УДК 621.923+621.785

# АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО Состояния материала при высокоэнергетическом нагреве токами высокой частоты\*

В.Ю. СКИБА, канд. техн. наук, доцент В.Н. ПУШНИН, аспирант И.А. ЕРОХИН, аспирант Д.Ю. КОРНЕВ, магистрант (НГТУ, г. Новосибирск)

> Поступила 23 июля 2014 Рецензирование 21 августа 2014 Принята к печати 29 августа 2014

Скиба В.Ю. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, e-mail: skeeba vadim@mail.ru

Для повышения эксплуатационных свойств деталей машин все большее распространение получают методы модифицирования поверхностных слоев деталей с использованием концентрированных источников энергии, обеспечивающих высокие скорости нагрева – порядка 10<sup>4</sup>...10<sup>5</sup> °C/с. Вследствие чего достаточно затруднительно экспериментальное определение значений параметров термических циклов, необходимых для прогнозирования требуемой величины и характера распределения остаточных напряжений и деформации. В работе решается задача численного моделирования напряженно-деформированного состояния материала при высокоэнергетическом нагреве токами высокой частоты (ВЭН ТВЧ). Построение конечно-элементной модели происходило в программных комплексах ANSYS и SYSWELD, использующих численные методы решения дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности (уравнение Фурье), диффузии углерода (2-й закон Фика) и упругопластического поведения материала. Верификация результатов моделирования осуществлялась проведением натурных экспериментов с применением: оптической и растровой микроскопии; механического и рентгеновского методов определения остаточных напряжений. Установлено, что в рассматриваемом диапазоне изменения технологических режимов ВЭН ТВЧ уровень остаточных сжимающих напряжений на поверхности детали может достигать значений -500...-1000 МПа. Теоретически доказано и экспериментально подтверждено, что величина переходного слоя должна составлять 25...33 % от глубины упрочненного слоя, что обеспечивает смещение пика растягивающих напряжений в более глубокие слои материала при уменьшении величины сжимающих напряжений на поверхности в пределах 6...10 %, исключая при этом вероятность появления закалочных трещин.

**Ключевые слова:** высокоэнергетический нагрев, индукционная закалка, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, остаточные напряжения, поверхностный слой.

<sup>\*</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке проекта, выполняемого в рамках гранта РФФИ в 2014 г. и в плановом периоде в 2013–2015 гг. Номер проекта 13-08-01102 А.

CM

## Введение

Решение проблемы повышения надежности и долговечности выпускаемых изделий при обеспечении высокой производительности труда и эффективности использования ресурсов невозможно без разработки и совершенствования совре-

менных технологий поверхностного упрочнения [1, 2].

Среди большого многообразия прогрессивных технологий упрочнения деталей машин [2–5] важное место занимают методы поверхностного упрочнения с

использованием объемных концентрированных источников тепла [6-10]. Особый интерес с точки зрения упрочнения конструкционных сталей представляет высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты (ВЭН ТВЧ) [11]. Однако для эффективного использования ВЭН ТВЧ необходимо иметь надежный механизм назначения технологических режимов обработки, обеспечивающих требуемый уровень характеристик качества упрочненного слоя. Существующие на данный момент результаты в этой области [12–18] не дают однозначного решения данной проблемы, поскольку при достаточно подробном исследовании влияния режимов индукционной закалки на величину твердости и глубину упрочненного слоя, приводятся частные данные о напряженнодеформированном состоянии материала после обработки, которое, в свою очередь, оказывает существенное влияние на эксплуатационные характеристики изделия [19-20].

В данной работе ставится задача исследования напряженно-деформированного состояния материалов, подвергнутых высокоэнергетическому нагреву токами высокой частоты, с целью разработки надежного инструмента назначения рациональных режимов поверхностной закалки.

# 1. Методика экспериментального исследования

# Материалы и методы натурных экспериментов

В качестве образцов для поверхностного упрочнения использовались пластины из сталей 45 и У8. Выбор данных марок сталей обусловлен их широким применением в промышленности при изготовлении деталей машин, подвергаемых поверхностной закалке. Состав исходных материалов проверяли с использованием оптикоэмиссионного спектрометра ARL 3460. Результаты анализа представлены в таблице.

#### 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
У8	0,83	0,31	0,25	0,017	0,016	0,29	0,18	0,24

Предварительная подготовка образцов производилась на обрабатывающем центре DMC 635 и плоскошлифовальном станке 3Г71. Геометрические параметры пластин: 100×10×5 мм. Контроль размеров осуществлялся на профилографе-профилометре Form Talysurf Series 2.

Упрочнение образцов осуществлялось на экспериментальной установке, привод главного движения которой имеет плавное регулирование скорости в диапазоне V<sub>д</sub> = (5...200) мм/с. Источником энергии выбран ламповый генератор марки ВЧГ 6-60/0.44 с рабочей частотой тока 440.10<sup>3</sup> Гц. 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. При упрочнении использовался 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  $\alpha = 30.10^3$  Вт/(м<sup>2.°</sup>C)) в следующем диапазоне режимов обработки: удельная мощность источника  $q_{\mu} = (1,5 - 4,0) \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>, скорость перемещения детали  $V_{\rm d}$  = (50...100) мм/с. Ширина активного провода индуктора составляла  $R_{\mu} = 2$  мм, обработка осуществлялась с зазором  $\Delta = 0, 1 \dots 0, 2$  MM.

Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе Carl ZeissAxio Observer A1m и растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 50 XVP. Металлографические шлифы готовили по стандартной техноло-



Рис. 1. Схема обработки при ВЭН ТВЧ

гии, основанной на механическом шлифовании и полировании анализируемого материала. Для выявления микроструктуры использовали 5 %-й спиртовой раствор азотной кислоты (HNO<sub>3</sub>) [21].

Микротвердость упрочненного поверхностного слоя деталей оценивали на приборе Wolpert Group 402MVD. Исследования остаточных напряжений проводились с использованием рентгеновского метода на дифрактометре высокого разрешения ARL X`TRA [22] и механического разрушающего метода Н.Н. Давиденкова (послойное электролитического травление упрочненного образца). Для выявления дефектов поверхностного слоя после операций ВЭН ТВЧ использовались: визуально-оптический метод с применением микроскопа Carl ZeissAxio Observer A1m, капиллярный метод, токовихревой метод с применением вихретокового дефектоскопа ВД – 70.

ТЕХНОЛОГИЯ

### 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 8-узловыми тетраэдрами SOLID 45; Surface bodies поверхностные тела моделировали 4-узловыми 4-угольными оболочковыми элементами - SHELL 63; Line bodies - линейные тела моделировали 2-узловыми линейными элементами LINK 8. Размер конечных элементов составлял 0,01 ... 1 мм. Общее количество элементов (Elements) - 54400 (рис. 2). При создании КЭ модели были созданы следующие компоненты: «Volume» - группа трехмерных элементов, обозначающих обрабатываемый объект; «Trajectory» - группа одномерных элементов, которая определяет траекторию перемещения источника энергии высокой концентрации; «Reference» – опорная эквидистанта – группа одномерных элементов, способствующая



Рис. 2. Конечно-элементная модель процесса ВЭН ТВЧ

#### ТЕХНОЛОГИЯ

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 пластины.

Моделирование процесса ВЭНТВЧ осуществляли в системе SYSWELD, позволяющей использованием модели упруго-вязкопластического поведения материала и современного математического аппарата осуществить расчет температурных полей, распределения структурных составляющих, твердости, внутренних напряжений и деформаций [23].

Воспользоваться разработанным математическим аппаратом теории теплопроводности становится возможным только лишь при соответствующем описании теплового источника в месте его действия.

При обработке ВЭН ТВЧ форма источника в плоскости X-Y (т. е. в плоскости, которая перпендикулярна активному проводу индуктора) представляет собой прямоугольник, стороны которого определяются длиной l и шириной паза магнитопровода  $R_{\rm u}$  (рис. 1). Распространение индуктивного тока на поверхности обрабатываемого изделия будет определять распределе-

а

ние удельной мощности. Вдоль оси У распределение удельной мощности равномерно, а по оси Х – определяется отношением ширины паза магнитопровода  $R_{\mu}$  к величине зазора  $\Delta$  между обрабатываемой деталью и активным проводом индуктора. Кривые распределения удельной мощности представлены на рис. 3 [24]. Здесь отношение  $q(X) / q_0 = (H_X / H_0)^2 = f(X)$ , где  $q(X), q_0, H_X, H_0$  – значения удельной мощности и напряженности магнитного поля на поверхности в точке Х и под серединой индуктора (X=0). Принимая во внимание результаты работ [11, 25], было сделано соответствующее описание закона перераспределения выделяемой энергии по глубине материала при нагреве ТВЧ (см. рис. 2).

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

CM

Важную роль в создании математической модели играет расчет теплофизических и физико-механических 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  $\nu(T)$ , модуля упрочнения H(T) использовались данные, представленные в работах [29–35].

Адекватность математической модели проверялась опосредованно путем предварительно проведенных структурных исследований и определения микротвердости упрочненного слоя.

б



Рис. 3. Характер распределения удельной мощности под индуктором:



## 2. Результаты и обсуждение

Расчеты показали, что в условиях ВЭН ТВЧ достигаются достаточно высокие значения скоростей нагрева  $V_{\rm H} = 5...50 \cdot 10^3 \, {}^{\rm o}{\rm C/c}$  и охлаждения (в интервале температур (700...500)°С –  $V_{o_{-}700-500} = 3...33 \cdot 10^3 \, {}^{\rm o}{\rm C/c}$ , в интервале температур (400...150)°С –  $V_{o_{-}400-150} = 200...4100 \, {}^{\rm o}{\rm C/c}$ ). Также было зафиксировано (рис. 4), что при определенном сочетании режимов обработки температура нижележащего слоя может достигать значений больших, чем на поверхности. Это происходит за счет того, что при разогреве по-



материала при нагреве ВЭН ТВЧ:

материал – сталь 45;  $q_{\mu} = 200 \text{ MBt/m}^2$ ,  $V_{\mu} = 60 \text{ мм/c}$ ,  $R_{\mu} = 2 \text{ мм}$  верхностного слоя до температуры точки Кюри  $T_{\rm K}$  большая часть мощности выделяется в нижележащем слое. При этом в поверхностном слое происходит интенсивный отбор тепла охлаждающей жидкостью, подающейся непосредственно в зону нагрева, в то время как в нижележащем слое отвод тепла регламентируется условиями теплопроводности [36].

Такая динамика распределения теплового поля по сечению пластины является причиной неоднородных структурно-фазовых превращений в материале и возникновения в нем остаточных деформаций и напряжений, уровень которых

на поверхности может достигать значений  $\sigma = -500...-1000$  МПа. При проверке адекватности математической модели максимальная погрешность не превышала 4...8 %.

На рис. 5 представлены результаты оптической микроскопии и моделирования структурно-фазовых превращений для стали У8. Закалка ВЭН ТВЧ осуществлялась на следующих режимах:  $q_{\rm H} = 2,0\cdot10^8$  Вт/м<sup>2</sup>,  $V_{\rm A} = 60$  мм/с,  $R_{\rm H} = 2$  мм,  $\alpha = 3\cdot10^4$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C). При этом глубина закалки составила h = 0,62 мм, а величина переходной зоны – 0,25 мм. Микротвердость поверхностного слоя составляла 9100 МПа, при этом максимальное значение остаточных напряжений сжатия на поверхности  $\sigma = -605$  МПа (расчетное значение  $\sigma = -593$  МПа).



Рис. 5. Распределение структурных составляющих стали У8:



CM

Совместный анализ результатов численного моделирования и натурных экспериментов позволил установить зависимость глубины закалки от режимов обработки ( $q_{\mu}$  [Bt/m<sup>2</sup>],  $V_{\mu}$  [м/c]):

$$h(q_{\rm H}, V_{\rm A}) = a + bV_{\rm A} + cq_{\rm H} + + dV_{\rm A}^{2} + eq_{\rm H}^{2} + fV_{\rm A}q_{\rm H} + gV_{\rm A}^{3} + + hq_{\rm H}^{3} + iV_{\rm A}q_{\rm H}^{2} + jV_{\rm A}^{2}q_{\rm H}, \qquad (2)$$

для стали У8:

a = 1,122425, b = -25,210979,  $c = 3,673506 \cdot 10^{-9}, d = 281,263627,$   $e = 8,690586 \times 10^{-18}, f = -8,175952 \times 10^{-8},$   $g = -1471,413565, h = 1,428863 \times 10^{-27},$   $i = -9,270236 \cdot 10^{-17}, j = 6,005372 \cdot 10^{-7};$ стали 45:

$$a = 0,426008, b = 2,827121, c = 3,025072 \cdot 10^{-9},$$
  

$$d = -301,591960, e = -4,694423 \times 10^{-18},$$
  

$$f = 3,600666 \cdot 10^{-8}, g = 1953,668810,$$
  

$$h = 3,216427 \cdot 10^{-27}, i = 1,375401 \cdot 10^{-17},$$
  

$$j = -3,779403 \cdot 10^{-7}.$$

Таким образом, любое сочетание режимов  $(q_{\rm H}, V_{\rm A})$ , отвечающее данным зависимостям, позволяет при соответствующих условиях охлаждения обеспечить заданную глубину упрочнения. Однако, как показали результаты математического и натурного экспериментов, полученные диапазоны режимов упрочнения не гарантируют формирование закаленного слоя без наличия закалочных трещин, основной причиной появления которых является внутреннее напряженное состояние материала.

В образце из стали У8, обработка которого осуществлялась на режимах  $q_{\mu} = 3,1\cdot10^8 \text{ Вт/м}^2$ ,  $V_{\mu} = 80 \text{ мм/с}$ ,  $R_{\mu} = 2 \text{ мм}$ ,  $\alpha = 3\cdot10^4 \text{ Вт/(m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ , при дефектоскопии была зафиксирована закалочная трещина (рис. 6). При этом глубина закалки составила h = 0,62 мм, величина переходной зоны – 0,12 мм.

Совместный анализ графиков распределения микротвердости и осевых остаточных напряжений по глубине упрочненного слоя позволил прийти к следующим выводам: для данных марок сталей в исследуемом диапазоне режимов упрочнения величина остаточных напряжений будет определяться в основном уровнем твердости, градиентом падения микротвердости и глубиной упрочнения. Как видно из рис. 7, снижение уровня поверхностной твердости и глубины упрочнения приводит к уменьшению сжимающих напряжений и смещению максимума растягивающих напряжений к поверхности. Последнее при определенных условиях может стать причиной выхода из строя изделия, так как разрушение будет начинаться под упрочненным слоем, в месте максимума растягивающих напряжений. При большом градиенте падения микротвердости ( $\xi > 32 \pm 2$  МПа/мкм)



#### Рис. 6. Образование закалочной трещины в стали У8:

*а* – распределение структурных составляющих (оптическая микроскопия); *б* – распределение осевых остаточных напряжений (результаты моделирования напряженно – деформированного состояния)



*Рис.* 7. Распределение микротвердости и остаточных напряжений в поверхностном слое стали У8:

*а* – режим –  $q_{\mu} = 2,0.10^8 \text{ BT/m}^2$ ,  $V_{\mu} = 60 \text{ мм/c}$ ,  $R_{\mu} = 2 \text{ мм}$ ,  $\alpha = 3.10^4 \text{ BT/(m}^{2.\circ}\text{C})$ ;  $\delta$  – режим –  $q_{\mu} = 3,1.10^8 \text{ BT/m}^2$ ,  $V_{\mu} = 80 \text{ мм/c}$ ,  $R_{\mu} = 2 \text{ мм}$ ,  $\alpha = 3.10^4 \text{ BT/(m}^{2.\circ}\text{C})$ ; *I* – расчетная эпюра осевых остаточных напряжений; *2* – эпюра остаточных напряжений, полученная экспериментально; ▲ – остаточные напряжения, полученные рентгеновский методом определения

наблюдается значительное повышение сжимающих напряжений на поверхности, но происходит увеличение негативных растягивающих напряжений в глубине материала, и более того их максимум начинает смещаться к поверхности изделия. Это может привести к тому, что в процессе эксплуатации детали в условиях знакопеременных нагрузок очаг разрушения детали может возникнуть именно в месте расположения максимальных растягивающих напряжений. Кроме того, в процессе поверхностной закалки в данной зоне могут возникнуть закалочные микротрещины, которые визуально на детали не видны, но являются очагом разрушения детали в процессе эксплуатации.

В связи с тем что основной технологической характеристикой при поверхностной закалке является глубина упрочнения (необходимый уровень твердости обеспечивается подбором соответствующей марки стали), воздействовать на величину и характер распределения остаточных напряжений возможно лишь путем изменения величины переходной зоны.

Учитывая тот факт, что очагом разрушения детали в процессе эксплуатации является месторасположение максимальных растягивающих напряжений  $\sigma_{p max}$ , необходимо переместить опасную зону как можно глубже от поверхности изделия. Естественно, глубина залегания  $\sigma_{p max}$ будет наибольшей в том случае, если величина переходного слоя окажется максимальной. Но в этом случае наблюдается значительное снижение сжимающих напряжений  $\sigma_{c \ max}$  на поверхности. Анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований показал, что величина переходного слоя должна составлять 25...33 % от глубины упрочненного слоя. Именно при выполнении этого требования значения  $\sigma_{p\,max}$  смещаются в более глубокие слои материала, при этом величина сжимающих напряжений на поверхности в среднем уменьшается не более чем на 6...10 %. При этом большие значения величины переходной зоны необходимо обеспечивать при закалке сталей с большим содержанием углерода.

В этом случае при выборе режимов поверхностной закалки деталей, работающих в условиях циклических нагрузок, вводится еще один критерий – относительная величина переходной зоны  $\Psi(q_{\rm H}, V_{\rm A})$ , т. е. отношение величины переходной зоны к глубине закаленного слоя.

В результате обработки результатов экспериментальных исследований были получены соответствующие функциональные зависимости для исследуемых материалов и диапазонов режимов обработки (*q*<sub>и</sub> [Bт/м<sup>2</sup>], *V*<sub>д</sub> [м/с]):

$$\Psi(q_{\mu}, V_{\mu}) = a + bV_{\mu} + cq_{\mu} + dV_{\mu}^{2} + eq_{\mu}^{2} + fV_{\mu}q_{\mu} + gV_{\mu}^{3} + hq_{\mu}^{3} + iV_{\mu}q_{\mu}^{2} + jV_{\mu}^{2}q_{\mu}, \qquad (3)$$

где  $0,25 \le \Psi(q_{\mu}, V_{\pi}) \le 0,33.$ 

Значение коэффициентов функциональной зависимости:

для стали У8:

$$a = 0,013232, b = 7,354214, c = 5,814168 \times 10^{-9},$$
  

$$d = 31,678703, e = -1,724837 \times 10^{-17},$$
  

$$f = -8,746601 \times 10^{-8}, g = -543,57972,$$
  

$$h = 1,233 \times 10^{-26}, i = 1,139227 \times 10^{-16},$$
  

$$i = 2,287546 \times 10^{-7};$$

стали 45:

a = 0,087564, b = -7,429933,  $c = 1,062284 \times 10^{-8}, d = 235,19293,$   $e = -3,424286 \times 10^{-17}, f = -8,850919 \times 10^{-8},$   $g = -1309,3045, h = 2,9423 \times 10^{-26},$  $i = 1,403793 \times 10^{-16}, j = 1,010925 \times 10^{-7}.$ 

Таким образом, определение удельной мощности и скорости перемещения источника при поверхностной закалке осуществляется посредством решения системы уравнений  $h(q_{\rm u}, V_{\rm d})$  и  $\Psi(q_{\rm u}, V_{\rm d})$  при заданных значениях глубины закалки и относительной величине переходной зоны. На рис. 8 представлено графическое решение данной задачи. Можно заметить, что полученный диапазон режимов обработки существенно уже по отношению к назначению режимов исходя из обеспечения лишь заданной глубины упрочненного слоя (кривые 1 и 2).

При закалке стали У8 на глубину 0,6 мм диапазон рекомендуемых режимов ограничен точками *A* и *B* на кривой *I*: при этом  $q_{\mu} = (2,4...2,6) \cdot 10^8 \text{ Bt/m}^2$ ,  $V_{\mu} = (69...76) \text{ мм/c}$ .

При закалке стали 45 на глубину 0,6 мм диапазон рекомендуемых режимов ограни-



ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

CM

Рис. 8. Зависимость удельной мощности источника от его скорости движения при закалке ВЭН ТВЧ стали 45 и У8 на глубину 0,6 мм: *1* – сталь У8; *2* – сталь 45

чен точками *C* и *D* на кривой 2: при этом  $q_{\mu} = (3,0...3,4) \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>,  $V_{\mu} = (72...80)$  мм/с.

Таким образом, полученные режимы обработки гарантируют получение необходимой глубины закалки и рациональную величину переходной зоны. Необходимо отметить, что если в результате решения системы уравнений получается достаточно широкий диапазон сочетания режимных параметров, то можно провести их оптимизацию по критериям: максимальная производительность и минимальные энергозатраты на обработку.

## Выводы

1. Численно методом КЭ решена задача моделирования напряженно-деформированно-го состояния материала при поверхностном упрочнении высокоэнергетическим нагревом токами высокой частоты. Показано, что при ВЭН ТВЧ скоростей нагрева и охлаждения составляют, соответственно:  $V_{\rm H} = 5...50\cdot10^3 \,{}^{\rm o}{\rm C/c}$  и  $V_{\rm o_700-500} = 3...33\cdot10^3 \,{}^{\rm o}{\rm C/c}$  (в интервале температур (700...500) °C ). При этом уровень остаточных напряжений на поверхности пластины составляет  $\sigma_{\rm c\ max} \approx -500...-1000$  МПа, а в зоне переходного слоя –  $\sigma_{\rm p\ max} \approx 100...500$  МПа.

2. Для исследуемых марок сталей установлена функциональная зависимость величины переходного слоя от режимов обработки  $\Psi(q_{\mu}, V_{\mu})$ . Показано, что при  $0,25 \leq \Psi(q_{\mu}, V_{\mu},) \leq 0,33$  обеспечивается смещение пика растягивающих напряжений в более глубокие слои материала при уменьшении величины сжимающих напряжений на поверхности в пределах 6...10 %.

3. Решением системы уравнений  $h(q_{\rm u}, V_{\rm d})$  System и  $\Psi(q_{\rm u}, V_{\rm d})$  определены режимы обработки ВЭНТВЧ, гарантирующие получение необходи-

ВЭНТВЧ, гарантирующие получение необходимой глубины закалки и рациональную величину переходной зоны.

## Список литературы

1. Advanced Tribology: proceedings of CIST2008 & ITS-IFToMM2008 / Jianbin Luo, Yonggang Meng, Tianmin Shao, Qian Zhao, eds. – Beijing: Tsinghua University Press; Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. – 1056 p.

2. *Davis J.R.* Surface Hardening of Steels: understanding the Basics. – Ohio: Materials Park: ASM International, 2002. – 364 p.

3. *Ion J.C.* Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application. – Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. – 576 p.

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. 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. Ilyin, A.S. Lovtsov, R.N. Rizakhanov // High Temperature Material Processes: an International Quarterly of High-Technology Plasma Processes. – 2004. – Vol. 8, iss. 3. – P. 427–432. – doi: 10.1615/ HighTempMatProc.v8.i3.80

6. Songa R.G., Zhanga K., Chena G.N. Electron beam surface treatment. Pt. 1: Surface hardening of AISI D3 tool steel // Vacuum. – 2003. – Vol. 69, iss. 4. – P. 513–516. – doi: 10.1016/S0042-207X(02)00583-3

7. Pulsed electron beam facility (GESA) for surface treatment of materials / V. Engelko, B. Yatsenko, G. Mueller, H. Bluhm // Vacuum. – 2001. – Vol. 62, iss. 2-3. – P. 211–216. – doi: 10.1016/S0042-207X(00) 00446-2

8. *Golkovskii M.G.* Hardening and cladding of a relativistic electron beam outside the vacuum // Technological capabilities of the method. – Saarbrucken: LAPLAMBERT Acad. Publ., 2013. – 317 p.

9. 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

10. Rudnev V.I., Loveless D. 12.15 – Induction Hardening: Technology, Process Design, and Computer Modeling // Comprehensive Materials Processing. – 2014. – Vol. 12: Thermal Engineering of Steel Alloy Systems. – P. 489–580. – doi: 10.1016/B978-0-08-096532-1.01217-6

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

12. *Кидин И.Н.* Физические основы электротермической обработки материалов и сплавов. – М.: Металлургия, 1969. – 376 с.

13. Головин Г.Ф., Замятнин М.М. Высокочастотная термическая обработка: вопросы металловедения и технологии. – Л.: Машиностроение, 1990. – 239 с.

14. Иванцивский В.В., Батаев В.А. Связь параметров термических циклов, реализуемых в поверхностных слоях деталей машин, с глубиной упрочнения при воздействии объемных концентрированных источников нагрева // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2004. – № 10. – С. 30–34.

15. Иванцивский В.В., Скиба В.Ю., Степанова Н.П. Назначение режимов поверхностной закалки с использованием концентрированных источников нагрева // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2005. – № 3. – С. 22–24.

16. *Kohli A., Singh H.* Optimization of processing parameters in induction hardening using response surface methodology // Sadhana. – 2011. – Vol. 36, iss. 2. – P. 141–152. – doi: 10.1007/s12046-011-0020-x

17. Иванцивский В.В., Скиба В.Ю. Повышение поверхностной микротвердости стали при интеграции поверхностно-термической и финишной механической обработок // Научный вестник НГТУ. – 2006. – № 3. – С. 187–192.

18. 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. – С. 83–95.

19. Residual stresses in surface induction hardening of steels: comparison between experiment and simulation/ D. Coupard, T. Palin-Luc, P. Bristiel, V. Ji, C. Dumas // Materials Science and Engineering: A. – 2008. – Vol. 487, iss. 1-2. – P. 328–339. – doi: 10.1016/j.msea.2007.10.047

20. *Totten G.E., Howes M., Inoue T.* Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. – Ohio: ASM International: Materials Park, 2002. – 499 p.

21. ASM HandBook. Vol. 9. Metallography and microstructures / prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee; vol. ed. G.F. Vander Voort. – Ohio: Materials Park: ASM International, 2004. – 1184 p.

22. Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics / W.N. Sharpe, ed. – Leipzig-New York: Springer Science and Business Media, 2008. – 1098 p.

#### ТЕХНОЛОГИЯ

23. Моделирование процессов структурообразования при формировании сварного соединения из разнородных сталей / А.А. Никулина, В.Ю. Скиба, Е.Е. Корниенко, Е.Н. Миронов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). - 2011. -№ 4 (53). – C. 54–61.

24. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.

25. Иванцивский В.В. Связь режимов обработки с теплофизическими процессами в материале при интеграции поверхностной термической и финишной механической обработок // Современная электротехнология в промышленности России [Электронный ресурс]: тр. Всерос. науч.-техн. конф., Тула, 27-28 окт. 2003 г. – Тула, 2003. – С. 249–258. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - ISBN 0320300984.

26. Физические свойства металлов и сплавов: справочник / под ред. Я.Л. Лифшиц. – М., 1980. – 320 с.

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

28. Стали и сплавы. Марочник: справ. изд. / под ред. В.Г. Сорокина, М.А. Гервасьева. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 608 с.

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, iss. 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 нагружения. – 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: спец. 05.03.01 / Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2008. – 257 c.

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. - 2000. - Vol. E5, iss. 1. -P. 213–220.

35. Sjöström S. The Calculation of Quench Stresses in Steel: Ph.D. Diss. № 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: спец. 05.16.09 / Новосиб. гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2012. – 425 c.

#### **OBRABOTKA METALLOV**

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE) N 3(64), July – September 2014, Pages 90–102

# Analysis of the stress-strain state of the material under high-energy heating by high frequency currents

Skeeba V. Yu., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: skeeba vadim@mail.ru Pushnin V.N., Post-graduate Student, e-mail: valerka 777-90@mail.ru Erohin I.A., Post-graduate Student, e-mail: erokhinivana@gmail.com Kornev D.Yu., Master's Degree student, e-mail: cornev.dima@yandex.ru

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

#### Abstract

**Purpose**: To increase the performance properties of the machine parts, part surface layer modification methods are becoming more and more popular. They use concentrated energy sources to achieve high heating rates of around 10<sup>4</sup> to  $10^5$  °C/s. Therefore, it is rather difficult to experimentally determine the values of the heat cycle parameters that are needed to predict the required size and character of the residual stress distribution and deformation. The task of

№ 3 (64) 2014 99

CM



ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

this paper is to numerically model the stress-strain state of the material under high energy heating by high-frequency currents (HEH HFC). **Methods:** The finite element model was created in the ANSYS and SYSWELD software complexes that use numerical methods to solve differential equations of transient heat conduction (Fourier equation), carbon diffusion (Fick's second law) and elastoplastic material behavior. The modeling results were verified by means of natural experiments using optical and scanning microscopy, mechanical and X-ray methods to detect residual stresses. **Results and Discussion:** It was established that in the observed change range of the HEH HFC modes, the level of residual compression stresses on surfaces of parts may achieve the values of -500 to -1000 MPa. It was theoretically proven and experimentally confirmed that the size of the transition layer should constitute 25 to 33 % of the hardened layer depth, which shifts the peak of the tension stresses to the deeper layers of the material while decreasing the compression stresses on the surface by 6 to 10 % and excluding the possibility of heat treatment crack formation.

## **Keywords:**

high-energy heating, high-frequency hardening, FEM, stress-strain state, residual stresses, surface layer.

#### References

1. Jianbin Luo, Yonggang Meng, Tianmin Shao, Qian Zhao. Advanced Tribology: Proceedings of CIST2008 & ITS-IFToMM2008. Beijing, Tsinghua University Press, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2009. 1056 p.

2. Davis J.R. Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics. Ohio, Materials Park, ASM International, 2002. 364 p.

3. Ion J.C. Laser processing of engineering materials: Principles, procedure and industrial application. Burlington, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. 576 p.

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. 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

6. Songa R.G., Zhanga K., Chena G.N. Electron beam surface treatment. Pt. 1: Surface hardening of AISI D3 tool steel. Vacuum, 2003, vol. 69, iss. 4, pp. 513-516. doi: 10.1016/S0042-207X(02)00583-3

7. Engelko V., Yatsenko B., Mueller G., Bluhm H. Pulsed electron beam facility (GESA) for surface treatment of materials. Vacuum, 2001, vol. 62, iss. 2-3, pp. 211-216. doi: 10.1016/S0042-207X(00)00446-2

8. Golkovskii M.G. Hardening and cladding of a relativistic electron beam outside the vacuum. Technological capabilities of the method. Saarbrucken, LAPLAMBERT Academic Publ., 2013. 317 p.

9. 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

10. Rudnev V.I., Loveless D. 12.15 – Induction Hardening: Technology, Process Design, and Computer Modeling. Comprehensive Materials Processing, 2014, vol. 12: Thermal Engineering of Steel Alloy Systems, pp. 489-580. doi: 10.1016/B978-0-08-096532-1.01217-6.

11. Ivantsivskii 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.

12. Kidin I.N. *Fizicheskie osnovy elektrotermicheskoi obrabotki materialov i splavov* [Physical basis of electrothermal treatment of materials and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1969. 376 p.

13. Golovin G.F., Zamyatnin M.M. *Vysokochastotnaya termicheskaya obrabotka. Voprosy metallovedeniya i tekhnologii* [High-frequency heat treatment. Problems of Metallurgy and Technology]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1990. 239 p.

14. Ivantsivskii V.V., Bataev V.A. Svyaz' parametrov termicheskikh tsiklov, realizuemykh v poverkhnostnykh sloyakh detalei mashin, s glubinoi uprochneniya pri vozdeistvii ob"emnykh kontsentrirovannykh istochnikov nagreva [Communication parameters of thermal cycles, implemented in the surface layers of machine parts, with the depth

of hardening under the influence of volume concentrated heat sources]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii*. *Chernaya metallurgiya* – *Steel in Translation*, 2004, no. 10, pp. 30-34 (in Russian).

15. Ivantsivskii V.V., Skeeba V.Yu., Stepanova N.P. Naznachenie rezhimov poverkhnostnoi zakalki s ispol'zovaniem kontsentrirovannykh istochnikov nagreva [Assignment mode of surface hardening, which is carried out by using a concentrated heat source]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2005, no. 3, pp. 22-24.

16. Amit Kohli, Hari Singh. Optimization of processing parameters in induction hardening using response surface methodology. Sadhana, 2011, vol. 36, iss. 2, pp. 141-152. doi: 10.1007/s12046-011-0020-x

17. Ivantsivskii V.V., Skeeba V.Yu. Povyshenie poverkhnostnoi mikrotverdosti stali pri integratsii poverkhnostnotermicheskoi i finishnoi mekhanicheskoi obrabotok [Increased surface microhardness of steel in the integration of surface-thermal and mechanical finishing treatments]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2006, no. 3, pp. 187-192.

18. Ivantsivskii 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 NGTU – Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2008, no. 3, pp. 83-95.

19. Dominique Couparda, Thierry Palin-Luca, Philippe Bristielb, Vincent Jic, Christian Dumasd Residual stresses in surface induction hardening of steels. Comparison between experiment and simulation. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, vol. 487, iss. 1-2, pp. 328-339. doi: 10.1016/j.msea.2007.10.047

20. Totten G.E., Howes M., Inoue T. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. Ohio, ASM International, Materials Park, 2002. 499 p.

21. ASM Handbook. Vol. 9. Metallography and microstructures. Prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee, vol. ed. G.F. Vander Voort. Ohio, Materials Park, ASM International. 2004. 1184 p.

22. Sharpe W.N., ed. Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics. Leipzig-New York, Springer Science and Business Media, 2008. 1098 p.

23. Nikulina A.A., Skeeba V.Yu., Kornienko E.E., Mironov E.N. Modelirovanie protsessov strukturoobrazovaniya pri formirovanii svarnogo soedineniya iz raznorodnykh stalei [Simulation of structure formation during welding of heterogeneous steels]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2011, no. 4 (53), pp. 54-61.

24. Slukhotskii A.E., Ryskin S.E. *Induktory dlya induktsionnogo nagreva* [Inductors for Induction Heating]. Leningrad, Energiya Publ., 1974. 264 p.

25. Ivantsivskii V.V. [Communication processing modes with the thermal processes in the material at the integration of surface thermal and mechanical finishing treatments]. *Trudy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* "Sovremennaya elektrotekhnologiya v promyshlennosti Rossii" [Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference "Modern electrotechnology industry in Russia"]. Tula, 2003, pp. 249-258.

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

27. Okhotin A.S. *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: Spravochnoe izdanie* [Grade steels and alloys. Reference Edition]. Moscow, Intermet Engineering Publ., 2001. 608 p.

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, iss. 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, D.V. Doane and J.S. Kirkaldy, eds. 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

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

technological processing machinery parts with the integration of abrasive grinding and surface hardening currents by high frequency currents. Dr. tech. 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, 2000, iss. 1, pp. 213-220.

35. Sjöström S. The Calculation of Quench Stresses in Steel. Ph.D. Diss. Linköping University, Linköping Studios in Science and Technology, Division of Solid Mechanics and Strength of Materials, Department of Mechanical Engineering. Linköping, Sweden, 1982, no. 84. 126 p.

36. Ivantsivskii 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.

### Funding

CM

The reported study was partially supported by RFBR, research project No. 13-08-01102 a.

Received 23 July 2014 Revised 21 August 2014 Accepted 29 August 201