

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ТРЕМЯ ЭЛЕКТРОДАМИ-ИНСТРУМЕНТАМИ

Исаев Юрий Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Математика и физика»

Курдюмов Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»

Яковлев Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология производства и ремонт машин»

ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

432017, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, 1; тел.: 8 (8422) 55-95-97

E-mail: ugsha@yandex.ru

Ключевые слова: цилиндрическая деталь, электромеханическая обработка, потенциал, напряжение, электрод-инструмент, сила тока

Дальнейшее повышение производительности и снижение затрат энергии при электромеханической обработке (ЭМО) деталей машин возможно на основе разработки и применения трехинструментального воздействия на обрабатываемые поверхности. Для этого следует применять силовое оборудование для ЭМО, работающее на линейном напряжении электрической сети. Учитывая практическую безынерционность электрического поля, связанную с малой частотой тока в рабочей цепи ЭМО, на основе уравнения Лапласа решили задачу распределения электрических потенциалов в цилиндрической детали по радиусу цилиндра, углу отклонения искровой точки от начального положения и положения электрода-инструмента по оси цилиндра. Полученные зависимости были подтверждены практическими экспериментами, что позволило построить поверхности отклика потенциала при ЭМО цилиндрической детали в зависимости от текущих значений радиуса и длины цилиндрической детали, а также угла отклонения в поперечной плоскости искровой точки от начальной координаты. На основе этого можно определить особенности тепловыделения в детали при ЭМО тремя электродами-инструментами. Это позволяет оценить характер распределения теплоты по объему цилиндрических деталей при ЭМО, определить параметры требуемого источника тока, выбрать оптимальные режимы обработки и определить характер изменения температуры в обрабатываемой детали, в том числе в области ее контакта с электродом-инструментом.

Введение

Процессы электромеханической обработки одним и двумя электродами-инструментами (роликками или пластинами) нашли широкое применение в машиностроении [1, 2, 3, 4] и ремонтном производстве [5, 6, 7, 8], благодаря их эффективности, простоте, безопасности и экологичности [9, 10, 11]. К основным недостаткам таких технологий можно отнести относительно низкую производительность и значительные потери электроэнергии. Эти недостатки устраняют путем выполнения ЭМО тремя электродами-инструментами. Это позволяет повысить производительность ЭМО до 5 раз (например, по патенту РФ № 2457258 [12]) и сократить затраты электроэнергии на электромеханическую обработку поверхности детали до 2,5 раза.

Процессы ЭМО, выполняемые тремя электродами-инструментами, отличаются сложными динамическими электрическими и термомеханическими процессами в материале детали. Для дальнейшего развития этих процессов

необходимо изучить характер распределения электрических потенциалов в деталях.

Материалы и методы исследований

Для изучения характера тепловыделений при ЭМО тремя электродами-инструментами исследовали изменения электрического потенциала по глубине и длине цилиндрических деталей, а также изменение потенциала в приконтактной зоне.

Для этого были разработаны и изготовлены три образца для измерений, учитывающие особенности эксперимента [13]. Общий вид образцов представлен на рис. 1.

В просверленное отверстие устанавливали и приваривали на глубине r и расстоянии z от торца детали при помощи конденсаторной сварки серебряный (измерительный) электрод [14], который соединяли гибкими тонкими экранированными изолированными проводами с измерительной аппаратурой. Цилиндрическую деталь закрепляли в патроне токарного станка и обкатывали тремя электродами-инструмента-

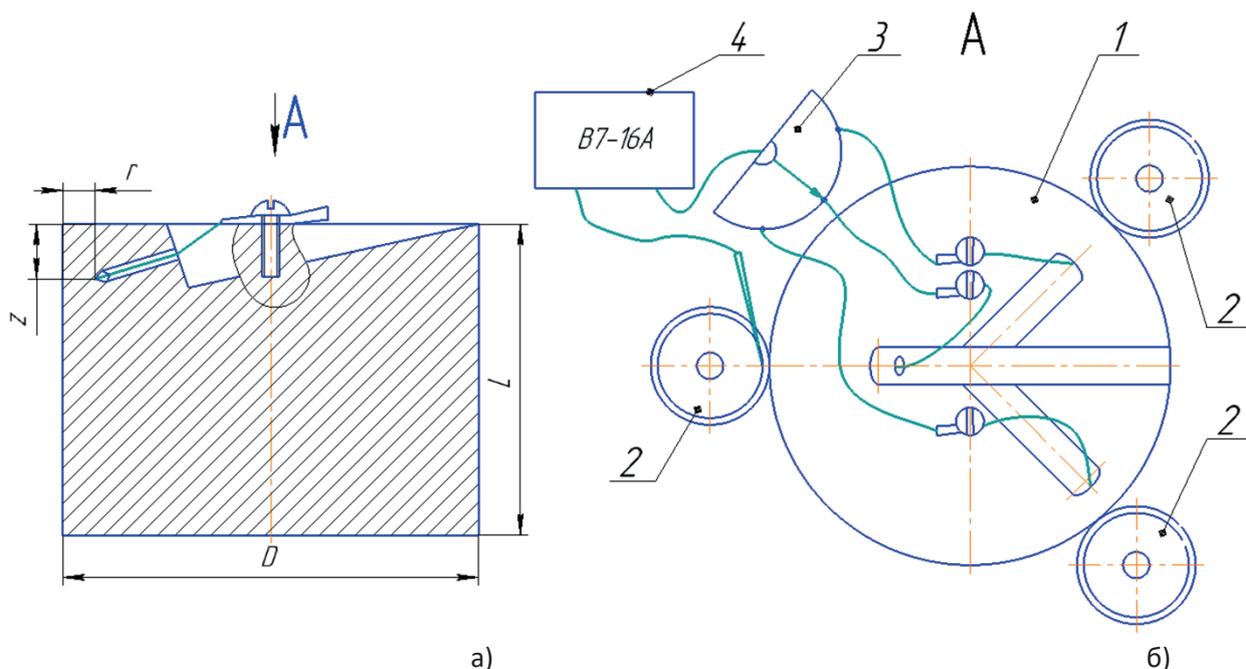


Рис. 1 – Общий вид образцов (а) и схема измерений распределения электрических потенциалов в цилиндрической детали (б): 1 – деталь; 2 – электроды-инструменты (ролики); 3 – переключатель; 4 – милливольтметр

ми при различной силе тока. После обработки деталь протачивали на глубину 1 мм, а при обработке приконтактной зоны - на 0,2 мм. Подачу и скорость обработки принимали постоянными, причем обработку начинали всегда так, чтобы взаимное расположение электродов-инструментов и измерительного электрода оставалось постоянным, а изменялось только расстояние между ними.

Электрофизические параметры ЭМО исследовали на токарно-винторезном станке модели 1К62 при обработке заготовки из стали 45 \varnothing 150 мм твердосплавными роликами (материал ролика - Т15К6, радиус ролика $R_{\text{и}} = 30$ мм, радиус скругления вершины рабочего участка $r_{\text{и}} = 10$ мм). Характер распределения потенциала по объему детали определяли по разности потенциалов $U = u_0 - u$ цифровым милливольтметром В7-16А (кл. 0; погрешность: $\pm 0,0001$ мВ). Для этого периодически изменяли расстояния от обрабатывающих электродов-инструментов (роликов) до точек, к которым был присоединен измерительный электрод (рис. 1). Расстояние z изменяли посредством поперечной подачи станка, радиусу r - периодической проточкой образца.

Результаты исследований

На рис. 2 представлена общая схема постановки задачи распределения электрических потенциалов в цилиндрической детали в систе-

ме координат (r, φ, z) , где r - радиус цилиндра; φ - угол отклонения от начального положения в поперечной плоскости детали точки, в которой определяют электрический потенциал; z - начальное положение электрода-инструмента по оси цилиндра.

Вследствие практической «безынерционности» электрического поля задачу распределения электрических параметров можно считать стационарной ввиду малой частоты тока» [15]. Тогда распределение электропотенциала в цилиндрической детали можно определить с помощью уравнения Лапласа [16].

Рассмотрим решение краевой задачи «для уравнения Лапласа внутри прямого кругового цилиндра ($0 \leq r \leq R, 0 \leq \varphi \leq 2\pi, -h \leq z \leq h$). Для примера используем задачу Дирихле» [9]:

$$\Delta u = 0, \quad (1)$$

$$0 \leq r \leq a, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi, \quad 0 \leq z \leq h;$$

$$\left. \frac{du}{dr} \right|_{r=R} = 0; \quad (2)$$

$$u|_{z=0} = u|_{z=h} = 0; \quad (3)$$

$$u|_{\varphi=0, r=R} = u_0$$

$$u|_{\varphi=2/3\pi, r=R} = u_0 \sin \varphi$$

$$u|_{\varphi=4/3\pi, r=R} = u_0 \sin \varphi, \quad (4)$$

где Δu - падение потенциала, u_0 - задан-

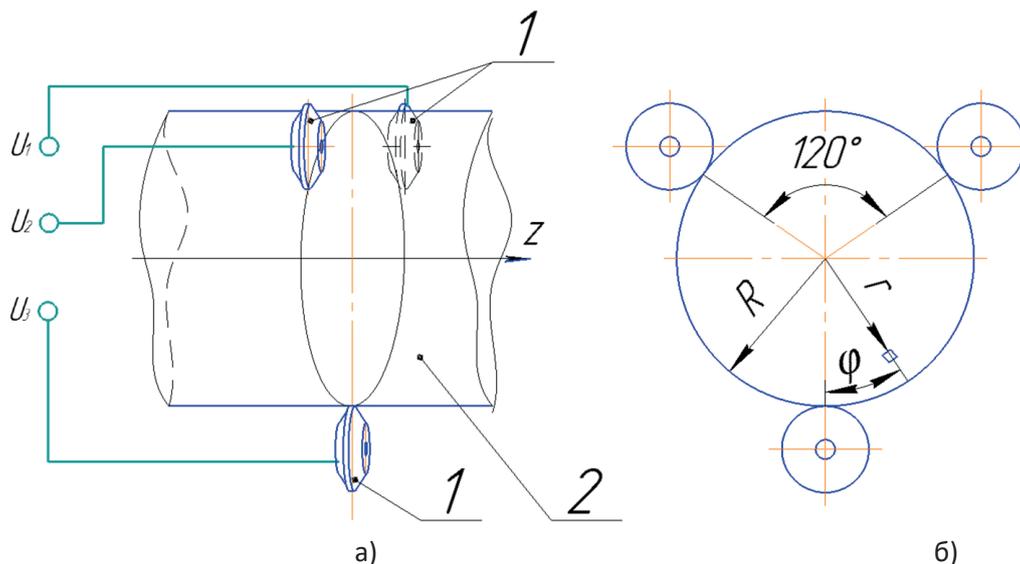


Рис. 2 - Общая схема постановки задачи распределения электрических потенциалов в цилиндрической детали: а) расположение электродов-инструментов (роликов) 1 на цилиндре 2; б) расположение роликов в поперечном сечении детали

ный электрический потенциал, В.

Систему частных решений уравнения Лапласа представим в виде произведения двух функций $v(r, \varphi)$ и $Z(z)$:

$$u(r, \varphi, z) = v(r, \varphi) \cdot Z(z) \quad (5)$$

при следующих граничных условиях:

$$u|_{r=a} = u_0 \cdot \sin \varphi. \quad (6)$$

Подставляя (5) в уравнение Лапласа и разделяя переменные, получим уравнение для определения $Z(z)$:

$$Z'' - \lambda Z = 0, \quad -h < z < h, \quad (7)$$

где Z'' - вторая производная функции Z по z ; λ - постоянное число, $\lambda = Z''/Z$.

Общее решение уравнения (7) представим в виде, удобном для решения задачи Дирихле [17] по переменной z :

$$Z(z) = A_i \cdot \exp(-\lambda_i |z|), \quad (8)$$

где A_i - коэффициенты и собственные значения при разложении функции $Z(z)$ в ряд.

Для определения функции $v(r, \varphi)$ получаем уравнение:

$$\Delta v - \lambda v = 0, \quad 0 \leq r < R, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi. \quad (9)$$

Задача (9) есть задача Штурма - Лиувилля для отрезка [18]. Ее собственные значения $\lambda = \lambda_i$, $i = 1, 2, \dots, \infty$, а собственные функции запишутся в виде уравнения для определения $u(r)$:

$$r^2 v'' + r v' + (\lambda_i^2 - 1)v = 0, \quad (10)$$

$$0 \leq r < R, \quad |v(0)| < \infty,$$

где v'' - вторая производная функции v по r .

Запишем общее решение уравнения (10):

$$u(r) = C_1 J_1(\lambda_i r) + C_2 Y_1(\lambda_i r), \quad (11)$$

где $J_1(x)$ - «функция Бесселя первого рода, первого порядка; $Y_1(x)$ - функция Бесселя второго рода, первого порядка; C_1 и C_2 - произвольные постоянные» [16].

Функция $Y_1(\lambda r)$ стремится к ∞ , если r стремится к 0. Рассмотрим ограниченные решения, полагая, что

$$u(r) = C_1 J_1(\lambda_i r). \quad (12)$$

Для определения собственных чисел λ_i запишем характеристическое уравнение, используя условие (2) и соотношения функций Бесселя:

$$\frac{d}{dx}(x \cdot J_1(x)) = x \cdot J_0(x),$$

откуда

$$\frac{dJ_1(x)}{dx} = J_0(x) - \frac{J_1(x)}{x},$$

где x - переменная функции Бесселя или ее аргумент [18].

Собственные числа λ_i являются корнями характеристического уравнения:

$$\frac{dJ_1(x)}{dx} = J_0(x) - \frac{J_1(x)}{x} = 0. \quad (13)$$

Тогда общее решение искомой задачи выглядит следующим образом:

$$v(r, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} (A_n \cos n\varphi + B_n \sin n\varphi) J_1(\lambda_i r), \quad (14)$$

где n - номер члена ряда.

Постоянные A_n и B_n находим из гранич-

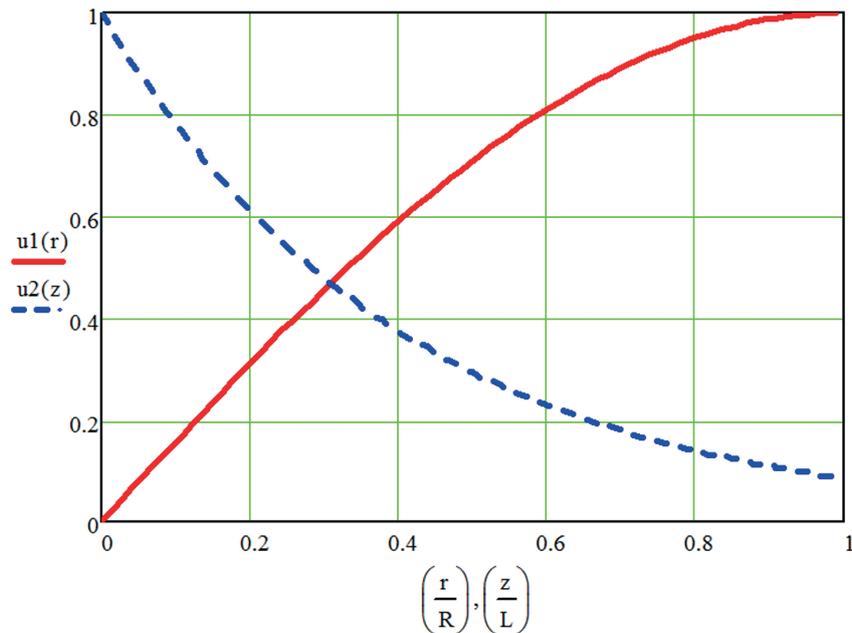


Рис. 3 - Распределение электрического потенциала в детали в зависимости от радиуса и длины цилиндрической детали

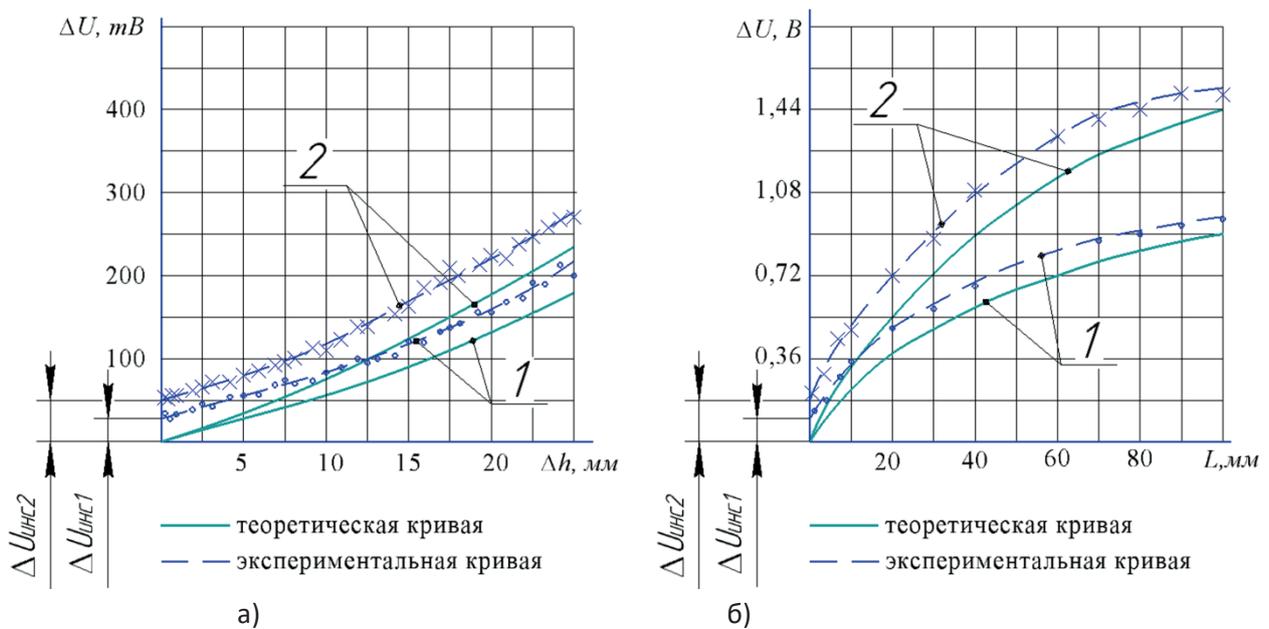


Рис. 4 - Зависимость падения напряжения ΔU по объему цилиндрической детали при подаче линейного напряжения: а - по радиусу (глубине от поверхности Δh) детали; б - по длине L детали; 1 - $I = 400$ А ($U_0 = 1$ В), 2 - $I = 700$ А ($U_0 = 1,7$ В)

ного условия:

$$u(a, \varphi) = u_0 \cdot \sin \varphi ; ;$$

$$u_0 \cdot \sin \varphi = \sum_{n=0}^{\infty} (A_n \cos n\varphi + B_n \sin n\varphi) J_1(\lambda_n r), \quad (15)$$

откуда

$$A_n = 0, \quad n = 0, 1, 2, \dots,$$

$$B_n = 0, \quad n \neq 1, \quad n = 0, 2, \dots$$

Окончательно:

$$u(r, \varphi, z) = v(r, \varphi) \cdot Z(z) = u_0 \exp(-\lambda_k |z|) \cdot \sin \varphi \cdot J_1(\lambda_k r) / J_1(\lambda_k R) \quad (16)$$

Распределение потенциала в обрабатываемой детали в зависимости от радиуса R и длины цилиндра L представлено на рис. 3.

Результаты проведенных экспериментов по определению падения напряжения ΔU при различных режимах ЭМО представлены на рис.

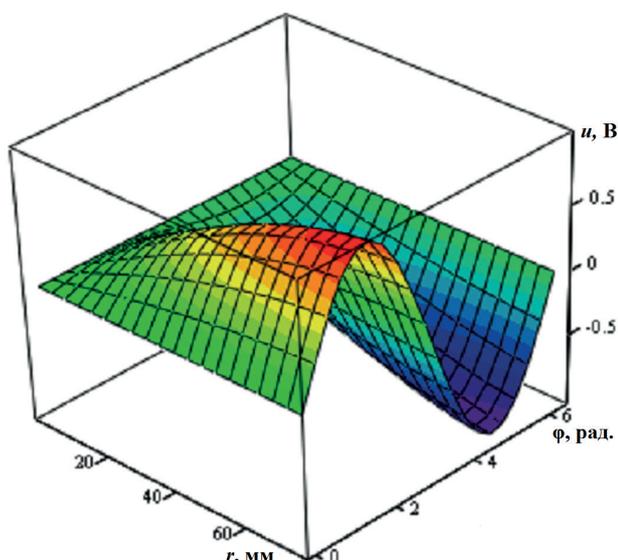


Рис. 5 - Поверхность отклика потенциала u в зависимости от радиуса цилиндрической детали r и угла ϕ

4. Экспериментальные кривые, полученные при ЭМО силой тока $I = 400$ А ($U_0 = 1$ В) и $I = 700$ А ($U_0 = 1,7$ В), практически повторяют теоретические кривые, отличаясь на $\Delta U_{инс1}$ и $\Delta U_{инс2}$ соответственно. Это связано с тем, что при измерениях возникали систематические погрешности $\Delta U_{инс1}$ и $\Delta U_{инс2}$, обусловленные технической невозможностью помещения измерительного электрода внутрь твердосплавного ролика.

Обсуждение

Экспериментальное подтверждение характера распределения электрического потенциала при обработке тремя электродами-инструментами позволяет построить поверхности отклика потенциала при ЭМО цилиндрической детали в зависимости от текущих значений радиуса r , длины z и угла ϕ (рис. 5 и 6).

Экспериментальное подтверждение характера распределения электрического потенциала в детали позволяет использовать выведенные теоретические зависимости для выбора при ЭМО деталей цилиндрической формы, оптимизировать режимы обработки на основе обеспечения заданной температуры нагрева поверхностного слоя детали при электромеханическом воздействии, которая и обуславливает структурные изменения, происходящие в объеме приконтактных зон при обработке тремя электродами-инструментами.

Заключение

Выведенные зависимости позволили определить характер распределения электрического потенциала по объему цилиндриче-

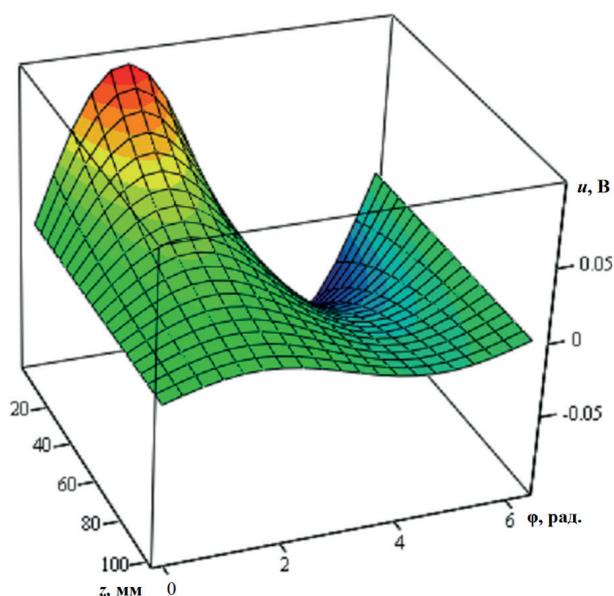


Рис. 6 - Поверхность отклика потенциала в зависимости от длины цилиндрической детали z и угла ϕ

ской детали при ЭМО линейным током тремя электродами-инструментами. Построенные на основе этих зависимостей теоретические кривые распределения потенциала по радиусу и длине детали подтверждены результатами проведенных экспериментов. Это позволяет оценить характер тепловыделений по объему цилиндрических деталей при ЭМО, определить параметры требуемого источника тока, выбрать оптимальные режимы обработки и определить характер изменения температуры в обрабатываемой детали, в том числе в области ее контакта с электродом-инструментом.

Библиографический список

1. Аскинази, Б.М. Упрочнение и восстановление деталей электромеханической обработкой / Б.М. Аскинази - М.: Машиностроение, 1989. - 200 с.
2. Сулов, А.Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А.Г. Сулов, В.П. Федоров, О.А. Горленко и др.; под ред. А.Г. Сулова. - М.: Машиностроение, 2006. - 448 с.
3. Электромеханическое упрочнение металлов и сплавов: монография / Багмутов В.П., Паршев С.Н., Дудкина Н.Г., Захаров И.Н., Савкин А.Н., Денисевич Д.С. - Волгоград: ВолгГТУ, 2016. - 460 с.
4. Федорова, Л.В. Отделочно-упрочняющая электромеханическая обработка резьбы / Л.В. Федорова. - Ульяновск: ИЦ-Пресса, 2005. - 214 с.

5. Элькин, С.Ю. Восстановление торсионов электромеханической обработкой / С.Ю. Элькин, Ф.Я. Рудик, В.Ф. Кузнецов // Автомобильная промышленность. – 2001. – № 3. – С. 18–19.

6. Федоров, С.К. Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой / С.К. Федоров, Л.В. Федорова // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1998. – № 6. – С. 42–43.

7. Салов, В.Б. Повышение усталостной прочности метрической резьбы упрочняющим электромеханическим восстановлением / В.Б. Салов, С.К. Федоров, Л.В. Федорова, В.А. Фрилинг // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2012. – № 2. – С. 106–111.

8. Morozov, A. The influence of volumetric electromechanical mandreling on the lead yield from the matrix material on the bronze bearing bushing surface (Conference Paper) / A. Morozov, G. Fedotov, K. Kundrotas // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - Volume 709. - Issue 3. - 2020. - P. 1 – 5.

9. Yakovlev S.A. Electromechanical hardening of VT22 titanium alloy in screw-cutting lathes / S.A. Yakovlev, M.M. Zamaldinov, Y.V. Nuretdinova, A.L. Mishanin, V.N. Igonin, M.V. Sotnikov, V.V. Khabarova // Russian Engineering Research. 2018. Т. 38. № 6. - P. 488-490.

10. Федоров, С.К. Электромеханическое восстановление резьбы / С.К. Федоров. – М.: ИЦ-Пресса, 2007. – С. 120–128.

11. Федорова, Л.В. Электромеханиче-

ская обработка и восстановление деталей дорожно-строительной техники / Л.В. Федорова, В.В. Стрельцов, Ю.С. Алексеева, С.К. Федоров // Строительные и дорожные машины. – 2008. – № 8. – С. 32–35.

12. Пат. 2457258. Российская федерация, МПК С 21 D 7/13 (2006.01), С 21 D 1/40 (2006.01), С 21 D 1/06 (2006.01). Способ электромеханической обработки деталей машин / С.А. Яковлев; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО Ульяновская ГСХА. – № 2011127295/02; заявл. 01.07.2011; опубл. 27.07.2012. – Бюл. № 21. – 6 с.

13. Ангерер Э. Техника физического эксперимента / Э. Ангерер - М.: Физматгиз, 1962. - 452 с.

14. Адлер А.А. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / А.А. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. - М.: Наука, 1971. - 284 с.

15. Яковлев, С.А. Влияние электрофизических параметров на электромеханическую обработку деталей машин: монография / С.А. Яковлев. – Ульяновск: УВАУ ГА (И), 2014. - 129 с.

16. Полянин А.Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики / А.Д. Полянин - М.: Физматлит, 2001. - 576 с.

17. Такахаси С. Занимательная статистика. Факторный анализ / С. Такахаси, И. Ироха (пер. с японского). - М.: Додэка, ДМК Пресс, 2015. - 256 с.

18. Свешников, А.Г. Теория функций комплексной переменной / А.Г. Свешников, А.Н. Тихонов - М.: Наука, 2004. - 321 с.

DISTRIBUTION OF ELECTRIC POTENTIAL DURING ELECTROMECHANICAL TREATMENT OF CYLINDRICAL PARTS WITH THREE ELECTRODE TOOLS

Isaev Yu. M., Kurdyumov V. I., Yakovlev S. A.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ulyanovsk State Agrarian University
432017, Ulyanovsk, Novyi Venets boulevard, 1; tel.: 8 (8422) 55-95-97*

E-mail: ugsha@yandex.ru

Keywords: cylindrical part, electromechanical treatment, potential, voltage, electrode-tool, current strength

Further productivity increase and energy consumption reduction during electromechanical treatment (EMT) of machine parts is possible due to development and application of a three-tool impact on the treated surfaces. In this regard, power equipment for EMT, operating on linear voltage of the electrical power supply, should be used. Taking into account practical zero lag of the electric field associated with low frequency of the current in the active circuit of the EMT, we solved the problem of distributing electrical potentials in a cylindrical part along the radius of the cylinder, on the basis of the Laplace equation, as well as the deviation angle of the desired point from the initial position and the position of the electrode-tool along the axis of the cylinder. The obtained dependences were confirmed by practical experiments, which allowed to construct the surfaces of potential response of a cylindrical part during EMT, depending on the current radius values and cylindrical part length, as well as the deviation angle in the transverse plane of the desired point from the initial coordinate. Thereupon, it is possible to determine the features of heat release in the part during EMT with three tool electrodes. It allows to evaluate the nature of heat distribution over the volume of cylindrical parts during EMT, determine the parameters of the required current source, select the suitable treatment modes, and determine the nature of temperature changes in the workpiece, including in the area of its contact with the tool electrode.

Bibliography:

- 1. Askinazi, B.M. Hardening and restoration of parts by electromechanical treatment / B.M. Askinazi - M.: Machine production, 1989. - 200 p.*
- 2. Suslov, A.G. Technological support and improvement of operational properties of parts and their connections / A.G. Suslov, V.P. Fedorov, O.A. Gorlenko [et al.]; ed. by A.G. Suslov. – M.: Machine production, 2006. – 448 p.*
- 3. Electromechanical hardening of metals and alloys: monograph / Bagmutov V.P., Parshev S.N., Dudkina N.G., Zakharov I.N., Savkin A.N., Denisevich D.S. - Volgograd: VolgSTU, 2016. - 460 p.*

4. Fedorova, L.V. *Finishing and hardening electromechanical thread treatment* / L.V. Fedorov. - Ulyanovsk: ITS-Press, 2005. - 214 p.
5. Elkin, S.Yu. *Restoration of torsion bars by electromechanical treatment* / S.Yu. Elkin, F.Ya. Rudik, V.F. Kuznetsov // *Automobile industry*. - 2001. - № 3. - P. 18–19.
6. Fedorov, S.K. *Hardening and restoration of machine parts by electromechanical treatment* / S.K. Fedorov, L.V. Fedorova // *Tractors and agricultural machines*. - 1998. - № 6. - P. 42–43.
7. Salov, V.B. *Increase of fatigue strength of a metric thread by strengthening electromechanical restoration* / V.B. Salov, S.K. Fedorov, L.V. Fedorova, V.A. Freeling // *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. - 2012. - № 2. - P. 106–111.
8. Morozov, A. *The influence of volumetric electromechanical mandreling on the lead yield from the matrix material on the bronze bearing bushing surface (Conference Paper)* / A. Morozov, G. Fedotov, K. Kundrotas // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. - Volume 709. - Issue 3. - 2020. - P. 1 - 5.
9. Yakovlev S.A. *Electromechanical hardening of VT22 titanium alloy in screw-cutting lathes* / S.A. Yakovlev, M.M. Zamaldinov, Y.V. Nuretdinova, A.L. Mishanin, V.N. Igonin, M.V. Sotnikov, V.V. Khabarova // *Russian Engineering Research*. 2018. V. 38. № 6. - P. 488-490.
10. Fedorov, S.K. *Electromechanical thread restoration* / S.K. Fedorov. – M.: ITS-Press, 2007. – P. 120–128.
11. Fedorova, L.V. *Electromechanical treatment and restoration of parts of road construction equipment* / L.V. Fedorova, V.V. Streltsov, Yu.S. Alekseeva, S.K. Fedorov // *Construction and road machines*. - 2008. - № 8. - P. 32–35.
12. Pat. 2457258. Russian Federation, IPC C 21 D 7/13 (2006.01), C 21 D 1/40 (2006.01), C 21 D 1/06 (2006.01). *Method of electromechanical processing of machine parts* / S.A. Yakovlev; applicant and patent holder FSBEI HPE Ulyanovsk State Agricultural Academy. - № 2011127295/02; appl. 01.07.2011; publ. 27.07.2012. - Bull. № 21. - 6 p.
13. Angerer E. *Technique of physical experiment* / E. Angerer - M.: Fizmatgiz, 1962. - 452 p.
14. Adler A.A. *Planning an experiment in search for suitable conditions* / A.A. Adler, E.V. Markova, Yu.V. Granovsky. - M.: Nauka, 1971. - 284 p.
15. Yakovlev, S.A. *Influence of electrophysical parameters on electromechanical treatment of machine parts: monograph* / S.A. Yakovlev. - Ulyanovsk: Ulyanovsk Higher School of Civil Aviation, 2014. - 129 p.
16. Polyaniin A.D. *Reference book on linear equations of mathematical physics* / A.D. Polyaniin - M.: Fizmatlit, 2001. - 576 p.
17. Takahasi S. *Interesting statistics. Factor analysis* / S. Takahasi, I. Iroha (translated from Japanese). - M.: Dodeka, DMK Press, 2015. - 256 p.
18. Sveshnikov, A.G. *Theory of functions of a complex variable* / A.G. Sveshnikov, A.N. Tikhonov - M.: Nauka, 2004. - 321 p.