

Каримов Ш. А., Шакиров Ш. М., Джемилов Э. Ш., Белова И. В.
Sh. A. Karimov, Sh. M. Shakirov, E. Sh. Dzhemilov, I. V. Belova

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА ПРИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОМ ПРИПЕКАНИИ

MATHEMATICAL MODELING OF HEAT PROPAGATION IN ELECTRIC CONTACT SINTERING

Каримов Шоир Ахрорович – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения Ташкентского государственного технического университета (Республика Узбекистан, Ташкент). E-mail: karimovsh@mail.ru.

Shoir A. Karimov – PhD in Engineering, Associate Professor, Materials Science Department, Tashkent State Technical University (Uzbekistan, Tashkent). E-mail: karimovsh@mail.ru.

Шакиров Шухрат Мусаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения Ташкентского государственного технического университета (Республика Узбекистан, Ташкент).

Shukhrat M. Shakirov – PhD in Engineering, Associate Professor, Materials Science Department, Tashkent State Technical University (Uzbekistan, Tashkent). E-mail: shuhratshakirov71@gmail.com.

Джемилов Эшреб Шефикивич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроения Крымского инженерно-педагогического университета имени Февзи Якубова (Россия, Симферополь). E-mail: eshreb@mail.ru.

Eshreb Sh. Dzhemilov – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Mechanical Engineering Technology Department, Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov (Russia, Simferopol). E-mail: eshreb@mail.ru.

Белова Инна Валерьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и технологии новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: inna_belova@mail.ru.

Inna V. Belova – PhD in Engineering, Assistant Professor, Materials Science and Technologies of New Materials Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: inna_belova@mail.ru.

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы определения и прогнозирования распространения тепловых полей в процессе электроконтактного припекания на основе математического моделирования процесса. Показано, что наиболее значимыми технологическими режимами процесса являются: величина напряжения, сила тока, усилие прижатия порошкового материала и время воздействия этих факторов. Результаты обработки математической модели показали, что повышение температуры покрытия единичной точки наблюдается только в начальный период подачи импульса тока (0,02...0,04 с), далее идёт стабилизация температуры, а источником тепловыделения является возникающее сопротивление между материалом спрессованного порошка и микронеровностями поверхности подложки. Изменение микроструктуры материала в результате электроконтактного припекания – один из ключевых аспектов, который необходимо учитывать. Нагрев и давление могут приводить к рекристаллизации, образованию нового фазового состояния и улучшению механических свойств соединений. Понимание этих процессов позволяет точно настраивать технологии для достижения желаемых характеристик готовых изделий.

Summary. The article considers the issues of determining and predicting the distribution of thermal fields in the process of electrocontact sintering based on the mathematical process of modeling. It is shown that the most significant parameters of the process are: the magnitude of voltage, current strength, increased pressing of the powder material and the time of exposure to these factors. The results of processing the mathematical model of the phenomenon show that an increase in the coating temperature of a single point is observed only in the initial period of supplying a pulsed current (0.02-0.04 sec.), then the temperature stabilizes, as a result of which heat generation resistance occurs between the resistance of the pressed powder and the microns of the surface of the substrate material. The change in the microstructure of the material as a result of electrical contact baking is one of the key aspects

that must be taken into account. Heating and pressure can lead to recrystallization, formation of a new phase state, and improvement of the mechanical properties of the compounds. Understanding these processes allows you to fine tune the technology, achieving the desired characteristics of the finished products.

Ключевые слова: электроконтактное припекание, математическое моделирование, тепловое распределение, режимы обработки.

Key words: electrocontact sintering, mathematical modeling, thermal distribution, processing modes.

УДК 629.113.004.67

Введение. Процесс электроконтактного припекания (ЭКП) является одним из ресурсо-энергосберегающих способов восстановления и упрочнения деталей [1]. Преимуществами способа являются доступность присадочных материалов, простота изготовления оборудования, высокая производительность и возможность механизации и автоматизации [2].

Однако недостаточность литературных данных о механизмах явлений, протекающих при ЭКП, таких как диффузионные, электрические и особенно тепловые процессы и их взаимосвязи, ограничивает широкое применение данного способа.

Характер распределения температуры оказывает влияние практически на все процессы, происходящие в зоне соединения покрытие-подложка [3; 4]. Поэтому возможность определения или прогнозирования тепловых процессов, температурных полей в зоне соединения является важной частью исследования процесса ЭКП в целом.

Экспериментальное определение оптимальных параметров процесса ЭКП требует проведения большого количества опытов и дорогостоящего оборудования. Быстротечность процесса, изменение агрегатного состояния материалов покрытия и подложки, большие токовые наводки, изменение параметров режимов значительно усложняют измерения температурных параметров термического цикла при ЭКП.

Методика проведения эксперимента. Эффективным методом прогнозирования параметров термического цикла и распространения тепла в пространственно-временной системе является метод математического моделирования. В качестве базовой формы для математического моделирования была выбрана цилиндрическая втулка грунтового насоса.

Моделирование проводилось при следующих условиях:

- покрытие и подложка имеют цилиндрические поверхности с разными значениями радиусов, обладают цилиндрической симметрией;

- температура и тепловое поле в зоне соединения являются результатом сложных физических процессов, которые зависят как от величины контактного сопротивления, так и от тока, протекающего через этот контакт. При увеличении тока через соединение растёт мощность, выделяемая в виде тепла, что может привести к перегреву. Особенно критичным становится момент, когда контактное сопротивление существенно увеличивается, что вызывает локальное повышение температуры;

- температура работы деформации покрытия и температура нагрева электрода-ролика часто оказываются незначительными в условиях охлаждения, что позволяет ими пренебречь;

- температура распределяется по внешней винтовой линии припекания, и её распространение симметрично относительно осей X и Y .

Начальная пористость $\Pi_0(z) = \text{const}$. Усилие прижатия P приводит к уплотнению слоя покрытия, уменьшая пористость. Уменьшение пористости оказывает влияние на теплофизические свойства и удельное электросопротивление покрытия. Припекание со скоростью V образует на поверхности покрытия полосу шириной h_i , перекрытие предыдущей полосы с последующей составляет 15...20 % по ширине и 20...30 % по длине. Охлаждение осуществляется спреером, в качестве охладителя выступает 1,5%-й водный раствор, модифицированный карбоксилметилцеллюлозой.

Учитывая специфику ЭКП, мы должны принимать во внимание постепенный рост нагрева металла подложки в начальный момент процесса, т. е. начальную температуру при установившейся-

ся температуре. Температура подложки незначительно отличается от температуры зоны соединения. Для упрощения расчётов они принимаются равными [5].

Для каждой точки зоны соединения температура при многократном воздействии импульса тока припекания будет зависеть только от времени $T(t)$ и распространения температуры по объёму подложки $\theta(t)$. Схема распространения температуры нагрева подложки показана на рис. 1.

С допущениями, указанными выше, можно определить температуру в точке A из условия

$$T_A(t) = \theta(t_u + t_n) - \theta(t_n).$$

При подаче следующего импульса тока температуру в уравнении в точке B можно определить по условию $T_B = T_A + \Delta T_1$.

Приращение температуры от последующего импульса можно определить из соотношения

$$\Delta T_1 = \theta[2(t_u + t_n) - \theta[2(t_u + t_n) - t_n]].$$

Тогда температура в точке B

$$T_B = [\theta(t_0 + t_n) - \theta(t_n)] + \theta[2(t_u + t_n) - \theta[2(t_u + t_n) - t_n]].$$

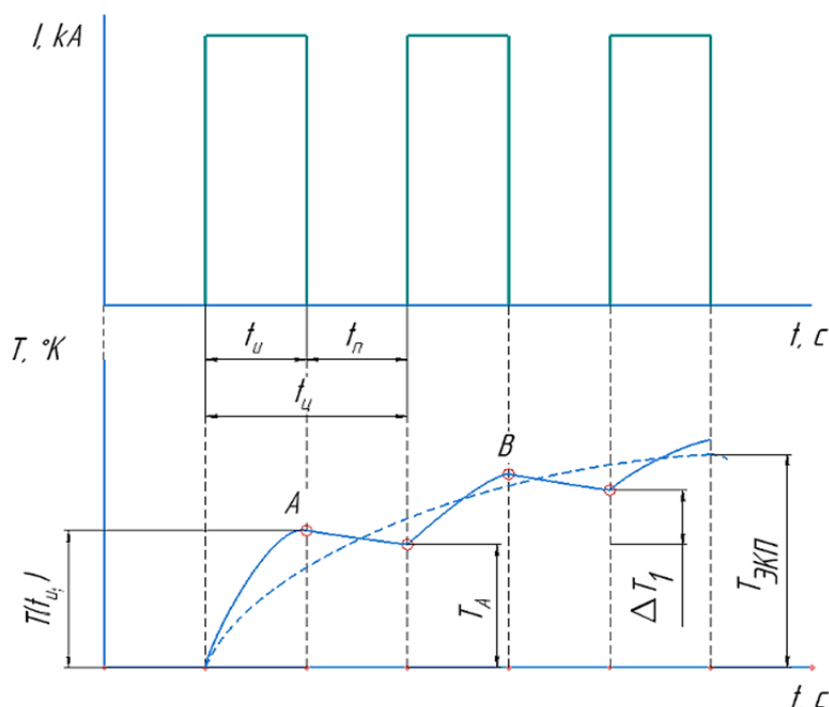


Рис. 1. Схема распределения температуры нагрева подложки при ЭКП

Для точного определения теплового воздействия и импульса тока при ЭКП большое значение имеет среднеквадратичная величина импульса тока. Величина же напряжения влияет незначительно. Используемые приборы для измерения величины напряжения и силы тока показывают среднеарифметическое значение параметров.

Так как параметры режима ЭКП (сила тока, усилие прижатия и длительность импульса тока) действуют в коротком промежутке времени, то среднее арифметическое и среднеквадратичные величины этих параметров будут сильно отличаться друг от друга (см. рис. 2).

Пористость покрытия в процессе ЭКП уменьшается по экспоненте в зависимости от усилия прижатия и времени его воздействия:

$$\Pi' = \Pi_0 \exp(-z \cdot t_{пр}),$$

где $t_{пр}$ – время воздействия усилия прижатия.

Граничные условия по оси $R_1 = 0$; $0 \leq z \leq l_{пр}$, следовательно, $\frac{\partial T}{\partial R_1} = 0$.

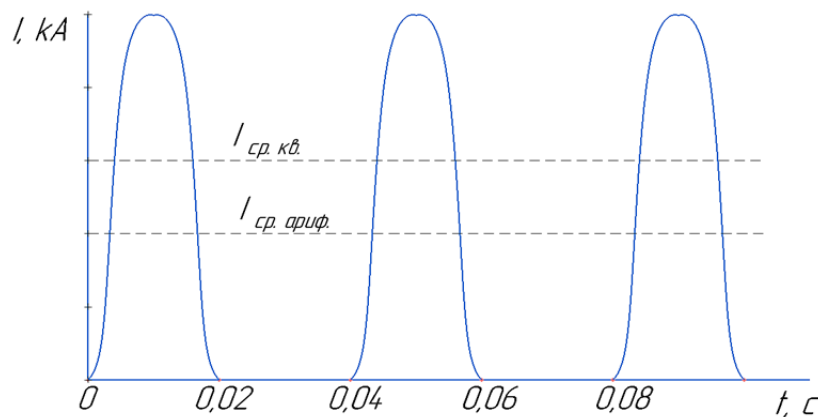


Рис. 2. Изменение тока припекания

Для моделирования температурного поля при нагреве массивного тела мгновенным источником тепла, смещённым по времени и местам воздействия, свойственного ЭКП, можно применить формулу

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{U \cdot I \cdot t_u \cdot \eta}{C\rho(4\pi \cdot a \cdot t_i)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(\frac{-x^2 - z^2 - (y + h_i)^2}{4 \cdot a \cdot t_i} - \frac{2 \cdot \alpha \cdot t_i}{C\rho \cdot R_B}\right),$$

где U – напряжение импульса, В; I – ток импульса, кА; t_u – время действия импульса, с; η – КПД нагрева основного металла; a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; $C\rho$ – коэффициент объёмной теплоёмкости, $\text{КДж}/\text{м}^3 \cdot \text{с}$; h_i – шаг между соседними точками припекания, см; α – коэффициент поверхностной теплоотдачи; $t_i = t_u + t_{\text{п}}$, здесь $t_{\text{п}}$ – время паузы; R_B – радиус припеканной втулки, мм.

Результаты и их обсуждение. Материал втулки – сталь 45. Режимы припекания: $I = 1,4 \dots 2,2$ кА, $U = 3,45$ В, $t_u = 0,02 \dots 0,04$ с, $t_i = 0,04 \dots 0,06$ с, $\eta = 0,12$; $R_B = 55$ мм, $\alpha = 8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$; $C\rho = 4,8 \cdot 10^3 \text{ КДж}/\text{м}^3 \cdot \text{с}$; $h_i = 0,4 \dots 0,5$ см.

Обработка результатов опыта в виде кусочно-непрерывной функции реализована программой MathCad [6].

Тепло, выделяемое в зоне соединения, кроме параметров режима, связано с удельными электрическими сопротивлениями металла подложки и покрытия. Удельное электрическое сопротивление металла подложки меняется в зависимости от температуры, т.е. $\rho'_n = \rho_1 \cdot (T)$, где ρ_1 – удельное электрическое сопротивление подложки. Удельное электрическое сопротивление подложки дополнительно меняется ещё и от пористости покрытия $\rho'_{\text{пок}} = \rho_{\text{пок}}(T, \Pi)$, где $\rho_{\text{пок}}$ – удельное электрическое сопротивление покрытия.

Результаты расчётов показывают, что $\dot{f}(t)$ тепловой поток в единичных контактах остаётся постоянным во времени (см. рис. 3).

Анализ результатов моделирования показал, что температура покрытия единичной точки достигает своего максимума за $0,02 \dots 0,04$ с, далее температура покрытия падает (см. рис. 4).

В начальный момент подачи импульса тока в зоне соединения происходит нагрев покрытия по всей толщине. Нагрев покрытия приводит к его деформации и увеличению площади контакта между покрытием и подложкой, нагреву металла подложки, уменьшению контактного сопротивления, плотности тока, теплоотвод смещается в сторону подложки. Тепловой поток распространяется по осям X и Y симметрично и возрастает по мере движения источника тепла, на рис. 4 показано распределение теплового потока по осям X и Y .

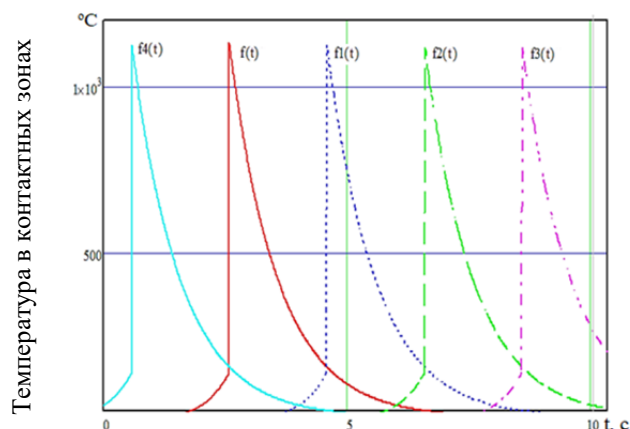


Рис. 3. Изменение теплового потока единичных контактов во времени

По окончании деформации покрытия ток начинает протекать по всей толщине покрытия, происходит окончательное уплотнение слоя.

Кривые изменения температуры показывают, что источником тепловыделения служит контактное электросопротивление, возникающее между микронеровностями металла подложки и частицами покрытия. По мере продолжения процесса электроконтактного припекания температура металла подложки постепенно повышается.

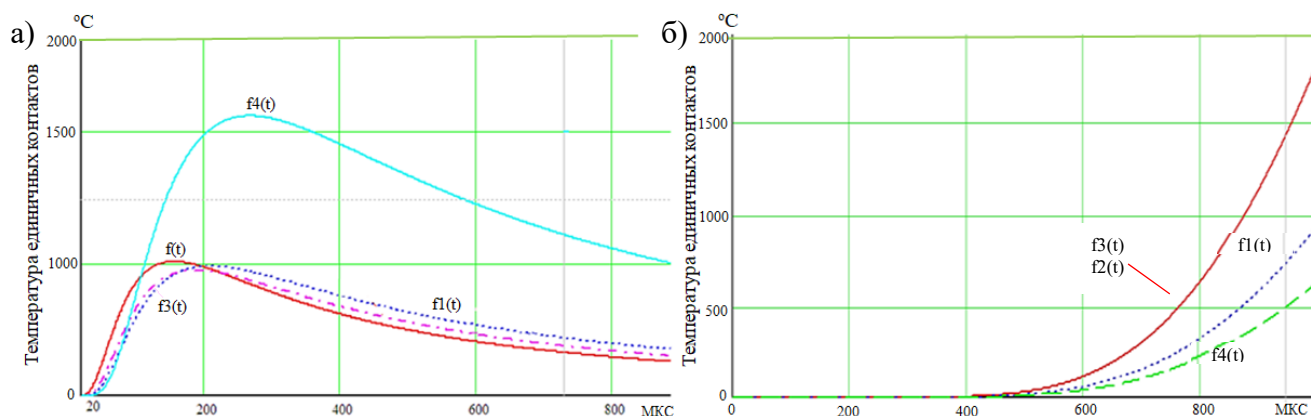


Рис. 4. Распределение теплового потока в металле подложки: а – по оси Y ; б – по оси X

Заключение. Математическое моделирование теплового процесса ЭКП позволяет получить характеристики распространения теплового потока во времени с учётом изменения теплофизических свойств зоны соединения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пантелеенко, Ф. И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия из них / Ф. И. Пантелеенко. – Минск: УП «Технопринт», 2001. – 300 с.
2. Ярошевич, В. К. Электроконтактное упрочнение / В. К. Ярошевич, Я. С. Генкин, В. А. Верещагин. – Минск: Наука и техника, 1982. – 256 с.
3. Дорожкин, Н. Н. Технологические основы получения порошковых покрытий с использованием импульсных методов / Н. Н. Дорожкин, В. К. Ярошевич, А. С. Гурский // Математические модели физических процессов: материалы 11-й междунар. науч. конф. – Таганрог: Изд-во ТГПИ, 2005. – С. 51-56.
4. Теория и практика припекания порошков / Т. М. Абрамович, А. И. Жорник, А. В. Павленко, В. К. Ярошевич. – Таганрог: Изд-во ТГПИ, 2008. – 320 с.
5. Рыкалин, Н. Н. Расчёты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М.: Машгиз, 1951. – 296 с.