

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЛЕГИРОВАННЫХ (ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ И ХРОМИСТЫХ) СТАЛЕЙ ПРИ ДИФфуЗИОННОМ НАСЫЩЕНИИ ХРОМОМ В ПРОЦЕССЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Н.И. Китаев

Представлены результаты математического анализа и моделирования кинетики нагрева и распределения тепловых потоков в системе «индуктор – деталь» с учетом компонент среды, используемой для насыщения хромом. Экспериментально получены данные о влиянии режимов индукционного нагрева токами высокой частоты в процессе упрочнения методом диффузионного насыщения на параметры шероховатости, фазовый состав и микротвердость.

Ключевые слова: моделирование, процесс, обработка, экономичность, поверхностный слой, качество, себестоимость.

Интенсификация методов поверхностного упрочнения является одним из направлений исследований, направленных на снижение себестоимости выпуска деталей машин и инструмента и повышение эффективности технологического процесса.

Цель работы – исследование кинетики нагрева и распределения тепловых потоков в системе индуктор–деталь и определение оптимального режима индукционного нагрева токами высокой частоты (ТВЧ) в процессе упрочнения поршневого пальца методом диффузионного насыщения хромом.

Исследование осуществлялось на поршневых пальцах ГОСТ Р ИСО 18669-1-2018 ($d_1 \times d_2 \times l_1$, 14×9,5×43 мм) из стали 12ХНЗА и 40Х. Для этого на них наносили обмазку, полученную путем синтеза соли 2-моноэтаноламина СТП ТУ КОМП 2-198-10 и ледяной уксусной кислоты ГОСТ 61-75 ($\text{CH}_3\text{C}(\text{O})\text{O}^-\text{H}_3\text{N}^+\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$) с добавлением сажи Т 900 ГОСТ 7885–86 и окиси хрома ГОСТ 2912–79 [1], помещали в контейнер, засыпали смесью частиц сажи Т 900 и порошка диоксида кремния в соотношении 50:50 мас. % и размещали в центре индуктора.

Настройка контура и геометрия индуктора обеспечивали нагрев за 40–60 с до температуры 1200–1300 °С и ее стабилизацию.

Исследование кинетики нагрева и распределения тепловых потоков в системе «индуктор – деталь» проведено путем представления искомого решения в виде дифференциального уравнения теплопроводности (1):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q(T) - C(T) \rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

с учетом температурной зависимости тепло- и электрофизических свойств компонент сред, используемых для диффузионного насыщения хромом и последующего моделирования процесса в программном обеспечении ELCUT 5.1.

При расчете задавались краевые условия, математическое описание которых представлено уравнениями (2–5), в виде:

начальных условий (2) и (3):

$$T(x, 0) = T_0, \quad x \in [0, \varnothing_{дет.}]; \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} \right|_{t=0} = 0, \quad x \in [0, \varnothing_{дет.}]; \quad (3)$$

и граничных условий (4) и (5):

$$\left. \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad t \in [0, t_m]; \quad (4)$$

$$\left. \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right|_{x=\varnothing_{дет.}} = 0, \quad t \in [0, t_m]. \quad (5)$$

Геометрическая модель системы «индуктор – деталь» с полной и упрощенной детализацией показаны на рис. 1 и 2. Наличие мелких элементов требует частой сетки конечных элементов (КЭ), что приводит к невозможности решения задачи или значительным временным затратам при ее решении [2, 3], поэтому для моделирования использовалась упрощенная детализация (рис. 2). На правой части рис. 2 показана сетка КЭ.

Геометрическая модель (см. рис. 1) состоит из: 1 – граница расчетной области; 2 – верхняя крышка контейнера; 3 – крепеж для фиксации детали внутри контейнера (в составе шпилька, шайба плоская, гайка); 4 – электропроводная среда (смесь порошков сажи Т 900 и диоксида кремния); 5 – насыщающая среда (обмазка); 6 – поршневой палец; 7 – индуктор с жидкостным охлаждением ($d \times S$, 8×1 мм); 8 – охлаждающая жидкость (вода); 9 – контейнер из сплава ВТ1-0 ($d \times h$, 40×90 мм); 10 – нижняя крышка контейнера; точка I – центр детали и всей расчетной области, точка II – граница детали с окружающей средой.

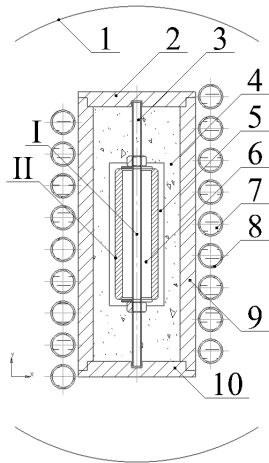


Рис. 1. Геометрическая модель системы «индуктор – деталь» с полной детализацией

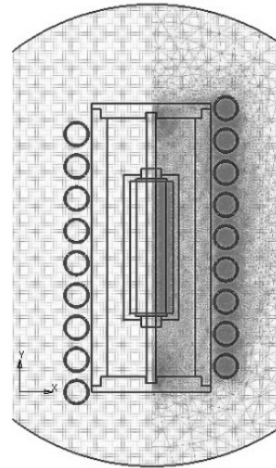


Рис. 2. Геометрическая модель системы «индуктор – деталь» с упрощенной детализацией

Решением уравнения (1) с учетом краевых условий (2–5) получены зависимость изменения температуры во времени (рис. 3) и картина распределения тепловых потоков в системе «индуктор – деталь», описывающая кинетику нагрева (рис. 4).

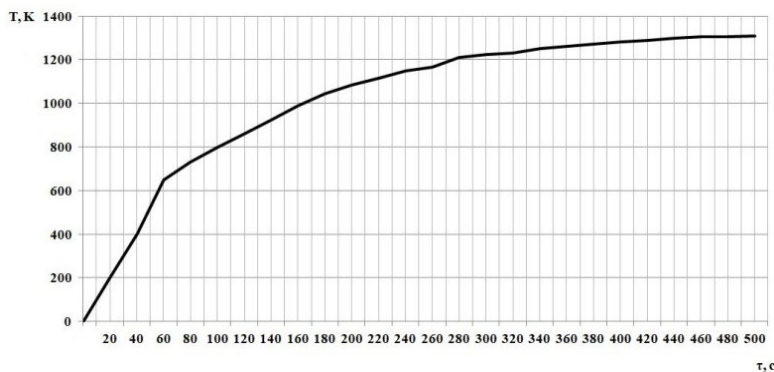


Рис. 3. Зависимость изменения температуры во времени в системе «индуктор – деталь» с учетом компонент среды, используемой для насыщения хромом

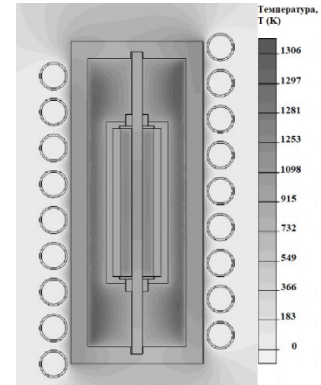


Рис. 4. Кинетика нагрева и распределения тепловых потоков в системе «индуктор – деталь» с учетом компонент среды, используемой для насыщения хромом

В результате моделирования установлено, что сила тока на индукторе 3,2 кА соответствует температуре 1200 °С, а 3,4 кА – 1300 °С. По получен-

ным данным проведен эксперимент и сопоставлено влияние режима индукционного нагрева ТВЧ в процессе насыщения сталей хромом на параметры шероховатости, фазовый состав и микротвердость (таблица).

Влияние режимов индукционного нагрева ТВЧ в процессе насыщения сталей хромом на параметры шероховатости, фазовый состав и микротвердость

Но- мер де- тали	Марка стали	Технологический режим				Шерохова- тость		Фазы	HV _{0,5H}
		<i>f</i> , кГц	τ , с	<i>I</i> _И , кА	<i>t</i> , °С	<i>R</i> _{<i>a</i>}	<i>R</i> _{<i>z</i>}		
1	12ХН3А	60–70	180±5	3,2	1200±10	0,138	0,650	α -Fe, Cr; Cr ₇ C ₃ ; (Cr, Fe) ₂₃ C ₆	631
2	12ХН3А			3,4	1300±10	0,133	0,644	α -Fe, Cr; Cr ₇ C ₃ ; (Cr, Fe) ₂₃ C ₆	633
3	12ХН3А		300±5	3,2	1200±10	0,137	0,649	α -Fe, Cr; Cr ₇ C ₃ ; (Cr, Fe) ₂₃ C ₆	627
4	12ХН3А			3,4	1300±10	0,136	0,644	α -Fe, Cr; Cr ₇ C ₃ ; (Cr, Fe) ₂₃ C ₆	629
5	12ХН3А		500±5	3,2	1200±10	0,134	0,651	α -Fe, Cr; Cr ₇ C ₃ ; (Cr, Fe) ₂₃ C ₆	632
6	12ХН3А			3,4	1300±10	0,133	0,650	α -Fe, Cr; Cr ₇ C ₃ ; (Cr, Fe) ₂₃ C ₆	626
7	40Х		180±5	3,2	1200±10	0,143	0,673	α -Fe, Cr; (Cr, Fe) ₇ C ₃	647
8	40Х			3,4	1300±10	0,139	0,673	α -Fe, Cr; (Cr, Fe) ₇ C ₃	641
9	40Х		300±5	3,2	1200±10	0,141	0,677	α -Fe, Cr; (Cr, Fe) ₇ C ₃	636
10	40Х			3,4	1300±10	0,142	0,672	α -Fe, Cr; (Cr, Fe) ₇ C ₃	639
11	40Х		500±5	3,2	1200±10	0,140	0,680	α -Fe, Cr; (Cr, Fe) ₇ C ₃	642
12	40Х			3,4	1300±10	0,136	0,664	α -Fe, Cr; (Cr, Fe) ₇ C ₃	632

Рентгенофазовым анализом подтверждено создание в поверхностном слое сталей дисперсной системы из тугоплавких соединений за счет одновременной диффузии углерода и диффузанта, находящихся в обмазке.

В поверхностном слое деталей № 1–6 присутствуют фазы α -Fe, Cr; Cr_7C_3 ; $(\text{Cr, Fe})_{23}\text{C}_6$ с выраженным преобладанием одной из фаз в зависимости от выбранного режима; а в поверхностном слое деталей № 7–12 фазы α -Fe, Cr; $(\text{Cr, Fe})_7\text{C}_3$ с выраженным преобладанием фазы $(\text{Cr, Fe})_7\text{C}_3$.

Таким образом, установлено, что полученные результаты подтверждают адекватность моделирования и достоверно обосновывают установленный температурный интервал 1200–1300 °С и режим индукционного нагрева ТВЧ: $\tau = 180$ –500 с, $f = 65$ –66 кГц, $I_{\text{и}} = 3,2; 3,4$ кА, изменение которого склывается преобладанием одной из тугоплавких фаз в поверхностном слое деталей.

Экспериментально установлено, что максимальной микротвердостью обладают детали № 1, 2, 5, 7, 8, 11, упрочненные по режиму $\tau = 180$ –300 с, $f = 65$ –66 кГц, $I_{\text{и}} = 3,2; 3,4$ кА. Шероховатость по R_a находится в диапазоне от 0,13 до 0,14 мкм, а по R_z от 0,64 до 0,68 мкм.

Список литературы

1. Патент № 2819547. Способ хромирования поверхностных слоев конструкционной легированной стали: № 2023128338: заявл. 31.10.2023: опубл. 21.05.2024 / М.Ю. Шигаев, Н.И. Китаев, К.Б. Костин, С.В. Брудник, С.Я. Пичхидзе; заявитель, патентообладатель СГТУ имени Гагарина Ю.А. – 3 с.

2. Черных И.В. Пакет ELCUT: моделирование устройств индукционного нагрева // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2003. – № 2. – С. 4–8.

3 Дубицкий, С.Д., Ильина О.Я. Elcut – инженерный инструмент МКЭ-моделирования [Электронный ресурс]. – URL: <http://elcut.ru/publications/dubitsky8.pdf> (дата обращения: 14.06.2025).

Сведения об авторе

Китаев Никита Игоревич – аспирант, преподаватель кафедры технологии машиностроения, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, e-mail: ni.kitaev@yandex.ru.