

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТ ИСТОЧНИКА ПРИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ЗАКАЛКЕ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ШЛИЦЕВЫХ ВТУЛОК

Исаев Ю.М., доктор технических наук, профессор,
тел.: 88422559553, isurmi@yandex.ru

Морозов А.В., доктор технических наук, доцент,
тел.: 88422559597, alvi.mor@mail.ru

Кузнецов Д.С., студент, тел. 89370326161, din_din_2002@mail.ru
ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

Ключевые слова: *шлицевые втулки, рабочая поверхность, электромеханическая закалка, сила тока, распределение температуры*

Работа посвящена исследованию тепловых процессов происходящих при электромеханической закалке рабочих поверхностей шлицевых втулок с прямобочным профилем зуба. Представлены результаты расчета распространения температуры на поверхности и вглубь шлица в зависимости от силы тока и времени подачи электрического тока. Выполнено сравнение полученных результатов расчета с результатами моделирования в среде COMSOL Multiphysics v5.6 и результатами экспериментальных исследований.

Введение. Тепловые явления, происходящие при ЭМЗ, сопряжены с взаимодействием ряда факторов, от которых они зависят, таких, как: тепловыделение электрического тока, тепло трения инструмента об обрабатываемую деталь, теплообмен между инструментом и поверхностным слоем и, наконец, теплопередача в окружающую среду и вглубь металла [1, 2, 3, 4, 5]. На современном этапе изучения этого процесса представляется возможным лишь в первом приближении дать оценку происходящих явлений теплообразования, учитывая главнейшие факторы и абстрагируясь от менее важных и второстепенных. При этом должны быть сделаны определенные допущения.

Материалы и методы исследований. Рассмотрим дифференциальное уравнение теплопроводности при ЭМЗ от воздействия прямоугольного высокотемпературного источника тепла (инструмент) на плоскую поверхность прямобочного шлица из стали 40Х. Высокотемпературным источником при ЭМЗ является джоулева теплота.

Считаем процесс теплового воздействия на поверхность шлица равномерным по всей площади контакта. Тепловыделение при ЭМЗ происходит без принудительного охлаждения.

На рисунке 1 представлена схема теплообразования при ЭМЗ рабочих поверхностей шлицевой втулки.

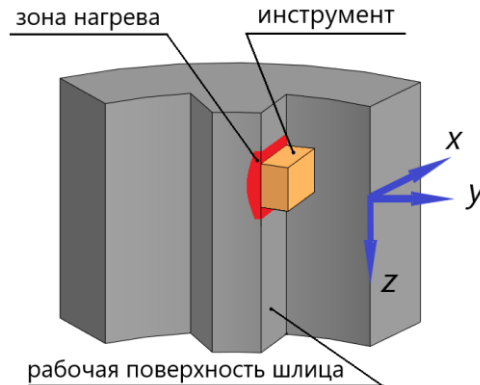


Рисунок 1 – Схема теплообразования при ЭМЗ рабочих поверхностей шлицевой втулки

Предположим, что при ЭМЗ рабочей поверхности шлица в некотором объеме в виде элементарного параллелепипеда с ребрами dx , dy , dz (рисунок 2) действует источник теплоты с объемной плотностью мощности (удельной мощностью) q_3 , Вт м⁻³.

Если принять, что теплопроводность $\lambda = \lambda_x = \lambda_y = \lambda_z$ и объемная теплоёмкость $c\rho$ не зависят от температуры и координат (тело однородно), то дифференциальное уравнение теплопроводности для однородного тела в неподвижной относительно тела системе координат можно записать [6]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_3}{c\rho} = a \nabla^2 T + \frac{q_3}{c\rho} \quad (1)$$

где $c\rho$ – объёмная теплоёмкость, Дж м⁻³ К⁻¹;

$a = \lambda/(c\rho)$ – температуропроводность, м² с⁻¹;

∇^2 – оператор Лапласа.

Решение дифференциального уравнения теплопроводности (1) полученное методом источников тепла, который заключается в том, что любой процесс распространения теплоты в теле можно представить в виде суммы процессов выравнивания температуры от множества элементарных источников теплоты, распределенных как в пространстве, так и во времени.

В качестве элементарного принимаем мгновенный точечный источник теплоты Q_0 (Дж), помещенный в точку (ξ, η, ζ) бесконечного тела и действующий в момент $t = 0$. Температура в любой точке тела x, y, z в любой момент времени t определяется формулой

$$T(x, y, z, t) = \frac{Q_0}{c\rho [4\pi a t]^{\frac{3}{2}}} \exp \left(-\frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}{4at} \right) \quad (2)$$

В случае полосового источника тепла при $z = 0$ получаем

$$T(x, y, z, t) = \int_0^t \frac{2q_0}{c\rho [4\pi a(t-\tau)]^{\frac{3}{2}}} \exp \left(-\frac{[x + v(t-\tau)]^2 + y^2}{4a(t-\tau)} \right) d\tau \quad (3)$$

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты расчета распространения температуры на поверхности и вглубь шлица в зависимости от силы тока I и времени подачи электрического тока τ представлены на рисунках 2 и 3.

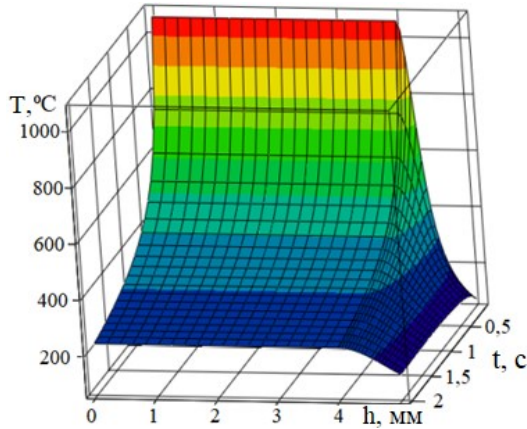


Рисунок 2 - Квazистационарное температурное поле от источника шириной h на рабочей поверхности шлица при ЭМЗ ($I = 800 \text{ A}$), $z = 0$

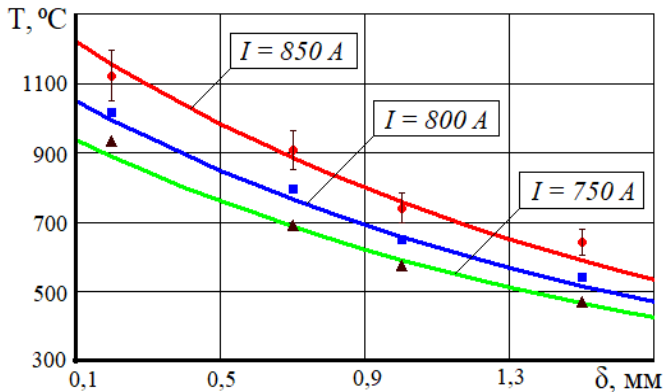


Рисунок 3 - Результаты расчета температурного поля от источника при ЭМЗ вглубь шлица в зависимости от силы тока I

Из графика (рисунок 3) видно, что максимальная расчетная температура на рабочей поверхности шлица достигается при $I = 850 \text{ A}$ и составляет 1216°C . При $I = 750 \text{ A}$ расчетная температура на поверхности шлица снижается на 24 % до 922°C . Кроме того при $I = 850 \text{ A}$ глубина упрочнения, с учетом температуры необходимой для фазовых превращений, может составлять до 0,8 мм, тогда как при $I =$

750 А до 0,2 мм.

Закключение. Результаты расчета имеют хорошую сходимость с результатами, полученными при исследовании процесса в среде математического моделирования COMSOL Multiphysics v5.6 93...96%, а также с результатами экспериментальных исследований 86...91% [5].

Библиографический список:

1. Аскинази, Б.М. Упрочнение и восстановление деталей электромеханической обработкой. /Б.М. Аскинази. – 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1989. - 200 с.
2. Электромеханическая обработка: технологические и физические основы, свойства, реализация. / Багмутов В.П., Паршев С.Н и др. - Новосибирск: Наука, 2003. - 318с.
3. Федоров, С.К. Исследование температурных полей в зоне контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью в процессе избирательной электромеханической закалки / С.К. Федоров, А.В. Морозов, В.А. Фрилинг // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2012.- № 9. - С 117-125.
4. Морозов, А.В. Электромеханическая закалка рабочих поверхностей шлицевых втулок техники сельскохозяйственного назначения / А.В. Морозов, Л.В. Федорова, Г.Д. Федотов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2015. - № 2. – С. 169-175.
5. Морозов, А.В. Исследование тепловых процессов при электромеханической закалке рабочих поверхностей шлицевых втулок / А.В. Морозов, А.Н. Еремеев, Д.Р. Мушарапов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2024. – № 1(65). – С. 185 - 191.
6. Исаев, Ю.М. Температурное поле при воздействии концентрированных потоков энергии / Ю.М. Исаев, Л.В. Федорова, А.В. Морозов // Вестник СамГТУ, серия «Физико-математические науки». - 2006. - № 41.– С. 188-190.

**RESULTS OF CALCULATION OF TEMPERATURE SPREAD
FROM A SOURCE DURING ELECTROMECHANICAL
HARDENING OF WORKING SURFACES OF SPLINED BUSHINGS**

Isaev Yu.M., Morozov A.V., Kuznetsov D.S.

Keywords: *spline bushings, working surface, electromechanical hardening, current strength, temperature distribution*

The work is devoted to the study of thermal processes occurring during electromechanical hardening of working surfaces of spline bushings with a straight-sided tooth profile. The results of calculating the temperature distribution on the surface and deep into the spline depending on the current strength and the time of electric current supply are presented. A comparison of the obtained calculation results with the results of modeling in the COMSOL Multiphysics v5.6 environment and the results of experimental studies is performed.