

УДК 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В СТАЛИ ПРИ НЕПРЕРЫВНО-ИМПУЛЬСНОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ОБРАБОТКЕ

Щукин В.Г., Марусин В.В. (ИТПМ СО РАН, Новосибирск, Россия)

Тел. +7 (383) 3302713; E-mail: marusin@itam.nsc.ru

Аннотация. В статье приводится модель импульсной индукционной обработки поверхности стальных деталей с подвижным источником энергии. Численными методами исследуется эволюция полей напряжений и деформаций в поперечном сечении толстой стальной пластины, сопряженных с изменениями фазового состава. Анализируются распределение остаточных напряжений и пластических деформаций.

Ключевые слова: напряженное состояние, поверхностный слой, высокочастотная импульсная обработка, протяжка, упрочнение, деформации

1. Введение.

Определение переходных и остаточных напряжений, индуцированных в стали в процессе ее обработки высокочастотными (ВЧ) импульсами, требует применения сложных моделей, принимающих во внимание электромагнитные, тепловые, металлургические и механические явления. Актуальность решения этой проблемы заключается в том, что образование поверхностных слоев с большими остаточными сжимающими напряжениями является одним из способов упрочнения деталей машин и механизмов. Хотя численный анализ генерации термических остаточных напряжений в металлах в ходе закалки проводился в течение многих лет [1], имеются лишь несколько работ по моделированию поверхностного упрочнения при индукционной обработке. К тому же, эти исследования ограничивались вариантом непрерывного источника ВЧ поля и цилиндрической формы образца и индуктора [2]. Работы по моделированию индукционной закалки плоских поверхностей с движущимся импульсным источником практически отсутствуют. Между тем, импульсная обработка имеет ряд преимуществ по сравнению с непрерывной, одно из которых – возможность значительно, более чем на порядок, увеличить мощность энерговклада и, следовательно, сократить общую длительность процесса. Данная работа посвящена расчету полей напряжений и деформаций в толстом стальном образце (Ст. 45) при его обработке последовательностью ВЧ импульсов одинаковой амплитуды.

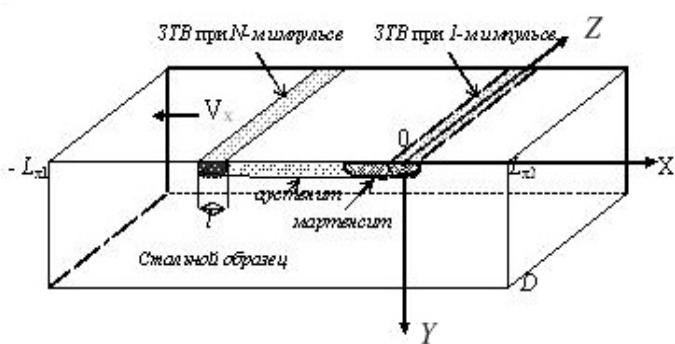


Рис. 1. Схема импульсной закалки и расчетная область

ствии отдельного высокочастотного импульса имеет вид узкой длинной полосы, чья ширина l много меньше характерных размеров образца ($l \ll L_{x1}, L_{x2}$ и D , см. рис. 1).

Тогда эволюция теплового и электромагнитного полей в любом поперечном сечении образца может быть описана с помощью двумерных моделей, а для расчета на-

Индуктор с плоской рабочей поверхностью движется вдоль поверхности образца с постоянной скоростью V_x . Зона термического воздействия (ЗТВ) в стали при воздействии

пряженного состояния применима модель плоской деформации. Изменение фазового состава описывается с помощью кинетических уравнений роста аустенитной и мартенситной фаз. Целью моделирования является определение поля напряжений (деформаций) в «хвосте» полосы обработки, где образуется слой упрочняющей мартенситной фазы.

2. Математическая модель.

Нестационарное температурное поле в стали при обработке ВЧ импульсами с периодом $T_{imp} = t_{imp} + t_{pause}$ (t_{imp} - длительность импульсов, t_{pause} – длительность пауз между ними) в неподвижной системе координат, связанной с образцом, описывается уравнением теплопроводности с источником:

$$(\rho c + \sum_n \rho_n \chi_n \frac{\partial f_n}{\partial T}) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k \frac{\partial T}{\partial y} + Q_{\text{эм}}(x, y, t), \quad (1)$$

где ρ, c , k - теплофизические свойства стали, зависящие от температуры, χ_n – теплота реакций образования новой n -фазы в стали, $Q_{\text{эм}}(x, y, t)$ - объемная плотность мощности энерговыделения, которая принимается равной нулю вне области действия ВЧ импульсов и во время пауз между ними:

$$Q_{\text{эм}} = \begin{cases} Q_{\text{эм}}(x, y, t) \neq 0, -l/2 - V_x t \leq x \leq l/2 - V_x t, t_n - t_{imp} \leq t \leq t_n, \\ 0, x < -l/2 - V_x t, x > l/2 - V_x t, t_n < t < t_n + t_{pause}, t_n = (n-1)T_{imp} + t_{imp}, n = 1, 2, \dots \end{cases}$$

Объемный источник $Q_{\text{эм}}(x, y, t)$ определяется посредством последовательного решения уравнений Максвелла на каждом временном шаге. Электромагнитная и тепловая сопряженные задачи исследовались авторами ранее и их постановку можно найти в [3].

Уравнение теплопроводности решается при краевых условиях, включающих конвективный и излучательный теплообмен на поверхности стали. Тогда в квазистатическом приближении напряженно-деформированное состояние стального образца в каждый момент времени должно удовлетворять уравнениям равновесия, зависящим, в том числе, и от его структурно-фазового состояния. Численное исследование такой задачи в случае одиночного импульса было проведено авторами ранее [4]. Очевидно, что постановка задачи упругопластичности не изменяется при переходе от случая обработки материала одиночным импульсом к режиму непрерывно-импульсного воздействия. Основные допущения модели приводятся ниже.

Положим, что материал, подвергаемый тепловому циклу индукционного поверхностного упрочнения, механически ведет себя как первоначально изотропный, упругопластический, деформационно-упрочняющийся континуум - такой, что компонент полной деформации ε_{ij} можно задать в виде следующей суммы:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^{th} + \varepsilon_{ij}^{tra} + \varepsilon_{ij}^{tp}, i, j = (x, y, z),$$

где ε_{ij}^e , ε_{ij}^p , ε_{ij}^{th} , ε_{ij}^{tra} и ε_{ij}^{tp} - упругая, пластическая, термическая компоненты полной деформации, компоненты деформации фазовых превращений и пластичности фазовых превращений, соответственно.

Плоскодеформированная модель термоупругопластичности, в которой постулируется $\varepsilon_{yy} = \varepsilon_{xy} = 0$, описывается следующей системой уравнений относительно переме-

щений $u(x,z)$ и $v(x,z)$, подлежащей решению на каждом временном шаге термического цикла:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\lambda+2\mu)\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}\mu\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\lambda\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial y}\mu\frac{\partial v}{\partial x}+F_1(x,y)=0, \\ \frac{\partial}{\partial y}(\lambda+2\mu)\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\mu\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}\lambda\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\mu\frac{\partial u}{\partial y}+F_2(x,y)=0, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} F_1 &= 2\frac{\partial}{\partial y}\mu(\varepsilon_{xy}^p + \varepsilon_{xy}^{tp}) - \frac{\partial}{\partial x}[2\mu(\varepsilon_{xx}^p + \varepsilon_{xx}^{tp}) + (3\lambda + 2\mu)(\varepsilon_{xx}^{th} + \varepsilon_{xx}^{tra})], \\ F_2 &= 2\frac{\partial}{\partial x}\mu(\varepsilon_{xy}^p + \varepsilon_{xy}^{tp}) - \frac{\partial}{\partial y}[2\mu(\varepsilon_{yy}^p + \varepsilon_{yy}^{tp}) + (3\lambda + 2\mu)(\varepsilon_{yy}^{th} + \varepsilon_{yy}^{tra})]. \end{aligned}$$

Здесь λ, μ – коэффициенты Ляме [4]. Система уравнений (2) замыкается нулевыми начальными и граничными условиями, удовлетворяющими условиям равенства нулю нормальных и касательных напряжений на поверхности тела ($z=0$) и отсутствию деформаций на границах расчетной области (при $x=-L_{x1}$ и L_{x2} ; $z=D$). По рассчитанному в каждый момент времени полю перемещений не составляет труда по известным формулам [5] вычислить поля деформаций и напряжений.

Для описания пластичного поведения стали, т.е. для получения связи между скоростью пластической деформации $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ и девиаторами напряжений s_{ij} , нами принята модель Боднера-Партома [6]:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \Lambda(\{\sigma_{kl}\}, T, k_1, k_2, \dots, k_m) s_{ij}.$$

Значения параметров этой модели $\{k_1, k_2, \dots, k_m\}$ при различных температурах определялись по результатам испытаний одноосного растяжения образцов из среднеуглеродистой стали [7].

Сталь 45 первоначально имеет ферритно-перлитный состав. Обозначая через f_{fp} , f_a и f_m объемные доли начальной (ферритно-перлитной), промежуточной (аустенитной) и конечной (мартенситной) фаз ($f_{fp}+f_a+f_m=1$) и принимая во внимание закон аддитивности, получаем следующие выражения для скоростей термической деформации и деформации превращения:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij}^{th} &= \delta_{ij}[\alpha_{fp}^t f_{fp} + \alpha_a^t f_a + \alpha_m^t f_m] \Delta T, \\ \varepsilon_{ij}^{tra} &= \delta_{ij}[f_a \varepsilon_{fp \rightarrow a}^{tra, 0^0 C} + f_m \varepsilon_{fp \rightarrow m}^{tra, 0^0 C}], \end{aligned}$$

где α_k^t – коэффициент теплового расширения k -й фазы, $\varepsilon_{k \rightarrow l}^{tra, 0^0 C}$ – деформация, возникающая при $k \rightarrow l$ -превращении при температуре $0^0 C$, δ_{ij} – символ Кронекера. Согласно

[8], $\varepsilon_{fp \rightarrow a}^{tra,0^0C} = -0.001$ и $\varepsilon_{fp \rightarrow m}^{tra,0^0C} = +0.006$. Скорость пластичной деформации, вызванной аустенитно-мартенситным превращением, описывается моделью Леблона [8]:

$$\varepsilon_{ij}^{tp} = 3K'(1 - f_m) f_m s_{ij},$$

где K' – константа, равная $6 \cdot 10^{-5}$ МПа $^{-1}$ для большинства сталей.

Наконец, модель необходимо дополнить уравнениями кинетики фазовых превращений. Образование аустенита происходит, в основном, на стадии нагрева (когда $T \geq Ac_1 = 1000$ К), и затем его объемная доля f_a^{\max} не уменьшается, пока материал не подвергнется мартенситному превращению. Для вычисления объемной доли аустенитной фазы f_a ($0 \leq f_a \leq f_a^{\max}$) применялся закон роста типа Аврами [8]:

$$f_a(t) = f_{eu} \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^n} \right],$$

где f_{eu} – равновесная при данной температуре доля аустенита; n, τ – зависящие от температуры параметры. Расчет объемной доли мартенсита основан на уравнении Койстинена-Марбургера:

$$f_m(t) = (1 - e^{-k_m(M_h - T(t))}) f_a^{\max},$$

где k_m – константа, равная 0.011 K^{-1} для большинства сталей [8], M_h – температура начала мартенситного превращения, принятая равной постоянной величине 360^0C .

3. Результаты моделирования и их обсуждение.

Расчеты проводились для частоты электромагнитного поля $f=440$ кГц, ширины ЗТВ $l=2$ мм, толщины $D=30$ мм, значений L_{x1} и $L_{x2}=35$ мм. Другие параметры ВЧ-импульсной обработки, варьировавшиеся в ходе численных экспериментов, приведены в таблице. Число импульсов N_{imp} не превышало 15 из-за ограниченных возможностей компьютера. Скорость движения индуктора V_x подбиралась такой, чтобы степени перекрытия ЗТВ двух последовательных импульсов были не менее 50%. В последнем столбце приводятся рассчитанные значения максимальной температуры поверхности для данного варианта.

Таблица 1. Параметры режимов обработки

Режим обработки №	W кВт/см 2	V_x см/с	t_{imp} мс	t_{pause} мс	T_{\max} К
1	15	1	30	90	1600
2	15	0.6	30	90	1600
3	10	0.6	60	120	1550

Система уравнений (1-2) аппроксимировалась конечно-разностными схемами и затем решалась неявными методами с нижней релаксацией. Для дискретизации расчетной области использовались равномерные сетки с числом узлов по координатам x и y такими, что размер пространственного шага по обеим осям был одинаков: $h = h_x =$

$h_y=100$ мкм. Величина временного шага $\Delta t=0.2\text{--}0.5$ мс. Погрешности расчетов не превышали 10^{-3} для температурного поля и 10^{-2} для поля смещений на каждом временном шаге. Время обсчета одного варианта для времени протяжки порядка 2 сек на компьютере с процессором Intel 4 2.4 ГГц составляла несколько суток.

Графики изменения температуры и среднего напряжения $\bar{\sigma}=(\sigma_{xx}+\sigma_{yy}+\sigma_{zz})/3$ для некоторых точек поверхностного слоя приведены на рис. 2.

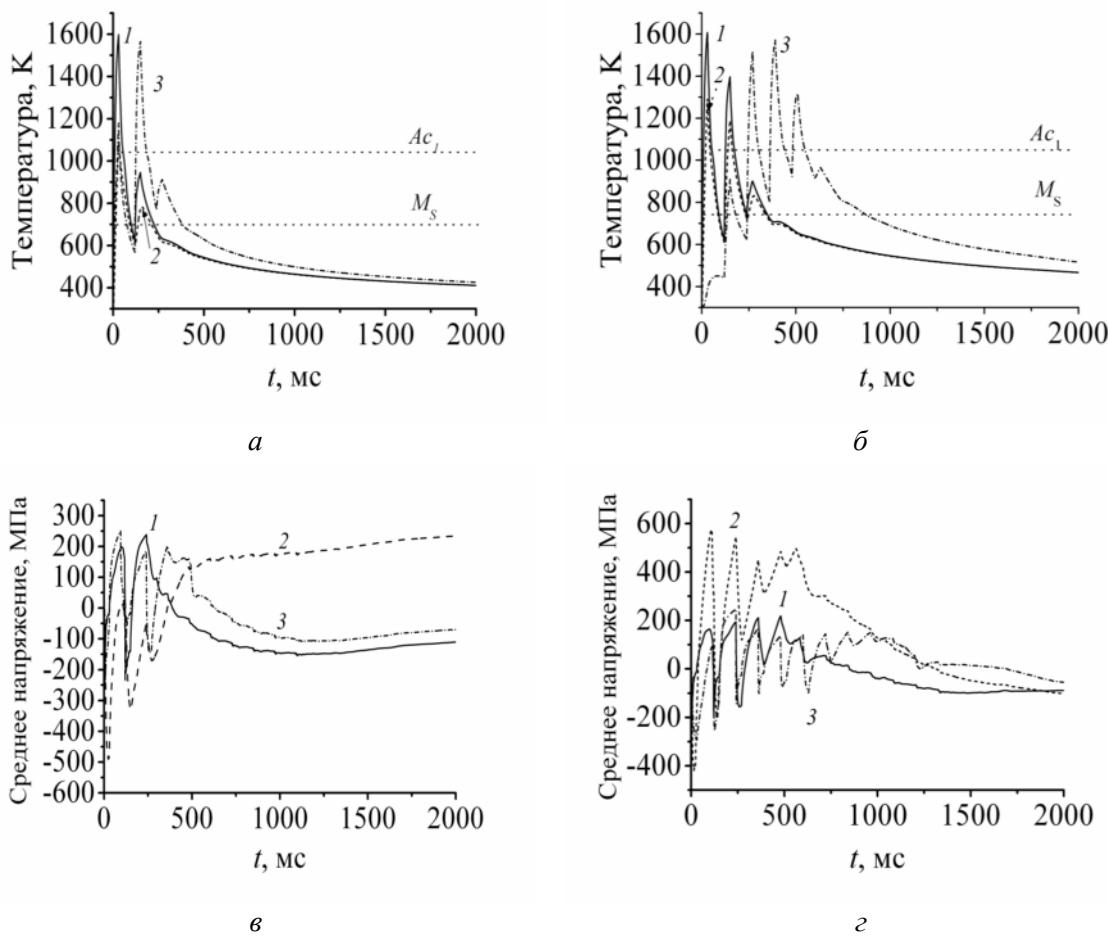


Рис. 2. Динамика изменения температуры (*а*, *б*) и среднего напряжения (*в*, *г*) при скорости движения индуктора $V_x=1$ см/с (*а*, *в*, режим 1) и 0.6 см/с (*б*, *г*, режим 2) в различных точках поперечного сечения стального образца

1: $x=y=0$; 2: $x=0, y=0.3$ мм; 3: $y=0, x=-1$ мм (режим 1) и $x=-2$ мм (режим 2)

Как следует из результатов моделирования, каждая точка поверхностного слоя испытывает несколько последовательных стадий нагрева и охлаждения. Соответственно, рост сжимающих напряжений сменяется ростом растягивающих и наоборот. С понижением скорости протяжки V_x с 1 до 0,6 см/с число стадий нагрева, в ходе которых в узком поверхностном слое (порядка 0,3-0,5 мм) достигается температура выше точки начала аустенитного превращения $Ac_1=1000$ К, возрастает с 2 до 3 (рис.2*а*, *б*). Можно оценить, что тепловое воздействие каждого импульса в направлении, противоположном движению индуктора, ограничено расстоянием, приближенно равным ширине ЗТВ (в данном случае 2-2,5 мм). В этой зоне образуется наиболее пластичная фаза аустениита, что ведет к уменьшению по амплитуде возникающих в процессе обработки как сжимающих, так и растягивающих напряжений (рис.2*в*, *г*). Вне этой области происходит охлаждение с монотонным спадом ее скорости. Мартенсит закалки образуется в

далнем «хвосте» полосы обработки, где выполняются условия: $T \leq M_H = 633$ К и скорость охлаждения меньше критической (10 К/с). По характеру установившихся в этой области распределений напряжений и деформаций можно судить о качестве упрочнения поверхности.

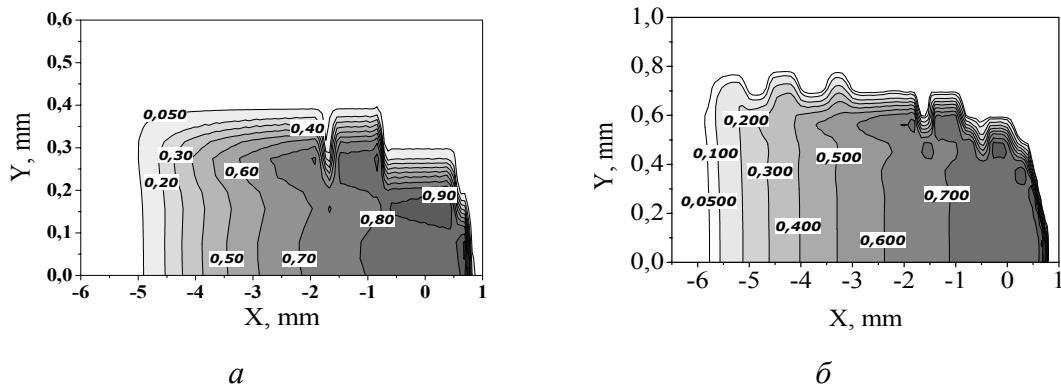


Рис. 3. Распределение степени мартенситного превращения в поперечном сечении стали в моменты времени, соответствующие воздействию 10-го (*a*, режим 1) и 15-го импульса (*b*, режим 3)

Толщина мартенситного слоя не превышает 0.4 мм при более высокой скорости движения 1 см/с (режим 1), в то время как при понижении последней до 0.6 см/с (режим 2) глубина мартенситного превращения увеличивается почти в 2 раза. Но распределение мартенсита в стали остается неравномерным. Это связано с низким теплообменом с окружающей средой (дополнительное охлаждение отсутствует), в результате чего скорость образования мартенситной фазы со временем существенно снижается. Не более чем в одной трети объема упрочненного слоя доля мартенсита составляет 80-90%, но по мере приближения к фронту мартенситного превращения доля последнего резко падает. Очевидно, что именно неравномерностью фазового состава поверхностного слоя, которая ведет к неоднородным термическим деформациям при нагреве и охлаждении, объясняется довольно сложная картина полей напряжений и деформаций в слое.

Распределения напряжений и пластических деформаций на поверхности стали и по толщине образца в различные моменты времени приведены на рис. 4(*a*, *b*). Быстрый нагрев во время действия ВЧ импульса создает перед индуктором область больших сжимающих напряжений (до -300 МПа). Непосредственно под индуктором в области полного аустенитного превращения имеют место небольшие сжимающие напряжения. Пластические деформации при этом достигают максимальной величины. Далее за срезом индуктора, т.е. в области, в которой поверхностный слой охлаждается, следует чередование областей растягивающих (от +150 до +200 МПа) и сжимающих напряжений (от -50 до -75 МПа), что является результатом наложения друг на друга зон действия предыдущих импульсов. Зона растягивающих напряжений соответствует области высоких скоростей охлаждения, но при температурах выше точки мартенситного перехода. На этой стадии возникает высокое дополнительное пластическое растяжение, существенно снижающее сформировавшиеся на стадии нагрева пластические деформации сжатия. Ниже точки начала мартенситного перехода пластическое состояние изменяется очень медленно (рис. 4*b*). Образование мартенсита сопровождается генерацией до-

полнительных сжимающих напряжений. Напряженное состояние мартенситной зоны зависит как от напряженного состояния аустенитной области перед ее мартенситным превращением, так и от степени ее превращения в мартенсит. Так, напряжения на по-

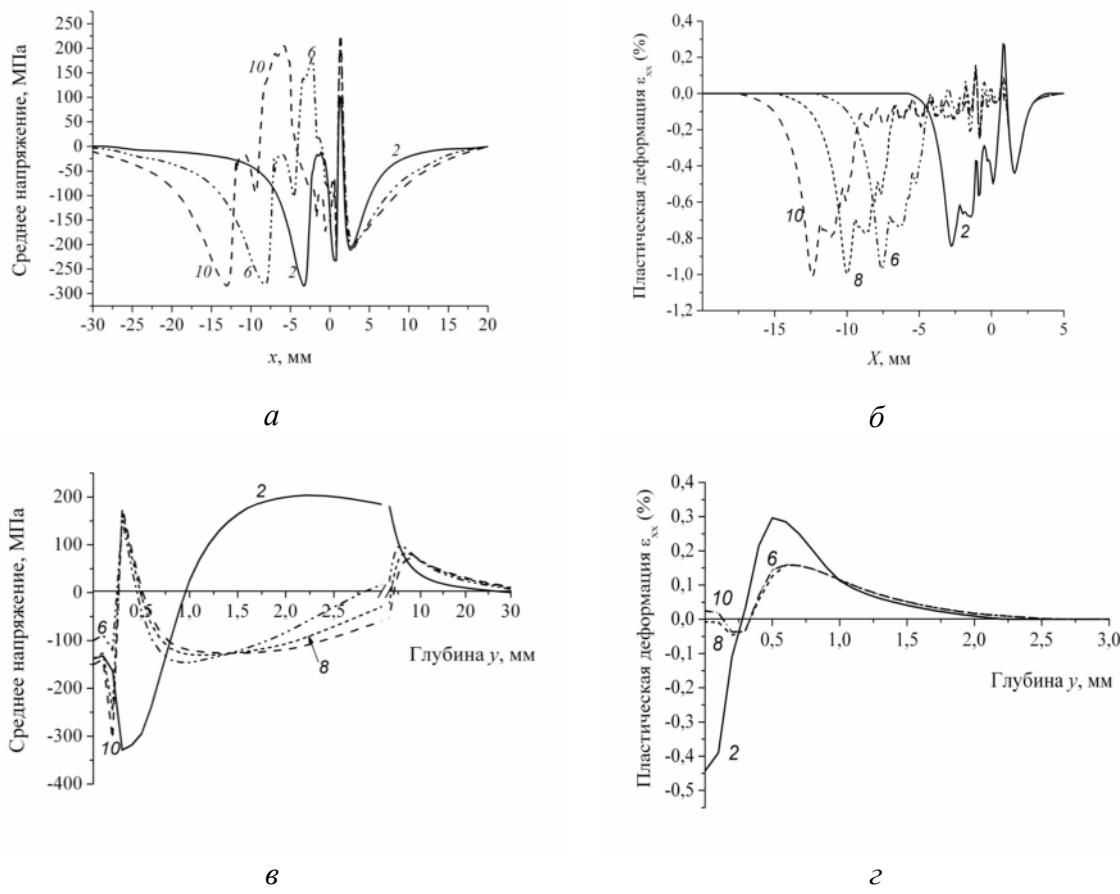


Рис. 4. Распределение на поверхности $y=0$ (а, б) и по толщине при $x=0$ (в, г) средних напряжений (а, в) и продольных пластических деформаций (б, г). Вариант 1 Цифры у кривых означают порядковый номер импульса

верхности вдоль мартенситной «дорожки», образованной к моменту окончания 10-го импульса, варьируются от +25 МПа при 50%-ом содержании мартенсита, $f_m=0.5$, до -100 МПа при $f_m=0.8$ (см. рис. 3а, 4а).

Рассчитанные распределения по толщине стали в «хвосте» обработанной области, ($x=0$) в различные моменты времени, приведены на рис. 4(в, г). Как видим, уже после нагрева 6-м импульсом, когда источник тепла удалился от данной точки на расстояние более 5.4 мм, напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя изменяется незначительно. В результате приповерхностная мартенситная зона характеризуется сжимающими напряжениями порядка 100-150 МПа и очень незначительными пластическими деформациями, а максимальные остаточные напряжения и деформации локализованы на большей глубине и соответствуют границе мартенситной зоны. Расчеты с пониженной скоростью протяжки продемонстрировали отсутствие существенного отличия в характере распределений остаточных напряжений и деформаций на поверхности образца, но более равномерное их распределение по толщине.

4. Заключение.

Разработана модель переходного напряженно-деформированного состояния полу бесконечного стального образца при обработке движущимся источником мощных

электромагнитных импульсов. На распределение напряжений в стали в значительной степени влияет мартенситное превращение, которое приводит к формированию приповерхностной области сжимающих напряжений и, тем самым, к упрочнению поверхности. Повышение скорости движения индуктора приводит к уменьшению толщины получаемого мартенситного слоя, но с более высокими сжимающими напряжениями.

Список литературы: 1. Denis S., Sjostrem S., Simon A. Coupled temperature, stress, phase transformation calculation model. Numerical illustration of the internal stresses evolution during cooling of a eutectoid carbon steel cylinder // Metallurgical Trans. 1987. V. 18A, N 7. P. 1203-1213. 2. Xu D., Li Z., Luo J. Expressions for predicting the residual stress in surface induction hardening of steel bars // Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 1996. V. 4. P. 111-122. 3. Щукин В.Г., Марусин В.В. Моделирование энергопоглощения в стали при обработке мощными высокочастотными импульсами различной частоты //ПМТФ. 2004. Т. 45, N 6. С. 154-168. 4. Щукин В.Г., Марусин В.В. Численное исследование напряженного состояния поверхности слоя стали при высокочастотной импульсной обработке // Междун. сборник научных трудов «Прогрессивные технологии в машиностроении», вып.38. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – С.256-262. 5. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений М. "Мир", 1964, 518 с. 6. Chan K.S., Bodner S.R., Lindholm U.S. Phenomenological modeling of hardening and thermal recovery in metals //J. Eng. Math. Tech. 1988. V. 110. P. 1-8. 7. Stoffel M., Schmidt R., Weiherdt D. Shock wave-loaded plate //Int. J. Solids and Structures. 2001. V.38. P. 7659-7680. 8. Alberg H., Berglund D. Comparison of plastic, viscoplastic, and creep models when modelling welding and stress relief heat treatment //Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 2003. V. 192. P. 5189-5208. 9. Yang Y.-S., Na S.-J. Effect of transformation plasticity on residual stress fields in laser surface hardening treatment //J. Heat Treating, 1991. V. 9. P. 49-56.

MODELLING OF STRESSES AND STRAINS IN STEEL DURING CONTINUOUS-PULSED HIGH-FREQUENCY TREATMENT

Schukin V.G., Marusin V.V. (ITAM SB RAS, Novosibirsk, Russia)

Abstract: The model of pulsed high-frequency induction treating of a surface layer of carbon steel details with a moving energy source is considered. Evolution of stress and strain fields in cross-section of the thick steel plate, coupled with the changes of phase structure, is investigated by numerical methods. Distributions of residual stresses and plastic deformations are analyzed

Key words: carbon steel, stress and strain state, surface layer, high-frequency pulsed treatment, moving source, hardening

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В СТАЛИ ПРИ НЕПРЕРЫВНО-ИМПУЛЬСНОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ОБРАБОТКЕ

Щукин В.Г., Марусин В.В. (ИТПМ СО РАН, Новосибирск, Россия)

Аннотация. В статье рассматривается модель импульсной индукционной обработки поверхности стальных деталей с подвижным источником энергии. Численными методами исследуется эволюция полей напряжений и деформаций в поперечном сечении толстой стальной пластины, сопряженных с изменениями фазового состава. Анализируются распределение остаточных напряжений и пластических деформаций

Ключевые слова: напряженное состояние, поверхностный слой, высокочастотная импульсная обработка, протяжка, упрочнение, деформации

Надійшла до редколегії 02.06.2011 р.