

УДК 621.785.545

DOI: 10.22213/2413-1172-2022-3-38-46

Моделирование тепловых процессов в технологической системе при электромеханической обработке

В. Р. Эдигаров, кандидат технических наук, доцент, Омский автобронетанковый инженерный институт, Омск, Россия

Б. Ш. Алимбаева, кандидат технических наук, доцент, Омский автобронетанковый инженерный институт, Омск, Россия

Представлены математические модели тепловых процессов комбинированных методов электромеханической обработки, в основе которых лежат уравнения теплопроводности, с учетом теплофизических свойств (температуропроводности, теплоемкости, теплопроводности и теплоотдачи), начальных и граничных условий, технологических и других особенностей исследуемых методов обработки. Ввиду того, что для электромеханической обработки характерен процесс с объемной зоной тепловыделения, достаточно малыми размерами и при этом высокой интенсивностью, предполагается, что определение температурных полей может осуществляться с использованием принципа наложения. При этом основными факторами, влияющими на количество тепла, распространяющегося в контактирующие тела, являются интенсивность теплоотвода, теплофизические свойства контактирующих тел, скорости их относительного перемещения. Предложены зависимости, которые позволяют описать температурные поля в объемах, подвергающихся термомеханическому воздействию при электромеханической обработке деталей, имеющих значительные геометрические параметры, обеспечивающие достаточный теплоотвод от обрабатываемых поверхностей внутрь детали. Установлено, что в случае обработки деталей небольших размеров при незначительном теплоотводе возникает необходимость учета накопления тепла, что приводит к общему повышению температуры в технологической системе в процессе обработки и снижению эффективности процесса упрочнения.

Выведенные математические зависимости в виде уравнений теплопроводности с установленными ограничениями позволяют определить параметры тепловых полей при электромеханической обработке в системе «рабочий инструмент – локальный микрообъем поверхностного слоя», при этом математические соотношения представлены в линейной постановке с теплофизическими коэффициентами.

Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что в процессе обработки основными факторами, влияющими на количество тепла, распространяющегося в контактирующие тела, являются интенсивность теплоотвода, теплофизические свойства контактирующих тел, скорость их относительного перемещения. Выполненные экспериментальные исследования подтвердили адекватность используемых для расчета математических зависимостей, характеризующих температуры в локальных микрообъемах обрабатываемого поверхностного слоя.

Ключевые слова: математическая модель, тепловые процессы, тепловыделение, теплопроводность.

Введение
Математические модели тепловых процессов комбинированных методов электромеханической обработки (ЭМО) с точки зрения металловедения имеют наибольшее сходство с термомеханической обработкой металлов [1–6] и основываются на уравнении теплопроводности. При этом учитываются отличия теплофизических свойств (температуропроводности ω , теплоемкости k , теплопроводности λ и теплоотдачи α), которые ограничиваются начальными и граничными условиями, технологическими и другими особенностями исследуемых методов обработки.

Использование аналитических зависимостей, приведенных в работах [7–12] в виде решения дифференциальных уравнений теплопроводности

с установленными ограничениями, позволяет определить параметры тепловых полей при электромеханической обработке в системе «рабочий инструмент – локальный микрообъем поверхности детали». При этом данные соотношения представлены в линейной постановке с теплофизическими коэффициентами, не зависящими от температуры. Получаемый упрочненный поверхностный слой и его свойства находятся в прямой зависимости от теплоемкости, теплопроводности и других теплофизических коэффициентов [13]. Причем основные изменения, происходящие в поверхностном слое под воздействием сверхвысоких температур, происходят в результате первого цикла «нагрев – охлаждение»; в дальнейшем при повторных проходах происходит закрепление результатов тер-

момеханического воздействия и устранение дефектов [14–16].

Цель исследования – теоретически обосновать и экспериментально подтвердить влияние отдельных технологических факторов (интенсивность теплоотвода, теплофизические свойства контактирующих тел, скорость их относительного перемещения и др.) в процессе комбинированной электромеханической обработки на количество выделившегося в процессе обработки тепла, распространяющегося в контактирующие тела в процессе обработки. Подтвердить адекватность используемых для расчета математических зависимостей, характеризующих температуры в локальных микрообъемах модифицируемого поверхностного слоя.

Методика проведения эксперимента

Экспериментальное исследование ЭМО осуществлялось на образцах диаметром 50 мм из стали 38ХС с обработкой твердосплавным инструментом из Т15К6 при следующих режимах обработки: сила тока $I = 300...700$ А; усилие прижатия инструмента $P = 100...120$ Н, скорость обработки $V = 2,5...10$ м/мин.

Измерения температуры в поверхностном слое образцов при ЭМО осуществляли с помощью нихросил-нисиловой термопары (типа ТНН). Термопары размещались в отверстиях детали. Отверстия просверливались диаметром 1 мм на разную глубину – от 0,02 до 1 мм от поверхности. Термопары внутри детали устанавливались так, чтобы обеспечить попадание их на траекторию движения твердосплавного инструмента по поверхности обрабатываемой детали. Места установки термопар запаивались.

В процессе экспериментальных исследований тепловых процессов анализировалось время достижения максимальной температуры в локальном микрообъеме поверхностного слоя образца, а также градиент распространения температур вглубь контактирующих рабочего инструмента и поверхностного слоя образца при квазистатической модели ЭМО.

Математическое моделирование тепловых процессов поверхностного модифицирования

Электромеханической обработке присущ процесс с объемной зоной тепловыделения, достаточно малыми размерами в модифицируемом поверхностном слое детали и рабочего инструмента и интенсивностью тепловыделения $q_{об}$ (плотностью теплового потока на единицу объема). При этом для максимальной толщины модифицируемого поверхностного слоя время τ_i , определение температурных полей может осу-

ществляться с использованием принципа наложения по методу источников теплоты, описанных, например, в работе [17]. Соответственно, для каждой точки i , находящейся на определенном расстоянии y_i от поверхности, выполняется последовательное суммирование по координатам y и z уравнения

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y \partial z} = \frac{2q_{об} \omega \exp\left[-z^2 / (4\omega(\tau_i - \tau))\right]}{\lambda \sqrt{4\pi\omega(y_i - y)}}. \quad (1)$$

Выполнение вышеуказанных математических преобразований (1) по схеме, приведенной на рисунке 1, а, при условии равномерного распределения интенсивности тепловыделения q_T по объему с размерами h_T и ky_k позволяет получить выражение [18]

$$T_h = \frac{2q_T(2-k)\omega}{h_T\lambda} \int_y^{y_k} \frac{y_k}{y_k - y} dy \times \int_0^{h_y} \frac{\exp\left[-z^2 / (4\omega(\tau_i - \tau))\right]}{\sqrt{4\pi\omega(y_i - y)}} dz + \frac{4q_T\omega}{\lambda} \int_y^{y_k} \frac{(y_k - y) \exp\left[-z^2 / (4\omega(\tau_i - \tau))\right]}{y_k \sqrt{4\pi\omega(y_i - y)}} dy. \quad (2)$$

Для случая электромеханической обработки размер зоны тепловыделения достаточно мал – $h_T \rightarrow 0$; в этом случае можно рекомендовать следующую математическую зависимость:

$$T_T = \frac{4q_T\omega}{\lambda} \int_y^{y_k} \frac{y_k (y_k - y)}{y_k \sqrt{4\pi\omega(y_i - y)}} dy. \quad (3)$$

Результаты расчетов, проведенных с использованием формулы (2), отличаются от результатов, полученных с использованием формулы (3), – они в среднем на 10...15 % меньше, что объясняется учетом в формуле (2) объема процесса тепловыделения. В результате источник тепловыделения со скоростью V_n при определенных геометрических параметрах рабочего инструмента в процессе электромеханической обработки можно охарактеризовать как полосовой с малой шириной B_0 (рис. 1, б, с), а в отдельных случаях – как линейный при $B_0 \rightarrow 0$. Тогда длина полосового источника равна величине шага при обработке $2l_0$. Количество тепла, распространяющегося внутрь детали от быстродвижущегося полосового источника, зависит от его скорости, теплофизических свойств материала обрабатываемой детали и твердосплавного инструмента, при этом незначительно – от закона распределения интенсивности тепловыделения, которое можно считать равномерным.

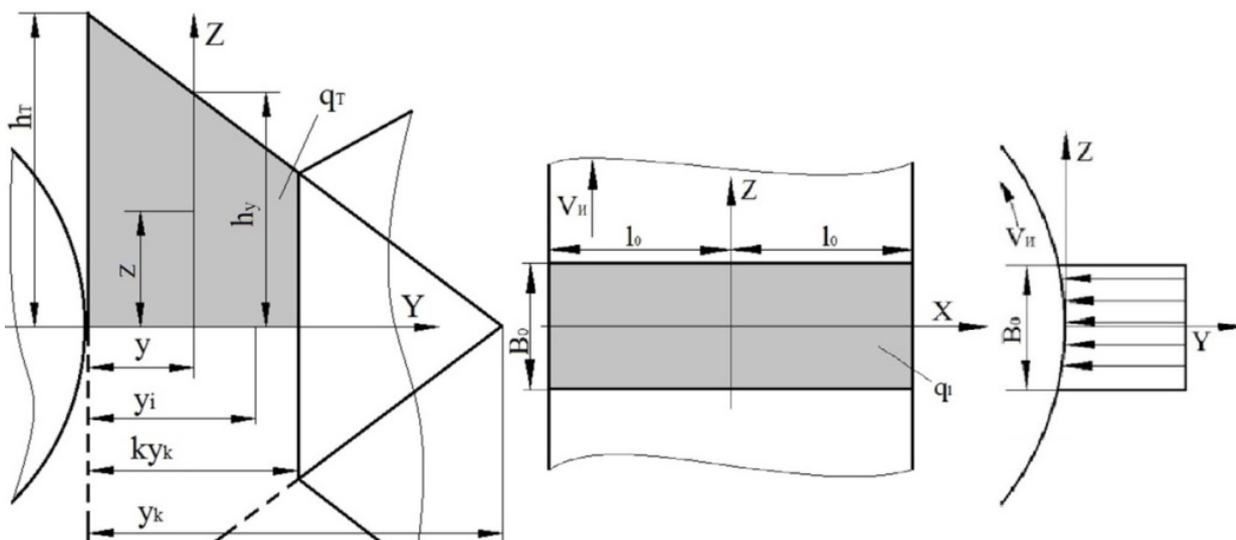


Рис. 1. Расчетные схемы изменения температурных полей при воздействии объемным источником тепловыделения (а); полосовым быстро движущимся источником (b, c)

Fig. 1. Calculation schemes for changing temperature fields under the influence of a volumetric source of heat release (a); strip fast moving source (b, c)

Для анализа температурных полей при ЭМО, характеризующихся высокой скоростью движения источника тепла и равномерным его распределением, можно рекомендовать постановку линейных задач [19–21].

Соотношение, которое описывает процесс распространения тепла от быстро движущегося точечного источника, может быть использовано для моделирования вышеописанных источников тепла и процессов тепловыделения:

$$T_i = \frac{q_i}{2\pi\lambda(z-z_i)} \exp\left[-\frac{V_n((x-x_i)^2 + y^2)}{4\omega(z-z_i)}\right], \quad (4)$$

где x_i , 0 , z_i – координаты точечного источника; q_i – интенсивность тепловыделения.

Интегрирование уравнения (4) по x_i и z_i позволяет осуществить расчет температуры, возникающей в точке (микрообъеме) с текущими координатами x , y , z при воздействии точечных источников, суммарно образующих полосовой источник $2l_0B_0$, при этом количество точечных источников бесконечно большое. Математическое преобразование (интегрирование) от $x_i = -l_0$ до $x_i = l_0$ позволяет получить следующую зависимость:

$$T_i = \frac{q_i\sqrt{\omega}}{2\lambda\sqrt{\pi V_n}} \int_0^{B_0} \frac{dz_i}{\sqrt{z-z_i}} \exp\left[-\frac{V_n y^2}{4\omega(z-z_i)}\right] \times \left(\operatorname{erf}\left[(l_0+x)\sqrt{\frac{V_n}{4\omega(z-z_i)}}\right] + \right.$$

$$\left. + \operatorname{erf}\left[(l_0-x)\sqrt{\frac{V_n}{4\omega(z-z_i)}}\right] \right), \quad (5)$$

где $\operatorname{erf}[x] = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp[-y^2] dy$ – функция интеграла вероятности Гаусса; q_i – интенсивность источника тепла на площадке $2l_0B_0$.

В случае максимального тепловыделения в плоскости XOY вдоль оси y с шириной полосового источника тепла $B_0 = z - z_i$, проинтегрировав (5), получим зависимость, описывающую распределение температуры в обрабатываемом поверхностном слое от быстро движущегося линейного источника:

$$T_r = \frac{q_r\sqrt{\omega}}{2\lambda\sqrt{\pi V_n}(z-z_i)} \exp\left[-\frac{V_n y^2}{4\omega(z-z_i)}\right] \times \left(\operatorname{erf}\left[(l_0+x)\sqrt{\frac{V_n}{4\omega(z-z_i)}}\right] + \right.$$

$$\left. + \operatorname{erf}\left[(l_0-x)\sqrt{\frac{V_n}{4\omega(z-z_i)}}\right] \right), \quad (6)$$

где q_r – интенсивность источника тепла, распределенного вдоль отрезка длиной $2l_0$.

Зависимости (5) и (6) описывают температурные поля в объемах, подвергающихся термомеханическому воздействию при электро-механической обработке деталей, имеющих значительные геометрические параметры, бес-

печивающие достаточный теплоотвод от обрабатываемых поверхностей внутрь детали. В случае обработки деталей небольших размеров при незначительном теплоотводе возникает необходимость учета накопления тепла, что приведет к общему повышению температуры в технологической системе в процессе обработки, снижению эффективности процесса упрочнения.

Для классической ЭМО характерно быстрое движение источника тепла по винтовой линии по поверхности детали, представляющей собой цилиндр с малым шагом равным $2l_0$. В этом случае температура в любой микрообъеме поверхности цилиндра радиусом R может быть определена как сумма мгновенных температур от кольцевых источников и представлена в виде зависимости

$$T_k = \frac{2q_k}{V_n kR \sqrt{4\pi\omega\tau}} \exp\left[-\frac{x^2}{4\omega\tau} - \frac{2\alpha\tau}{kR}\right] \Phi_0(r, \tau), \quad (7)$$

где q_k/V_n – погонная энергия от кольцевого источника; x – осевая координата; k – удельная теплоемкость; α – коэффициент теплоотдачи с поверхности; r – текущий радиус; τ – время, характеризующее период выделения теплоты; $\Phi_0(r, \tau)$ – функция, характеризующая выравнивание теплоты в тонком круглом диске без теплоотдачи, при мгновенном выделении теплоты по кольцу на его наружной поверхности:

$$\Phi_0(r, \tau) = \sum_{k=1}^{\infty} \exp\left[-\frac{\mu_k^2 \omega \tau}{R^2}\right] J_0\left(\frac{\mu_k r}{R}\right) / J_0(\mu_k), \quad (8)$$

где J_0 – функция Бесселя первого рода нулевого порядка от действительного аргумента; μ_k – нули функции Бесселя первого рода первого порядка J_1 , т. е. корни уравнения $J_1(\mu_k) = 0$.

Суммарная температура в рассматриваемой точке, образовавшаяся от воздействия кольцевых источников, находящихся на расстояниях x от рассматриваемой точки, с соответствующим временем τ пересечения движущегося источника теплоты осевой плоскости, проходящей через рассматриваемую точку (момента тепловыделения), различным для каждого кольцевого мгновенного источника, может быть вычислена по формуле

$$T_s = \frac{2q_k}{V_n kR} \sum_{n=1}^N \Phi_n(r, \tau_n) \times \exp\left[-\frac{x_n^2}{4\omega\tau_n} - \frac{2\alpha\tau_n}{kR}\right] / \sqrt{4\pi\omega\tau_n}, \quad (9)$$

где x_n – расстояния до рассматриваемой точки для каждого прохода; τ_n – время, прошедшее с момента проведения n -го прохода; N – число проходов с начала обработки.

В процессе ЭМО в случае увеличения числа проходов N будет наблюдаться выравнивание значения функции температур (8) в формуле (9), которая будет стремиться к единице: $\Phi_n(r, \tau_n) \rightarrow 1$. Это означает, что при большом количестве проходов обрабатываемая деталь может практически полностью прогреться по толщине, что приведет к необоснованному использованию принятой схемы теплообразования (см. рис. 1, *b, c*), необходимости разработки новой, а расчет температурных полей с использованием выражений (5)–(9) будет нецелесообразен.

То есть расчет температур в вышеописанных случаях необходимо осуществлять с учетом накопления тепла и равномерным его распределением. В случае выравнивания температур на поверхности обрабатываемой детали при установлении теплообмена с окружающей средой рекомендуется рассматривать нестационарную одномерную задачу с граничными условиями первого рода, при этом источник нагрева представляет собой постоянно действующий кольцевой. Для такой задачи дифференциальное уравнение теплопроводности будет иметь вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \omega \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad \tau > 0, \quad 0 < r < R \quad (10)$$

при начальном условии $T(r, 0) = T_0 = \text{const}$ и граничных условиях $T(r, \tau) = T_c = \text{const}$, $\partial T(0, \tau)/\partial r = 0$, $T(0, \tau) \neq \infty$. Последнее из указанных условий означает конечность температуры в центре кольца в процессе всего теплообмена.

Решение уравнения (10) имеет вид, аналогичный функции выравнивания температур (8):

$$\frac{T_c - T}{T_c - T_0} = \sum_{n=1}^{\infty} 2 \exp\left[-\frac{\mu_n^2 \omega \tau}{R^2}\right] \frac{J_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right)}{(\mu_n J_1(\mu_n))}, \quad (11)$$

где $\mu_n = (2n - 1)\pi/2$.

Для случаев упрочнения торцевых поверхностей с достаточно малой длиной H цилиндрической поверхности (т. е. для ограниченного цилиндра) процесс накопления тепла необходимо рассматривать при постоянстве температур на его торцевых поверхностях с установившимся теплообменом.

Дифференциальное уравнение теплопроводности для нестационарной двумерной задачи имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \omega \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right),$$

$$\tau > 0, \quad 0 < r < R, \quad -\frac{H}{2} < x < \frac{H}{2} \quad (12)$$

при начальном условии $T(r, x, 0) = T_0 = \text{const}$ и граничных условиях $T(r, \pm H/2, \tau) = T_C = \text{const}$, $T(R, x, \tau) = T_C = \text{const}$.

После математических преобразований (12) примет вид

$$\frac{T_c - T}{T_c - T_0} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \times$$

$$\times 4 \exp \left[- \left(\mu_m^2 + \left(\mu_n \frac{2R}{H} \right)^2 \right) \frac{\omega \tau}{R^2} \right] \times$$

$$\times \frac{\cos \left[\mu_n \frac{2x}{H} \right] J_0 \left(\frac{\mu_n r}{R} \right)}{(\mu_n \mu_m J_1(\mu_m))}, \quad (13)$$

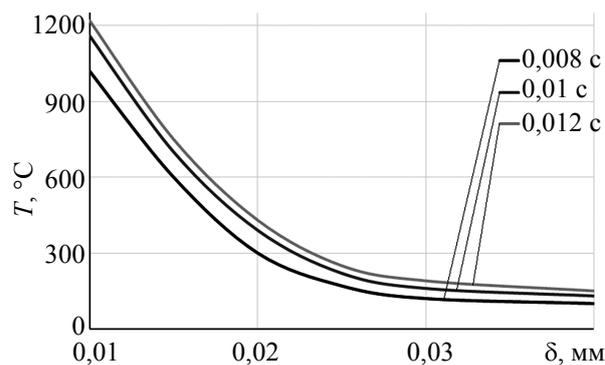
где μ_m – нули функции Бесселя первого рода нулевого порядка J_0 , т. е. корни уравнения $J_0(\mu_m) = 0$.

Для проверки адекватности предложенных выше математических зависимостей и более точного описания температурных полей в рабочем микрообъеме при электромеханической обработке производилось измерение температур в поверхностном слое засверливанием термодпар в рабочей зоне, а также расчет температурных полей с использованием зависимостей (5), (6), (9), (11) и (13), полученные результаты сравнивались и анализировались.

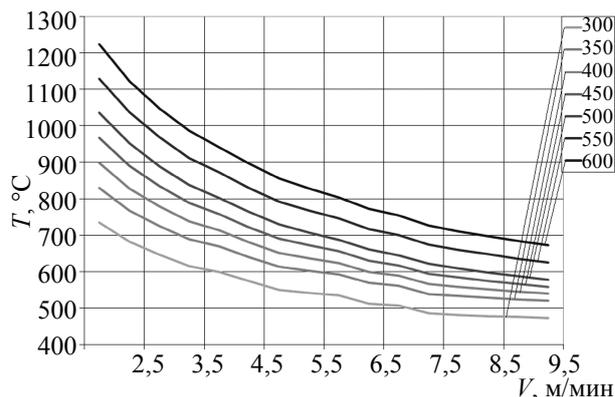
Произведенными расчетами установлена динамика распределения температур вглубь обрабатываемой детали в зависимости от времени термомеханического воздействия на локальный микрообъем поверхностного слоя.

При ЭМО с силой тока в 650 А максимальная температура 1200 °С достигается примерно через 0,12 с (рис. 2, а). Термомеханическое влияние рабочего инструмента на модифицируемый слой детали с установленными технологическими параметрами позволяет достичь температур структурно-фазовых превращений (≈ 820 °С и более) в течение $\approx 0,05 \dots 0,01$ с в зависимости от других факторов.

На рисунке 2, б приведены результаты расчета температуры в зависимости от силы тока и скорости обработки. Видно, что температура структурно-фазовых превращений может быть достигнута при скорости обработки $V = 3,0$ м/мин и силе тока $I = 350 \dots 400$ А.



a



b

Рис. 2. Результаты моделирования распространения температурных полей в обрабатываемой детали при ЭМО: а – распределение температур в модифицируемом поверхностном слое детали в зависимости от времени воздействия теплового источника по глубине; б – зависимость температуры в локальном микрообъеме при ЭМО от силы тока и скорости обработки

Fig. 2. The results of modeling the distribution of temperature fields in the workpiece during EMT: а - temperature distribution in the workpiece depending on the time of exposure to a heat source in depth; б - dependence of temperature in a local microvolume during EMT on current strength and processing speed

Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведенных расчетов влияния скорости перемещения рабочего инструмента относительно обрабатываемой поверхности цилиндрического образца из стали 38ХС и величины силы тока было установлено, что температура в исследуемом микрообъеме с увеличением скорости обработки существенно снижается, причем снижение температуры происходит примерно одинаковыми темпами при любых установленных значениях силы тока.

Также установлено, что при одних и тех же величинах силы тока в процессе ЭМО и прочих равных условиях температура в зоне контакта образца и рабочего инструмента значительно выше в локальном микрообъеме стального об-

разца нежели в рабочем инструменте изготовленном из бронзы, причем с увеличением силы тока разница в температурах увеличивается. Это связано с тем, что электропроводность бронзы выше, чем стали, вследствие чего сопротивление на контакте меньше, что, соответственно, влечет более низкие значения температуры в локальных микрообъемах.

Для проверки соответствия фактического значения температуры в поверхностном слое стального образца расчетным значениям температур проводили экспериментальные исследования значений температуры в высокотемпера-

турном микрообъеме модифицируемого поверхностного слоя.

На рисунке 3 представлены результаты расчета и измерений, выполненных в соответствии с определенной выше методикой распространения температуры вглубь образца при одинаковых значениях других технологических факторов. Представленные на рисунке зависимости показывают удовлетворительную сходимость полученных расчетных и экспериментальных значений: среднее расхождение составило примерно 3...5 %, что свидетельствует об адекватности используемых математических моделей.

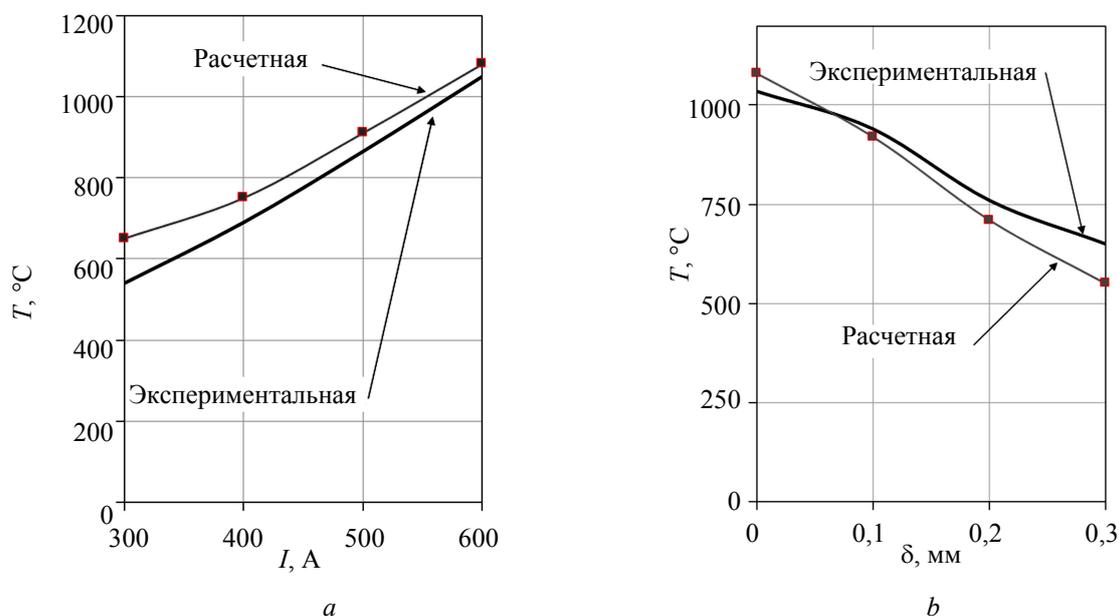


Рис. 3. Зависимость температуры в локальном микрообъеме поверхностного слоя стальной детали в процессе ЭМО: *a* – от силы тока, при неизменных других технологических факторах; *b* – от глубины поверхностного слоя при обработке с силой тока $I = 600$ А и скоростью обработки $V = 3,5$ м/мин

Fig. 3. Dependence of temperature in the local microvolume of the surface layer of the steel part in the EMT process: *a* - on the current strength, with other technological factors unchanged; *b* - from the depth of the surface layer during processing with current $I = 600$ A and processing speed $V = 3.5$ m/min

При моделировании температурных процессов ЭМО не учитывались потери тока в технологической оснастке при его прохождении от источника до обрабатываемой поверхности образца; это связано с тем, что потери тока в технологической цепочке зависят от большого количества факторов, учет которых значительно усложняет моделирование. Этим можно объяснить незначительное расхождение полученных результатов – в среднем до 5 %.

Полученные зависимости температуры локальных микрообъемов поверхности стального образца от силы тока и глубины при неизменных значениях других технологических параметров обработки показывают, что с увеличением силы тока наблюдается увеличение темпера-

туры, а по мере углубления в поверхностный слой – снижение (см. рис. 3). При силе тока ≈ 450 А температура в локальном микрообъеме поверхностного слоя образца превышает температуру перлитно-аустенитных превращений (т. е. выше линии A_{c1} (763 °C)), а при токе 500 А – превышает 810 °C (т. е. выше линии A_{c3}).

Выводы

Использование выведенных математических зависимостей в виде уравнений теплопроводности с установленными ограничениями позволяют определить параметры тепловых полей при электромеханической обработке в системе «рабочий инструмент – поверхностный слой образца», при этом данные соотношения представле-

ны в линейной постановке с теплофизическими коэффициентами. В процессе обработки основными факторами, влияющими на количество тепла, распространяющегося в контактирующие тела, являются: интенсивность теплоотода, теплофизические свойства контактирующих тел, скорости их относительного перемещения. Проведенные экспериментальные исследования температуры в локальных микрообъемах обрабатываемого поверхностного слоя подтвердили адекватность используемых для расчета математических зависимостей.

Библиографические ссылки

1. *Аскинази Б. М.* Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой. М. : Машиностроение, 1989. 200 с.
2. Методика математического описания опытных кривых распределения остаточных напряжений в поверхности металла после электромеханической обработки / В. П. Багмутов, И. Н. Захаров, М. Д. Романенко, В. В. Баринов // *Материалы XXXIII Международной инновационной конференции молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС - 2021)* (Москва, 30 ноября – 02 декабря 2021 г.). М. : 2021. С. 18–23.
3. *Дудкина Н. Г., Захаров И. Н., Баринов В. В.* Повышение эффективности электромеханической обработки поверхностным пластическим деформированием // *Главный механик*. 2021. № 1. С. 16–22.
4. *Горленко О. А.* Повышение эксплуатационных свойств деталей машин электромеханической обработкой // *Научное издание технологий в машиностроении*. 2021. № 2 (116). С. 27–35.
5. Повышение долговечности резьбовых соединений электромеханической обработкой / Л. В. Федорова, Ю. С. Иванова, В. Н. Зарипов, Т. Р. Хуснетдинов // *Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов : сборник научных статей Международной научно-технической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения академика А. А. Байкова* (Курск, 18 сентября 2020 г.). С. 228–231.
6. *Дудкина Н. Г.* Исследование поверхностного слоя стали 45, подвергнутой электромеханической обработке с импульсным деформированием // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2020. № 4 (778). С. 17–21.
7. *Хейфец М. Л.* Проектирование процессов комбинированной обработки. М. : Машиностроение, 2005. 320 с.
8. *Морозов А. В., Хабиева Л. Л., Кнуров А. А.* Моделирование тепловых процессов при электромеханическом дорновании отверстий в стальных заготовках // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2020. Т. 16, № 12 (192). С. 543–546.
9. Влияние структуры и свойств поверхностного слоя на усталостную прочность закаленных сталей, упрочненных комбинированной электромеханической обработкой / В. П. Багмутов, Н. Г. Дудкина, И. Н. Захаров, М. Д. Романенко, В. В. Чекунов // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2019. Т. 62, № 6. С. 438–445.
10. *Волков М. И.* Теоретические исследования режимов электромеханического упрочнения дисковых рабочих органов // *Роль аграрной науки в устойчивом развитии сельских территорий : материалы III Всероссийской (национальной) научной конференции* (Новосибирск, 20 ноября 2018 г.). Новосибирск : НГАУ, 2018. С. 561–563.
11. *Горленко А. О., Шевцов М. Ю.* Повышение качества поверхностного слоя методом комбинированной электромеханической обработки // *Современные материалы, техника и технологии*. 2018. № 5 (20). С. 14–27.
12. *Ahtulov A., Edigarov V., Dadayn S.* Assessment of the influence of the surface modification process on the wear intensity in the operation of internal combustion engines loaded parts. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTME-2019. IOP Publishing. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 709 (2020) 044031, pp. 1-8. DOI: 10.1088/1757-899X/709/4/044031
13. *Молодец А. М., Гольшев А. А.* Объемно-температурная зависимость электро- и теплофизических свойств α -железа при высоких давлениях и температурах // *Журнал технической физики*. 2021. Т. 91, № 9. С. 1403–1408.
14. *Дудкина Н. Г., Захаров И. Н., Романенко М. Д., Баринов В. В.* Исследование качественных характеристик поверхностного слоя сталей, подвергнутых электромеханической обработке с динамическим деформированием // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2022. Т. 18, № 9 (213). С. 421–425.
15. *Гаврилов Д. В., Федоров С. К.* Повышение долговечности деталей электромеханической обработкой // *Инновационные технологии, оборудование и материалы заготовки в машиностроении : сборник трудов международной научно-технической конференции (МашТех 2022)* (Москва, 12 апреля 2022 г.). С. 287–289.
16. *Григорьев С. Н., Сафонов С. В., Смоленцев В. П.* Проектирование комбинированных процессов модификации поверхностного слоя типовых деталей // *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 2016. Т. 12, № 4. С. 54–61.
17. *Сафонов С. В.* Моделирование процесса модификации и изменения толщины покрытий // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2015. Т. 11, № 4. С. 8–12.
18. Исследование влияния теплофизических характеристик на тепловые процессы при моделировании сварки плавлением / И. В. Усанин, Д. А. Лютов, Т. В. Ольшанская, Е. С. Саломатова, Е. М. Федосеева // *Химия. Экология. Урбанистика*. 2020. Т. 1. С. 409–412.
19. Исследование структуры среднеуглеродистых сталей после электромеханической обработки / Ю. С. Иванова, В. Н. Зарипов, В. Т. Нго, Со. Л. Мьят,

Ч. У. Ёе // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16, № 10 (190). С. 473–477.

20. Edigarov V.R., Akhtulov A.L., Dadayan S.E., Maly V.V. Friction-electric modification of the surfaces of machine parts with tungsten carbides. *Key Engineering Materials*, 2022, vol. 910 KEM, pp. 538-543.

21. Буѝносѝв А. П., Динисламов А. Р. Расчет теплового процесса поверхностного упрочнения стали деталей механической части железнодорожного подвижного состава при регламентированном нагреве равномерно распределенными источниками // Транспорт Урала. 2019. № 3 (62). С. 28–35.

References

1. Askinazi B.M. *Uprochnenie i vosstanovlenie detalej mashin jelektromehaničeskoj obrabotkoj* [Strengthening and restoration of machine parts by electromechanical processing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 200 p. (in Russ.).

2. Bagmutov V.P., Zakharov I.N., Romanenko M.D., Barinov V.V. *Metodika matematičeskogo opisaniya opytnyh krivyh raspredeleniya ostatochnyh naprjazhenij v poverhnosti metalla posle jelektromehaničeskoj obrabotki* [Method of mathematical description of experimental curves of distribution of residual stresses in the surface of a metal after electromechanical processing]. *Materialy XXXIII Mezhdunarodnoj innovacionnoj konferencii molodyh učenyh i studentov po problemam mashinovedeniya (MIKMUS - 2021) (Moskva, 30 nojabrja – 02 dekabrja 2021 g.)*. [Proc. of the XXXIII International Innovative Conference of Young Scientists and Students on Problems of Mechanical Engineering (MIKMUS - 2021) (Moscow, November 30 - December 02, 2021). Moscow, 2021, pp. 18-23 (in Russ.).

3. Dudkina N.G., Zakharov I.N., Barinov V.V. [Improving the efficiency of electromechanical processing by surface plastic deformation]. *Chief mechanic*, 2021, no. 1, pp. 16-22 (in Russ.).

4. Gorlenko O.A. [Improving the operational properties of machine parts by electromechanical processing]. *Science-intensive technologies in mechanical engineering*, 2021, no. 2 (116), pp. 27-35 (in Russ.).

5. Fedorova L.V., Ivanova Yu.S., Zaripov V.N., Khusnetdinov T.R. *Sovremennye eproblemy i napravleniya razvitiya metallovedeniya i termičeskoj obrabotki metallov i splavov* [Increasing the durability of threaded joints by electromechanical processing]. *Sbornik nauchnyh statej Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, posvjashhennoj 150-letiju so dnja rozhdenija akademika A. A. Bajkova (Kursk, 18 sentjabrja 2020 g.)* [Proc. of scientific articles of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 150th anniversary of Academician A.A. Baikov (Kursk, September 18, 2020)], pp. 228-231 (in Russ.).

6. Dudkina N.G. [Investigation of the surface layer of steel 45 subjected to electromechanical processing with pulsed deformation]. *Metal Science and Thermal Processing of Metals*, 2020, no. 4 (778), pp. 17-21 (in Russ.).

7. Kheifets M.L. *Proektirovanie processov kombinirovannoj obrabotki* [Design of combined processing

processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005, 320 p. (in Russ.).

8. Morozov A.V., Khabieva L.L., Knyurov A.A. [Modeling of thermal processes during electromechanical burnishing of holes in steel blanks]. *Uprochnjajushhie tekhnologii i pokrytij*, 2020, vol. 16, no. 12 (192), pp. 543-546 (in Russ.).

9. Bagmutov V.P., Dudkina N.G., Zakharov I.N., Romanenko M.D., and Chekunov V.V. [Influence of the structure and properties of the surface layer on the fatigue strength of hardened steels hardened by combined electromechanical processing]. *Izvestija vysshih učebnyh zavedenij. Chernaja metallurgija*, 2019, vol. 62, no. 6, pp. 438-445 (in Russ.).

10. Volkov M.I. Theoretical studies of the modes of electromechanical hardening of disk working bodies. Proc. of the III All-Russian (national) scientific conference The role of agricultural science in the sustainable development of rural areas (Novosibirsk, November 20, 2018). Novosibirsk : NSAU, 2018, pp. 561-563 (in Russ.).

11. Gorlenko A.O., Shevtsov M.Yu. [Improving the quality of the surface layer by the method of combined electromechanical processing]. *Sovremennye materialy, tehnika i tekhnologii*, 2018, no. 5 (20), pp. 14-27 (in Russ.).

12. Ahtulov A., Edigarov V., Dadayn S. Assessment of the influence of the surface modification process on the wear intensity in the operation of internal combustion engines loaded parts. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTME-2019. IOP Publishing. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 709 (2020) 044031. DOI: 10.1088/1757-899X/709/4/044031.

13. Molodets A.M., Golyshev A.A. [Volume-temperature dependence of the electrical and thermal properties of α -iron at high pressures and temperatures]. *Journal of technical physics*, 2021, vol. 91, no. 9, pp. 1403-1408 (in Russ.).

14. Dudkina N.G., Zakharov I.N., Romanenko M.D., Barinov V.V. [Investigation of the qualitative characteristics of the surface layer of steels subjected to electromechanical processing with dynamic deformation]. *Uprochnjajushhie tekhnologii i pokrytija*, 2022, vol. 18, no. 9 (213), pp. 421-425.

15. Gavrilov D.V., Fedorov S.K. *Povyshenie dolgovečnosti detalej jelektromehaničeskoj obrabotkoj* [Improving the durability of parts by electromechanical processing]. *Innovacionnye tekhnologii, oborudovanie i material'nye zagotovki v mashinostroenii : sbornik trudov mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii (MashTeh 2022) (Moskva, 12 aprilja 2022 g.)* [Innovative technologies, equipment and material blanks in mechanical engineering: Proc. of the International Scientific and Technical Conference (MashTech 2022) (Moscow, April 12, 2022)], pp. 287-289 (in Russ.).

16. Grigoriev S.N., Safonov S.V., Smolentsev V.P. [Design of combined processes for modifying the surface layer of standard parts]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2016, vol. 12, no. 4, pp. 54-61 (in Russ.).

17. Safonov S.V. [Modeling the process of modification and change in the thickness of coatings]. *Bulletin of the Voronezh State Technical Univer Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta sity*, 2015, vol. 11, no. 4, pp. 8-12 (in Russ.).

18. Usanin I.V., Lyutov D.A., Olshanskaya T.V., Salomatova E.S., Fedoseeva E.M. [Investigation of the influence of thermophysical characteristics on thermal processes in the simulation of fusion welding]. *Himija. Jekologija. Urbanistika*, 2020, vol. 1, pp. 409-412 (in Russ.).

19. Ivanova Yu.S., Zaripov V.N., Ngo V.T., Myat So.L., Ye C.W. [Investigation of the structure of me-

dium-carbon steels after electromechanical processing]. *Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija*, 2020, vol. 16, no. 10 (190), pp. 473-477 (in Russ.).

20. Edigarov V.R., Akhtulov A.L., Dadayan S.E., Maly V.V. Friction-electric modification of the surfaces of machine parts with tungsten carbides. *Key Engineering Materials*, 2022, vol. 910 KEM, pp. 538-543.

21. Buynosov A.P., Dinislamov A.R. [Calculation of the thermal process of surface hardening of steel parts of the mechanical part of railway rolling stock under regulated heating by uniformly distributed sources]. *Transport Urala*, 2019, no. 3 (62), pp. 28-35 (in Russ.).

Modeling of Thermal Processes in a Technological System during Electromechanical Processing

V.R. Edigarov, PhD in Engineering, Associate Professor, Omsk Armored Engineering Institute, Omsk, Russia

B.Sh. Alimbaeva, PhD in Engineering, Associate Professor, Omsk Armored Engineering Institute, Omsk, Russia

The article presents mathematical models of thermal processes of combined methods of electromechanical processing, which are based on the heat conduction equations, which take into account thermophysical properties (thermal diffusivity, heat capacity, thermal conductivity and heat transfer), initial and boundary conditions, technological and other features of the studied processing methods. In view of the fact that electromechanical processing (EMT) is characterized by a process with a volumetric heat release zone, with sufficiently small dimensions and high intensity, it is assumed that the determination of temperature fields can be carried out using the superposition principle. In this case, the main factors affecting the amount of heat propagating into the contacting bodies are the intensity of heat removal, the thermophysical properties of the contacting bodies, and the speed of their relative movement. Dependences are proposed that allow one to describe the temperature fields in the volumes of parts subjected to thermal deformation during electromechanical processing, which have significant geometric parameters that ensure sufficient heat removal from the treated surfaces into the part. It has been established that in the case of processing parts of small dimensions, with insignificant heat removal, it becomes necessary to take into account the accumulation of heat, which will lead to a general increase in temperature in the technological system during processing, and a decrease in the efficiency of the hardening process.

The derived mathematical dependencies in the form of heat conduction equations with the established restrictions make it possible to determine the parameters of thermal fields during electromechanical processing in the system "working tool" - "local microvolume of the surface layer", while these presented mathematical relationships are presented in a linear formulation with thermophysical coefficients.

It has been theoretically established and experimentally confirmed that in the process of processing the main factors affecting the amount of heat propagating into the contacting bodies are the intensity of heat removal, the thermophysical properties of the contacting bodies, and the speed of their relative movement. The performed experimental studies have confirmed the adequacy of the mathematical dependencies used to calculate the temperatures in the local microvolumes of the treated surface layer.

Keywords: mathematical model, thermal processes, heat release, thermal conductivity.

Получено: 02.08.2022

Образец цитирования

Эдигаров В. Р., Алимбаева Б. Ш. Моделирование тепловых процессов в технологической системе при электромеханической обработке // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 3. С. 38–46. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-3-38-46.

For Citation

Edigarov V.R., Alimbaeva B.Sh. [Modeling of Thermal Processes in a Technological System during Electromechanical Processing]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2022, vol. 25, no. 3, pp. 38-46 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2022-3-38-46.