детали повторяется. Именно с этим связана периодичность возникновения на образцах следов проплава металла (см. рис. 5). При этом следует подчеркнуть, что в процессе обработки не наблюдалось замыкания активного провода индуктора с обрабатываемой поверхностью, что привело бы к короткому замыканию и плавлению меди активного провода индуктора, приводящих к его разрушению. Для подтверждения данного факта был проведен микрорентгеноспектральный анализ оплавленного слоя, который показал отсутствие следов меди в расплаве (рис. 7).

Как показывает рис. 5, выброс расплавленного металла происходит не по всей ширине обрабатываемого образца, а в двух локальных зонах. Это объясняется достаточно трудоемкой технологией изготовления индуктора для реализации высокоэнергетического нагрева ТВЧ. При этом весьма сложно обеспечить абсолютную прямолинейность активного провода индуктора. Его профиль имеет отклонения от прямолинейности



Рис. 6. Лунка, образовавшаяся на поверхности образца после выброса расплавленного металла (*a*) и фрагмент поверхности внутри лунки (*б*)

Рис. 7. Дифракционные картины, снятые на двух участках локального оплавления металла

в пределах 0,02...0,04 мм, что, безусловно, сказывается и на уровне удельной мощности нагрева. Наиболее глубокий проплав металла происходит именно в тех двух зонах, где зазор между индуктором и обрабатываемой поверхностью был минимальным.

На рис. 8 показаны фрагменты поверхности, непосредственно прилегающие к лунке. Здесь отчетливо видна начальная стадия проплавления металла.



Рис. 8. Фрагменты зоны, соответствующей начальной стадии проплавления металла

В этой зоне расплав металла образовался на меньшей глубине, непосредственно в приповерхностном слое материала. На поверхности образца видны места пластической деформации (вспучивания) металла, а также отдельные микрократеры выброса расплавленного металла на поверхность.

На рис. 9 представлены снимки различных участков зоны оплавления металла, зафиксиро-

ванные на растровом электронном микроскопе *Carl Zeiss EVO50 XVP*. Наличие жидкой фазы металла, интенсивное охлаждение с поверхности за счет подачи охлаждающей жидкости непосредственно в зону нагрева и интенсивный отвод тепла в глубь металла за счет теплопроводности позволяют сделать вывод о возможности получения переохлажденного расплава. Как видно из рис. 9, на поверхности лунок формируется дендритное построение материала. Кристаллизация металла происходила в условиях быстрого охлаждения, что привело к возникновению значительных по величине градиентов напряжений и, как следствие, к возникновению микротрещин.



Рис. 9. Отдельные фрагменты зоны оплавления металла

Вывод

В процессе поверхностной закалки сталей наличие оплавления материала, как правило, недопустимо. Таким образом, на основании проведенных исследований сделан вывод о том, что назначать режимы поверхностной закалки с использованием ВЭН ТВЧ с одновременным душевым охлаждением необходимо исходя из наиболее теплонапряженного слоя. Так, например, для стали 45 максимальные значения температур реализуются на глубине 0,15...0,2 мм.

Авторы выражают благодарность доценту Новосибирского государственного технического университета В.Ю. Скибе за оказанную помощь в проведении натурных и теоретических исследований.

Список литературы

1. Multipass surface hardening of steel samples with inclined surfaces by concentrated electron beam in the air of atmosphere pressure / V.V. Abashkin, O.A. Gorshkov, A.A. Ilvin, A.S. Lovtsov, R.N. Rizakhanov // High Temperature Material Processes: an International Quarterly of High-Technology Plasma Processes. - 2004. -Vol. 8, N 3. - P. 427-432. - doi: 10.1615/HighTempMat-Proc.v8.i3.80.

2. Davis J.R. Surface hardening of steels: understanding the basics. -Materials Park, OH: ASM International, 2002. - 364 p. - ISBN 978-0-87170-764-2.

3. Анализ напряженно-деформированного состояния материала при высокоэнергетическом нагреве токами высокой частоты / В.Ю. Скиба, В.Н. Пушнин, И.А. Ерохин, Д.Ю. Корнев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). - 2014. -№ 3 (64). – C. 90–102.

4. Béjar M.A., Henríquez R. Surface hardening of steel by plasma-electrolysis boronizing // Materials and Design. - 2009. - Vol. 30, iss. 5. - P. 1726-1728. doi: 10.1016/j.matdes.2008.07.006.

5. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality / V.Yu. Skeeba, V.V. Ivancivsky, A.V. Kutyshkin, K.A. Parts // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2016. -Vol. 126. – P. 012016.– doi: 10.1088/1757-899X/126/1/012016.

6. Skeeba V., Pushnin V., Kornev D. Quality improvement of wear-resistant coatings in plasma spraying integrated with high-energy heating by high frequency currents // Applied Mechanics and Materials. - 2015. -Vol. 788. - P. 88-94. - doi: 10.4028/www.scientific.net/ AMM.788.88.

7. Perspective of high energy heating implementation for steel surface saturation with carbon / N. Plotnikova, A. Losinskaya, V. Skeeba, E. Nikitenko // Applied Mechanics and Materials. - 2015. - Vol. 698. - P. 351-354. - doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.351.

8. Surface hardening of steels with carbon by non-vacuum electron-beam processing / I.A Bataev, M.G. Golkovskii, A.A. Bataev, A.A. Losinskaya, A.I. Popelyukh, E.A. Drobyaz // Surface and Coatings Technology. - 2014. - Vol. 242. - P. 164-169. - doi: 10.1016/j. surfcoat.2014.01.038.

9. Oxide powder plasma processing by low-energy ions of titanium / E.M. Vodopyanov, A.V. Loginova, A.S. Ivashutenko, N.V. Martyushev // Applied Mechanics and Materials. - 2015 - Vol. 756. - P. 299-302. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.756.299.

10. Physical-mechanical properties of corundum-zirconium ceramic obtained by the technology of radial magnetoimpulse pressing / S.V. Akarachkin, A.A. Sivkov, ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

A.S. Ivashutenko, N.V. Martyushev // Applied Mechanics and Materials. - 2015. - Vol. 756. - P. 286-292. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.756.286.

11. Ion J.C. Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application. - Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. - 576 p. - ISBN-10: 008097189X. - ISBN-13: 978-0080971896.

12. Fauchais P.L., Heberlein J.V.R., Boulos M.I. Thermal spray fundamentals. - New York: Springer, 2014. -1566 p. - ISBN 978-0-387-28319-7. - doi: 10.1007/978-0-387-68991-3.

13. Handbook of thermal spray technology / J.R. Davis, ed. - Materials Park, OH: ASM International, 2004. – 338 p. – ISBN-10: 0-87170-795-0. – ISBN-13: 978-0-87170-795-6.

14. ASM Handbook. Vol. 5A. Thermal spray technology / R.C. Tucker jr, ed. - Materials Park, Ohio: ASM International, 2013. – 412 p. – ISBN 978-1-61503-996-8.

15. Numerical simulation of temperature field in steel under action of electron beam heating source / V.Yu. Skeeba, V.V. Ivancivsky, N.V. Martyushev, D.V. Lobanov, N.V. Vakhrushev, A.K. Zhigulev // Key Engineering Materials. - 2016. - Vol. 712. - P. 105-111. - doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.105.

16. Особенности структурных превращений в сталях, обусловленные использованием источников высококонцентрированной энергии / А.А. Батаев, И.А. Батаев, В.Г. Буров, В.В. Иванцивский // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). - 2004. - № 4 (25). - С. 18-19.

17. Иванцивский В.В. Численное моделирование температурных полей в материалах при упрочнении с использованием концентрированных объемных источников нагрева // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. -2004. – № 2. – C. 161–172.

18. Skeeba V., Ivancivsky V., Pushnin V. Numerical modeling of steel surface hardening in the process of high energy heating by high frequency currents // Applied Mechanics and Materials. - 2015. - Vol. 698. - P. 288-293. - doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.288.

19. Иванцивский В.В., Батаев В.А. Упрочнение поверхностных слоев деталей машин с использованием высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты // Ползуновский вестник. - 2005. -№ 2-2. – C. 104–112.

20. Иванцивский В.В., Скиба В.Ю., Зуб Н.П. Методика назначения режимов обработки, обеспечивающих рациональное распределение остаточных напряжений при поверхностной закалке ВЭН ТВЧ // Научный вестник НГТУ. - 2008. - № 3 (32). - С. 83-94.

21. Структура износостойких плазменных покрытий после высокоэнергетического воздействия

ТВЧ / Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, В.В. Иванцивский, В.Ю. Скиба, Н.В. Плотникова, Д.В. Лобанов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 4 (65). – С. 11–18.

22. Integration of production steps on a single equipment / V. Skeeba, V. Pushnin, I. Erohin, D. Kornev // Materials and Manufacturing Processes. – 2015. – Vol. 30, iss. 12. – P. 1408–1411. – doi: 10.1080/10426914.2014.973595.

23. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step "diamond smoothing" / V.Yu. Skeeba, V.V. Ivancivsky, D.V. Lobanov, A.K. Zhigulev, P.Yu. Skeeba // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 125. – P. 012031. – doi: 10.1088/1757-899X/125/1/012031.

24. Моделирование напряженно-деформированного состояния материала в программном комплексе SYSWELD при поверхностной закалке ТВЧ / В.Ю. Скиба, В.Е. Воротников, Р.А. Гарин, Е.А. Гарин // В мире научных открытий. – 2010. – № 2-3. – С. 16–19.

25. Бабат Г.И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. – М.; Л.: Энергия, 1965. – 552 с.

26. Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Линецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов / под ред. Я.Л. Лившица. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.

27. Теплопроводность твердых тел: справочник / под ред. А.С. Охотина. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 320 с.

28. Стали и сплавы. Марочник: справочник / под ред. В.Г. Сорокина, М.А. Гервасьева. – М.: Интермет инжиниринг, 2001. – 608 с. – ISBN 5-89594-056-0.

29. Denis S., Sjöström S., Simon A. Coupled temperature, stress, phase transformation calculation model numerical illustration of the internal stress evolution during cooling of a eutectoid steel cylinder // Metallurgical and Materials Transactions: A. – 1987. – Vol. 18, N 7. – P. 1203–1212. – doi: 10.1007/BF02647190.

30. *Hildenwall B., Ericsson T.* Prediction of residual stresses in case-hardening steel // Hardenability Concepts with Application to Steel / D.V. Doane and J.S. Kirkaldy, eds. – Warrendale: AIME, 1978. – P. 579–605.

31. Прус А.А., Ермолаев Б.И. Металлы и сплавы: справочные данные о физико-механических свойствах при различных температурах и условиях на-гружения. – М.: ЦНИИ, 1975. – 583 с.

32. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: справочник. – М.: Металлургия, 1989. – 383 с.

33. Скиба В.Ю. Повышение эффективности технологического процесса обработки деталей машин при интеграции абразивного шлифования и поверхностной закалки ТВЧ: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2008. – 257 с.

34. Fortunier R., Leblond J.B., Bergheau J.M. A Numerical model for multiple phase transformations in steels during thermal processes // Journal of Shanghai Jiaotong University (Science). -2000. - Vol. E5, no. 1. - P. 213-220.

35. *Sjöström S.* The calculation of quench stresses in steel: PhD diss. no. 84 / Linköping University, Linköping Studios in Science and Technology, Division of Solid Mechanics and Strength of Materials, Department of Mechanical Engineering. – Linköping, Sweden, 1982. – 126 p.

36. Иванцивский В.В. Управление структурным и напряженным состоянием поверхностных слоев деталей машин при их упрочнении с использованием концентрированных источников нагрева и финишного шлифования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.09 / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2012. – 425 с.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE) N 3 (72), July – September 2016, Pages 41–51

The formation of the liquid phase in the surface layer of steel components in the high-energy heat hardening by high frequency currents

Ivancivsky V.V., D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: ivancivskij@corp.nstu.ru
Bataev I.A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: ivanbataev@ngs.ru
Martynova T.G., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: tatyanamartynova1511@gmail.com
Vakhrushev N.V., Ph.D. student, Assistant, e-mail: vah_nikit@mail.ru
Cha G.O., Ph.D. student, Engineer, e-mail: Grigoriy olegovich@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

Purpose: To improve the operational properties of machine parts, the methods of modifying the surface layers of parts with highly concentrated energy sources, providing a heating rate of about 10⁴... 10⁵ °C/sec, are becoming more common. The target of the research is high-energy heat hardening of the surface by high-frequency currents (HEH HFC). This energy source is characterized by highly complicated energy distribution in the depth of the heated layer, which may cause the formation of micro volumes of molten metal in the depth of the material, leading to a significant reduction in the quality of the workpiece. Consequently, when setting the process parameters, it is necessary to take into account the processing characteristics by the given heat sources. Methods: Full-scale experiments are carried out on the cylindrical grinding machines 3B12, having an additional source of energy in the form of the external quenching circuit implementing high-energy heating by high-frequency currents. Structural studies are carried out using optical and scanning electron microscopy. Mathematical modeling of thermal fields and structural phase transitions using HEH HFC is carried out in ANSYS and SYSWELD software systems. Results and Discussion: It is theoretically grounded and proven in use that when performing the surface hardening of steel 45 using the highenergy heating by high-frequency currents and simultaneous shower water-cooling, the liquid phase may occur not on the surface but at the depth of 0,15...0,2 mm. Basing on the research the conclusion is as follows: when setting the processing parameters of the HEH HFC surface hardening with simultaneous shower water-cooling, they must be based on the most heat-stressed layer.

Keywords

surface hardening, high-frequency currents, FEM, structural steel, the liquid phase. DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-41-51

References

1. Abashkin V.V., Gorshkov O.A., Ilyin A.A., Lovtsov A.S., Rizakhanov R.N. Multipass surface hardening of steel samples with inclined surfaces by concentrated electron beam in the air of atmosphere pressure. *High Temperature Material Processes: an International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*, 2004, vol. 8, iss. 3, pp. 427–432. doi: 10.1615/HighTempMatProc.v8.i3.80

2. Davis J.R. Surface hardening of steels: understanding the basics. Materials Park, Ohio, ASM International Publ., 2002. 364 p. ISBN 978-0-87170-764-2

3. Skeeba V.Yu., Pushnin V.N., Erokhin I.A., Kornev D.Yu. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya materiala pri vysokoenergeticheskom nagreve tokami vysokoi chastoty [Analysis of the stress-strain state of the material under high-energy heating by high frequency currents]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2014, no. 3 (64), pp. 90–102.

4. Béjar M.A., Henríquez R. Surface hardening of steel by plasma-electrolysis boronizing. *Materials and Design*, 2009, vol. 30, iss. 5, pp. 1726–1728. doi: 10.1016/j.matdes.2008.07.006

5. Skeeba V.Yu., Ivancivsky V.V., Kutyshkin A.V., Parts K.A. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 126, p. 012016. doi: 10.1088/1757-899X/126/1/012016

6. *Skeeba V., Pushnin V., Kornev D.* Quality improvement of wear-resistant coatings in plasma spraying integrated with high-energy heating by high frequency currents. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 788, pp. 88–94. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.88

7. Plotnikova N., Losinskaya A., Skeeba V., Nikitenko E. Perspective of high energy heating implementation for steel surface saturation with carbon. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 351–354. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.351

8. Bataev I.A., Golkovskii M.G., Bataev A.A., Losinskaya A.A., Popelyukh A.I., Drobyaz E.A. Surface hardening of steels with carbon by non-vacuum electron-beam processing. *Surface and Coatings Technology*, 2014, vol. 242, pp. 164–169. doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.01.038

9. Vodopyanov E.M., Loginova A.V., Ivashutenko A.S., Martyushev N.V. Oxide powder plasma processing by low-energy ions of titanium. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 756, pp. 299–302. doi: 10.4028/www. scientific.net/AMM.756.299

10. Akarachkin S.V., Sivkov A.A., Ivashutenko A.S., Martyushev N.V. Physical-mechanical properties of corundum-zirconium ceramic obtained by the technology of radial magnetoimpulse pressing. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 756, pp. 286–292. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.756.286 ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

11. Ion J.C. Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application. Burlington, Elsevier Butterworth-Heinemann Publ., 2005. 576 p. ISBN-10: 008097189X. ISBN-13: 978-0080971896

12. Fauchais P.L., Heberlein J.V.R., Boulos M.I. *Thermal spray fundamentals*. New York, Springer, 2014. 1566 p. ISBN 978-0-387-28319-7. doi: 10.1007/978-0-387-68991-3

13. Davis J.R., ed. Handbook of thermal spray technology. Materials Park, Ohio, ASM International, 2004. 338 p. ISBN-10: 0-87170-795-0. ISBN-13: 978-0-87170-795-6

14. Tucker R.C. jr., ed. ASM Handbook. Vol. 5A. Thermal spray technology. Materials Park, Ohio, ASM International, 2013. 412 p. ISBN 978-1-61503-996-8

15. Skeeba V.Yu., Ivancivsky V.V., Martyushev N.V., Lobanov D.V., Vakhrushev N.V., Zhigulev A.K. Numerical simulation of temperature field in steel under action of electron beam heating source. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 712, pp. 105–111. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.105

16. Bataev A.A., Bataev I.A., Burov V.G., Ivancivsky V.V. Osobennosti strukturnykh prevrashchenii v stalyakh, obuslovlennye ispol'zovaniem istochnikov vysokokontsentrirovannoi energii [Features of structural transformations in steels based on highly concentrated energy sources]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science,* 2004, no. 4 (25), pp. 18–19.

17. Ivancivsky V.V. Chislennoe modelirovanie temperaturnykh polei v materialakh pri uprochnenii s ispol'zovaniem kontsentrirovannykh ob"emnykh istochnikov nagreva [Numerical modeling of temperature fields in materials hardening using concentrated volumetric heat sources]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarst-vennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2004, no. 2, pp. 161–172.

18. Skeeba V., Ivancivsky V., Pushnin V. Numerical modeling of steel surface hardening in the process of high energy heating by high frequency currents. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 288–293. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.288

19. Ivancivsky V.V., Bataev V.A. Uprochnenie poverkhnostnykh sloev detalei mashin s ispol'zovaniem vysokoenergeticheskogo nagreva tokami vysokoi chastoty [Surface hardening of machine parts by using high-energy heating by high frequency currents]. *Polzunovskii vestnik – Polzunov Bulletin*, 2005, no. 2-2, pp. 104–112.

20. Ivancivsky V.V., Skeeba V.Yu., Zub N.P. Metodika naznacheniya rezhimov obrabotki, obespechivayushchikh ratsional'noe raspredelenie ostatochnykh napryazhenii pri poverkhnostnoi zakalke VEN TVCh [Method of determining processing modes, ensuring the rational distribution of residual stresses in surface hardening HEH HFC]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2008, no. 3 (32), pp. 83–94.

21. Chesov Yu.S., Zverev E.A., Ivancivsky V.V., Skeeba V.Yu., Plotnikova N.V., Lobanov D.V. Struktura iznosostoikikh plazmennykh pokrytii posle vysokoenergeticheskogo vozdeistviya TVCh [Structure of wear resistant plasma coatings after high-energy treatment using high-frequency currents]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2014, no. 4 (65), pp. 11–18.

22. Skeeba V., Pushnin V., Erohin I., Kornev D. Integration of production steps on a single equipment. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, vol. 30, iss. 12, pp. 1408–1411. doi: 10.1080/10426914.2014.973595

23. Skeeba V.Yu., Ivancivsky V.V., Lobanov D.V., Zhigulev A.K., Skeeba P.Yu. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step "diamond smoothing". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 125, p. 012031. doi: 10.1088/1757-899X/125/1/012031

24. Skeeba V.Yu., Vorotnikov V.E., Garin R.A., Garin E.A. Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya materiala v programmnom komplekse SYSWELD pri poverkhnostnoi zakalke TVCh [Simulation of the stress-strain state of the material in the software package SYSWELD in surface hardening by high frequency]. *V mire nauchnykh otkrytii – In the World of Scientific Discoveries*, 2010, no. 2-3, pp. 16–19. (In Russian)

25. Babat G.I. *Induktsionnyi nagrev metallov i ego promyshlennoe primenenie* [Induction heating of metals and its industrial application]. Moscow, Leningrad, Energiya Publ., 1965. 552 p.

26. Lifshits Ya.L., Kraposhin V.S., Linetskii Ya.L. *Fizicheskie svoistva metallov i splavov* [Physical properties of metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980. 320 p.

27. Okhotin A.S., ed. *Teploprovodnost' tverdykh tel*: spravochnik [Thermal conductivity of solids: directory]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 320 p.

28. Sorokin V.G., Gervas'ev M.A., eds. *Stali i splavy. Marochnik*: spravochnik [Grade steels and alloys. Reference Edition]. Moscow, Intermet Engineering Publ., 2001. 608 p. ISBN 5-89594-056-0

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

CM

29. Denis S., Sjöström S., Simon A. Coupled temperature, stress, phase transformation calculation model numerical illustration of the internal stress evolution during cooling of a eutectoid steel cylinder. *Metallurgical Transactions: A*, 1987, vol. 18, no. 7, pp. 1203–1212. doi: 10.1007/BF02647190

30. Hildenwall B., Ericsson T. Prediction of residual stresses in case-hardening steel. *Hardenability Concepts with Application to Steel*. Ed by D.V. Doane and J.S. Kirkaldy. Warrendale, AIME, 1978, pp. 579–605.

31. Prus A.A., Ermolaev B.I. *Metally i splavy: spravochnye dannye o fiziko-mekhanicheskikh svoistvakh pri razlichnykh temperaturakh i usloviyakh nagruzheniya* [Metals and alloys. Reference data on the physical and mechanical properties at different temperatures and loading conditions]. Moscow, TsNII Publ., 1975. 583 p.

32. Zinov'ev V.E. *Teplofizicheskie svoistva metallov pri vysokikh temperaturakh*: spravochnik [Thermophysical properties of metals at high temperatures: directory]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1989. 383 p.

33. Skeeba V.Yu. *Povyshenie effektivnosti tekhnologicheskogo protsessa obrabotki detalei mashin pri integratsii abrazivnogo shlifovaniya i poverkhnostnoi zakalki TVCh*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of the technological processing machinery parts with the integration of abrasive grinding and surface hardening currents by high frequency currents. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2008. 257 p.

34. Fortunier R., Leblond J.B., Bergheau J.M. A numerical model for multiple phase transformations in steels during thermal processes. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2000, vol. E5, no. 1, pp. 213–220.

35. Sjöström S. *The calculation of quench stresses in steel*. PhD diss. no. 84. Linköping University, Linköping Studios in Science and Technology, Division of Solid Mechanics and Strength of Materials, Department of Mechanical Engineering. Linköping, Sweden, 1982. 126 p.

36. Ivancivsky V.V. Upravlenie strukturnym i napryazhennym sostoyaniem poverkhnostnykh sloev detalei mashin pri ikh uprochnenii s ispol'zovaniem kontsentrirovannykh istochnikov nagreva i finishnogo shlifovaniya. Diss. dokt. tekhn. nauk [Control of structural and stress state of the surface layers of machine parts during their hardening using concentrated sources of heat and abrasive finishing. Dr. eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2012. 425 p.

Acknowledgement

The authors would like to thank Associate Professor of Novosibirsk State Technical University V Yu Skeeba for his assistance in the theoretical research and full-sale investigation.

Funding

This study was supported by a NSTU grant (project No. TII-IITM-2_15).

Article history

Received 3 June 2016 Revised 15 July 2016 Accepted 15 August 2016