

- nie, 1974. – 135 p. (Rus.)
4. Bernadskyy V.N. Japan defines priorities in welding on the XXI Century / V.N. Bernadskyy // Automatic welding. – 2002. – № 3. – P. 46. (Rus.)
  5. Veselcov V.D. One-sided welding of the steel building construction butting joints / V.D. Veselcov. – L. : Sudostroenie, 1984. – 198 p. (Rus.)
  6. Akulov A.I. Welding pool molten metal transverse magnetic field / A.I. Akulov, A.M. Rybachuk // Welding production. – 1972. – № 2. – P. 3-4. (Rus.)
  7. The welding with electromagnetic mix / V.P. Chernysh, V.D. Kuznetsov, A.N. Bryskman, H.M. Shelonkov. – K. : Tekhnika, 1983. – 127 p. (Rus.)
  8. Ryzhov R.N. The magnetic control welded joints quality / R.N. Ryzhov, V.D. Kuznetsov. – K. : Ekotekhnolohiya, 2010. – 288 p. (Ukr.)
  9. Chernysh V.P. Dependence parameters controlling magnetic impact from energy input butt at the acr welding / V.P. Chernysh, R.N. Ryzhov // Automatic welding. – 1998. – № 5. – P. 49-51. (Rus.)
  10. Rykalin N.N. Calculation of thermal processes at the welding / N.N. Rykalin. – M. : Mashgiz, 1951. – 296 p. (Rus.)
  11. Wealleans J.W. Undercutting and weld bead turbulence in TIG-welding / J.W. Wealleans, P. Adams // Welding and metal Fabrication. – 1969. – June. – P. 225-257.
  12. Ishizaki K. The theory of surface tension in arc welding. The penetrating action of the arc / K. Ishizaki., Y. Kalibe // Esetsugakkaysi. J. Japan Weld Soc. – 1966. – V. 35, № 2. – P. 89-98.
  13. Kovalev I.M. Some features of the welds formation at welding electrode with nonconsumable cathode / I.M. Kovalev // Welding production. – 1972. – № 10. – C. 3-5. (Rus.)
  14. Mandelberh S.L. Effect welding speed the arc pole position / S.L. Mandelberh, B.G. Sidorenko, V.E. Spade // Automatic welding. – 1975. – № 6. – P. 41-44. (Rus.)
  15. Mandelberh S.L. Welding regimes choice, which provides getting butting welds without undercuts / S.L. Mandelberh, B.H. Sydorenko, O.H. Kasatkin // Automatic welding. – 1984. – № 12. – P. 57-60. (Rus.)

Рецензент: С.С. Самогугин  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 15.04.2016

УДК 621.771.01

© Бережная Е.В.<sup>1</sup>, Чепель Ю.А.<sup>2</sup>, Грибкова С.Н.<sup>3</sup>

### ТЕРМОНАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОГО СЛОЯ ПРИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАПЛАВКЕ

*Разработана математическая модель термонапряженного состояния износо-стойкого слоя при электроконтактной наплавке, построенная на основе метода полей линий скольжения, учитывающая двухмерный характер пластического формоизменения в сечениях термодформационного очага и позволяющая спрогнозировать физико-механические свойства и характер формирования наплавляемого слоя. Изучено распределение температур в наплавляемом слое в термодформационном очаге, что позволяет определять изменения механических свойств материала.*

**Ключевые слова:** наплавка, восстановление поверхности, проволока, термонапряженное состояние, нагрев.

<sup>1</sup> канд. техн. наук, докторант, НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев, [elena\\_kassova@mail.ru](mailto:elena_kassova@mail.ru)

<sup>2</sup> ст. преп., Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, [chepel@gmail.com](mailto:chepel@gmail.com)

<sup>3</sup> канд. техн. наук, доцент, Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, [sv\\_nik\\_gr@mail.ru](mailto:sv_nik_gr@mail.ru)

*Бережна О.В., Чепель Ю.А., Грибкова С.М. Термонапружений стан зносостійкого шару при електроконтактному наплавленні. Розроблено математичну модель термонапруженого стану зносостійкого шару при електроконтактному наплавленні, побудовану на основі методу полів ліній ковзання, яка враховує двовірний характер пластичного формозмінення у перетинах термодформаційного очагу та дозволяє спрогнозувати фізико-механічні властивості й характер формування шару. Досліджено розподіл температур в шарі, що наплавляється, в термодформаційному очагу, що дозволяє визначити змінення механічних властивостей матеріалу.*

**Ключові слова:** наплавлення, відновлення поверхні, дріт, напружено-деформований стан, нагрівання.

*O.V. Berezshnaya, Yu.A. Chepel, S.M. Gribkova. Thermo-stressed state of a wear resistant layer during the electrocontact surfacing. The mathematical model of the thermo-stressed state of a wear resistant layer at electrocontact surfacing with wire has been developed. The mathematical model has been made up on the base of the slip lines fields method that takes into account the two-dimensional character of the plastic forming in the sections of the thermodeformation area. The mathematical model makes it possible to predict the physical and mechanical properties of the deposited layer as well as the forming character of the layer. The temperature distribution in the deposited layer in the thermodeformation area has been investigated. The qualitative and quantitative impact of the heating temperature of the deposited layer on the stresses and deformations distribution along the thermodeformation zone has been investigated. This made it possible to determine more accurately the material mechanical properties changes and the levels of the stressed and deformed state during the electrocontact surfacing process. So the real nature of the stresses distribution at the displacement of the material was described, which allows to determine the changes of the stress and strain state levels in the process. The results of the proposed mathematical models allow to choose optimal modes of heating and deforming the wire in order to obtain a high quality joint of the base material and the deposited layer at electrocontact surfacing and to prevent such defects as lack of fusion that result in low adhesion strength of the joint.*

**Keywords:** surfacing, surface reconstruction, wire, stress-strain state, heating.

**Постановка проблеми.** Восстановление работоспособности изношенного оборудования может быть достигнуто двумя путями: заменой сработанных деталей новыми или наращиванием металла на изношенную поверхность до номинальных размеров [1]. Первый путь является экономически менее выгодным, так как затраты на запасные части могут достигать до 80% от исходной стоимости машин [2]. Применение электроконтактной наплавки компактными материалами, при которой на изношенную поверхность наносят слой требуемой толщины, обладающий заданным уровнем рабочих характеристик, позволяет эффективно решать задачу продления нормативного срока службы технологических узлов [3]. В настоящее время методы прогнозирования эффективности наплавочных операций компактными материалами представлены на эмпирическом уровне, на обобщении производственного опыта, а существующие модели недостаточно полно учитывают реальный характер формоизменения наплавляемого износостойкого слоя.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Процесс нанесения износостойкого слоя методом электроконтактной наплавки достаточно широко освещен в литературе. Разработана математическая модель процесса формирования слоя на поверхности цилиндрической детали при электроконтактной наплавке проволокой [4]. Рассмотрен процесс формирования спеченной ленты, армированной металлической сеткой для повышения механических характеристик, с помощью метода электроконтактной роликовой сварки [5]. Определена зависимость прочности сцепления наплавленного слоя с поверхностью изделия от энергосиловых параметров процесса при электроконтактной наплавке с использованием аморфного подслоя [6]. Получены уравнения регрессии для определения прочности сцепления между покрытием и основным металлом, а также указан коэффициент перекрытия сварных точек при формировании покрытия. Однако указанные

математические модели являются недостаточно достоверными вследствие отсутствия учета термического состояния материала в очаге электромеханического воздействия.

**Целью данной работы** является разработка математической модели термонапряженного состояния износостойкого слоя, наплавляемого электроконтактным способом, использование которой позволяет оптимизировать параметры процесса, повысить качество наплавленного металла.

**Изложение основного материала.** Математическое моделирование локальных и интегральных показателей напряженно-деформированного состояния металла при реализации процесса электроконтактной наплавки проволокой заключалось в разбиении всей протяженности зоны пластического формоизменения на элементарные поперечные сечения ( $j$ -ый цикл), являющиеся параллельными плоскости оси вращения ролика-электрода, и последующем численном анализе каждого из них ( $i$ -ый цикл) (рис. 1).

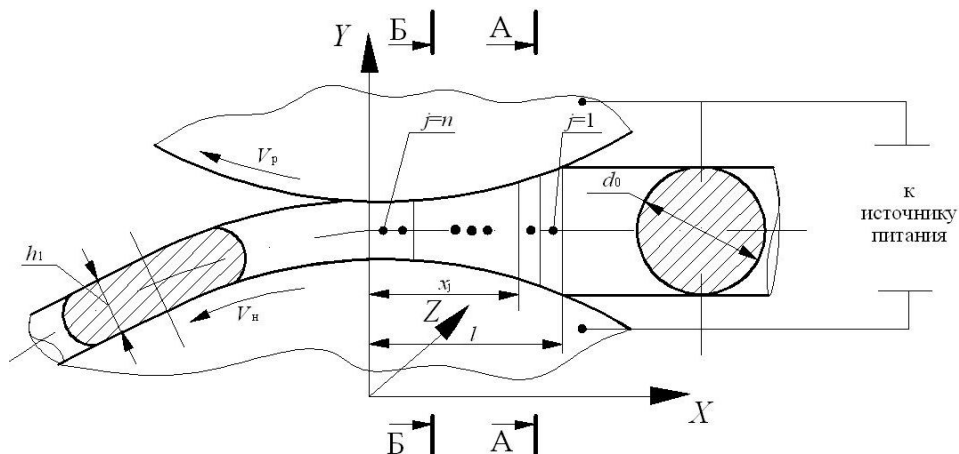


Рис. 1 – Расчетная схема разбиения по длине термдеформационного очага

Учитывая, что изменение свойств при нанесении покрытия происходит поэтапно, то в какой-то отрезок времени их можно считать постоянными, что позволяет представить конкретную схему формирования износостойкого покрытия. Рассмотрим напряженно-деформированное состояние проволоки при входе в термдеформационный очаг. Теоретическое исследование энергосиловых параметров металла в этом случае было проведено, по аналогии с работой [7], на основе численного построения и последующего анализа кинематически возможных полей характеристик в физической плоскости и плоскости годографа скоростей. Предварительные эксперименты [8] показали, что при моделировании приемлемо использование допущения об исключительно поперечном пластическом течении металла. Исходя из известных значений толщины  $h_{xj}$  и ширины контакта  $b_{кxj}$ , геометрические координаты особых точек кинематически возможных полей в физической плоскости  $ZY$  (рис. 2) соответствовали:

$$y_1 = 0,0; z_2 = 0,0; y_2 = y_3 = h_{xj} / 2; z_3 = b_{кxj} \quad (1)$$

Считая первоначально геометрическую координату  $z_{1j}$  условно известной, определим угловые характеристики  $\beta_{xj}$ :

$$\beta_{xj} = \arctg \left[ \frac{(y_{2j} - y_{1j})}{(z_{1j} - z_{2j})} \right], \quad (2)$$

откуда, следуя принципу ортогональности характеристик в физической плоскости  $ZY$  и плоскости годографа скоростей  $V_z V_y$ , геометрические координаты особых точек 4, 5 и 7 могут быть определены как:

$$\begin{aligned} V_{z4j} = V_{y5j} = V_{y7j} = 0,0; V_{y4j} = V_{xHj}; \\ V_{z5j} = -V_{y4j} / \text{tg} \beta_{xj}; V_{z7j} = V_{y4j} / \text{tg} \beta_{xj}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $V_{xHj}$  – вертикальная составляющая скорости перемещения ролика-электрода, задаваемая количественно в виде масштаба построения кинематически возможного поля характеристик в плоскости годографа скоростей, мм/с.

A-A

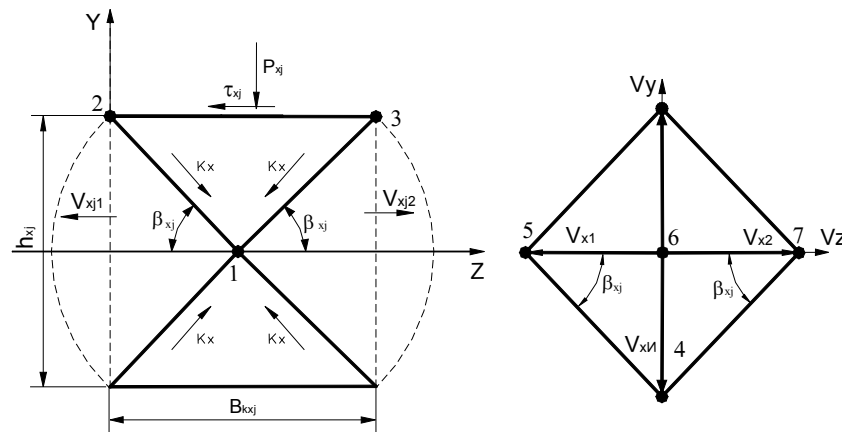


Рис. 2 – Расчетная схема для сечения на входе в термомодеформационный очаг

С учетом (1)-(3), собственно построение кинематически возможных полей характеристик было сведено к определению геометрической координаты  $z_1$ , соответствующей минимуму суммарной мощности сдвига  $N_{j\Sigma}$  для данного поперечного сечения, количественная оценка которой, в свою очередь, может быть представлена в виде:

$$N_{xj\Sigma} = K_{xj} \cdot \sqrt{(z_1 - z_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \cdot \sqrt{(-V_{z5} - V_{z4})^2 + (Vy_4 - Vy_5)^2} + K_{xj} \cdot \sqrt{(z_3 - z_1)^2 + (y_3 - y_1)^2} \cdot \sqrt{(V_{z7} - V_{z4})^2 + (Vy_4 - Vy_7)^2} \quad (4)$$

где  $K_{xj}, K_{xj}$  – текущие по длине очага деформации значения сопротивления сдвигу наплавленного металла на соответствующих границах зоны пластического формоизменения, МПа.

Непосредственное определение геометрической координаты  $z_1$  осуществляли итерационно на основе метода целенаправленного перебора вариантов, аналитическая форма записи которого имеет следующий вид:

$$z_{1(t+1)} = z_{1t} + A_z \text{sign} \left[ N_{j\Sigma(t-1)} - N_{j\Sigma t} \right] \quad (5)$$

где  $t$  – порядковый номер очередного цикла итерационной процедуры;  $A_z$  – шаг изменения геометрической координаты  $z_1$ , мм.

По мере определения минимального значения суммарной мощности сдвига  $N_{xj\Sigma_{\min}}$  и соответствующих ему геометрических координат всех особых точек кинематически возможных полей характеристик производили расчет усилия на ролике-электроде  $P_j$ , действующего в рамках данного  $j$ -го сечения очага деформации. Так, исходя из условия эквивалентности мощностей внутренних и внешних сил, искомое значение усилия  $P_j$  составит:

$$P_j = N_{xj\Sigma_{\min}} / Vy_4 \quad (6)$$

Численное одномерное математическое моделирование термонапряженного состояния металла в термомодеформационном очаге при электроконтактной наплавке, с учетом ранее полученных результатов [9, 10], было проведено на основе численного рекуррентного решения зоны пластического формоизменения слоя, следующего из совместного анализа условия пластичности и дифференциального уравнения равновесия, рассматриваемых для каждого отдельного поперечного сечения (рис. 3).

Учитывая, что  $\tau_{xzj} = P_{xzj} \cdot f_{xcj}$ , рассмотрим условия статического равновесия выделенного элементарного объема наплавленного металла в термомодеформационном очаге на ось  $Z$ :

$$\sigma_{xzj} h_x - (\sigma_{xzj} + d\sigma_{xzj}) h_x + 2\tau_{xzj} dZ = 0. \quad (7)$$

Б-Б

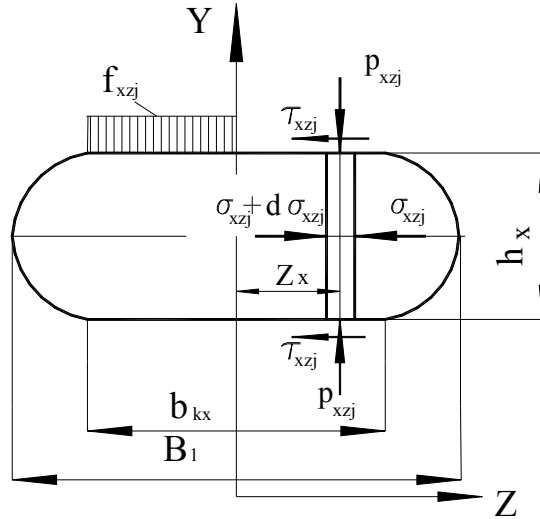


Рис. 3 – Расчетная схема для сечения в термдеформационном очаге

Используя вышеуказанные допущения и инженерный вариант условия пластичности  $p_{xzj} = 2K_{xcj} + \sigma_{xzj}$  и в результате преобразования выражения (7), получим уравнение с разделяющимися переменными:

$$-d\sigma_{xzj} h_x = 2f_{xcj} p_{xzj} dZ, \text{ или } -\frac{d\sigma_{xzj}}{2K_{xcj} + \sigma_{xzj}} = \frac{2f_{xcj}}{h_x} dZ. \quad (8)$$

Проинтегрировав обе части данного уравнения, получим:

$$-\ln(2K_{xcj} + \sigma_{xzj}) = \frac{2f_{xcj}}{h_x} Z_{xi} + C; \quad C = -\ln(2K_{xcj}) - \frac{f_{xcj} b_{kxj}}{h_{xj}}. \quad (9)$$

Преобразовав уравнение (9), найдем значение нормальных контактных напряжений в выделенном элементе:

$$p_{xzj} = 2K_{xcj} \cdot \text{EXP} \left[ \frac{f_{xcj}}{h_{xj}} (b_{kxj} - 2Z_{xi}) \right], \quad (10)$$

где  $2K_{xcj}$  – текущее значение удвоенного коэффициента сопротивления чистому сдвигу, определяемое как  $2K_{xcj} = 1,15 \sigma_{sx}$ , МПа;  $\sigma_{sx}$  – текущее значение сопротивления деформации металла, МПа.

$\sigma_{sx}$  определяли в зависимости от степени  $\varepsilon$ , скорости  $U$  и температуры  $T$  деформации [11]:

$$\sigma_{sx} = \sigma_{s0} U^{a_1} (20 / 3\varepsilon)^{a_2} (T / 1000)^{a_3}, \quad (11)$$

где  $\sigma_{s0}$  – опорное значение сопротивления деформации данного металла или сплава, определяемое по результатам пластометрических испытаний, МПа;  $a_1, a_2, a_3$  – постоянные для каждого отдельного материала степенные показатели, характеризующие количественно интенсивность влияния соответствующих термомеханических параметров процесса электроконтактной наплавки.

Сопротивление деформации определяли с использованием полиномиального описания кривой упрочнения:

$$\sigma_{sx} = a_0 + a_1 \varepsilon_{sk} + a_2 \varepsilon_{sk}^2 + a_3 \varepsilon_{sk}^3, \quad (12)$$

где  $a_0, a_1, a_2, a_3$  – значения коэффициентов регрессии аналитического описания интенсивности деформационного упрочнения на начальных стадиях формирования наплавленного слоя.

Учитывая данные [12-15], распределение температуры в формируемом слое в термодиформационном очаге в любой момент времени  $\tau > 0$  определяли для случая равномерного теплоотвода в восстанавливаемую деталь и ролик-электрод, решая согласно [16] дифференциальное уравнение теплопроводности Лапласа:

$$\frac{\partial T_n(y, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T_n(y, \tau)}{\partial y^2} \quad (\tau > 0, r < y < r); \quad (13)$$

при начальных и граничных условиях:

$$T_n(y, 0) = T_o; \quad \frac{\partial T_n(0, \tau)}{\partial y} = 0; \quad -\lambda \frac{\partial T_n(r, \tau)}{\partial y} + \alpha [T(\tau) - T_n(y, \tau)] = 0, \quad (14)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град);  $\alpha$  – коэффициент теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·град);  $r = h_x/2$ ;  $T_o$  – температура окружающей среды.

Учитывая, что  $T(\tau)$  – линейная функция времени, а формируемый слой нагревается проходящим током с некоторой скоростью  $g$ , то (14) можно записать в виде:

$$-\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial y} + \frac{\alpha}{\lambda} [T_o + g\tau - T_n(r, \tau)] = 0. \quad (15)$$

Задача (13)-(15) решена операционным методом с использованием преобразования Лапласа относительно переменной  $\tau$  к дифференциальному уравнению (13) с учетом начального условия (15):

$$T_n(y, \tau) - T_o = g\tau - \frac{g}{2a} \left[ r^2 \left( 1 + \frac{2}{Bi} \right) - y^2 \right] + \frac{gr^2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n^2} \cos \left( \mu_n \frac{y}{r} \right) \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (16)$$

где  $Fo = a\tau/r^2$  – критерий Фурье;  $A_n$  – начальные тепловые амплитуды:

$$A_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n}.$$

Выражение (16) позволяет рассчитать температуру  $T_n(y, \tau)$  в любой точке наплавленного слоя в термодиформационном очаге. Интенсивность повышения температуры в термодиформационном очаге характеризует безразмерная скорость нагрева – критерий Предводителя:

$$Pd = \left( \frac{dT}{dFo} \right)_{\max}. \quad (17)$$

Поскольку  $T(\tau) = T_o + g\tau$ , то:

$$Pd = \frac{gr^2}{a}. \quad (18)$$

Тогда решение задачи нагрева формируемого слоя можно представить в виде:

$$\frac{\Delta T_n}{Pd} = \frac{T_n(y, \tau) - T_o}{Pd} = Fo - 0,5 \left( 1 + \frac{2}{Bi} - \frac{y^2}{r^2} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n^2} \cos \left( \mu_n \frac{y}{r} \right) \exp(-\mu_n^2 Fo). \quad (19)$$

Таким образом, относительная температура в любой слоя в термодиформационном очаге является функцией безразмерных величин  $Fo, Bi, y/r$ :

$$\frac{\Delta T_n}{Pd} = Fo - 0,5 \left( 1 + \frac{2}{Bi} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n^2} \exp(-\mu_n^2 Fo). \quad (20)$$

Для определения интегрального значения  $p_{xc}$  при электроконтактной наплавке по ширине сечения формируемого слоя проинтегрируем выражение (10):

$$p_{xc} = 2 \int_0^{b_{kxj}/2} p_{xzi} dZ. \quad (21)$$

Решением данного выражения является:

$$P_{xcj} = 2K_{xcj} \frac{h_{xj}}{f_{xcj}} \left[ \text{EXP} \left( \frac{b_{kxj} f_{xcj}}{h_{xj}} \right) - 1 \right]. \quad (22)$$

Значения интегрального усилия на ролике-электроде по ширине сечения в зоне пластического формоизменения определяли по формуле (21) для каждого элементарного объема. Непосредственно усилие на ролике-электроде определено как:

$$P = \sum_{j=1}^n P_{xcj} \cdot \frac{l_{cn}}{n} + \frac{P_{xcj}}{2b_{kxj}} \Big|_{j=n} l_{yn} + P^*, \quad (23)$$

где  $l_{cn}$  – длина дуги контакта с учетом упругого сплющивания, мм;  $n$  – число разбиений по длине дуги контакта;  $l_{yn} = \sqrt{R \cdot \delta h_1}$  – протяженность зоны упругого восстановления, мм;  $R = l_{cn}^2 / (d_0 - h_1)$  – упругодеформированный радиус ролика-электроды, мм;  $\delta h_1 = P_{xcj} / b_{kxj} \Big|_{j=n} h_1 (1 - \nu_n^2) / E_n$  – величина упругой деформации формируемого слоя в сечении на выходе из зоны пластического формоизменения, мм;  $\nu_n$  – коэффициент Пуассона;  $E_n$  – модуль упругости материала проволоки, МПа.

Момент электроконтактной наплавки:

$$M = 2 \sum_{j=1}^n P_{xcj} \cdot \frac{l_{cn}}{n} \cdot X_j - \frac{P_{xcj}}{2b_{kxj}} \Big|_{j=n} \frac{l_{yn}}{3} + M^*, \quad (24)$$

где  $P^*$  и  $M^*$  – значения силы и момента, определяемых для сечений  $b_{kx} / h_x \leq 2,0$ ;  $X_j$  – координата  $j$ -го поперечного сечения.

Представленные зависимости составили полный алгоритм по математическому моделированию напряженно-деформированного состояния нанесенного слоя при электроконтактной наплавке проволокой. Разработаны программные средства в среде Delphi для компьютерного моделирования. В качестве примера реализации данной модели представлены расчетные распределения температуры проволоки и значения удвоенного сопротивления сдвигу деформации материала (рис. 4) и расчетные распределения нормальных и нормальных контактных напряжений слоя по ширине и длине термомодеформационного очага (рис. 5).

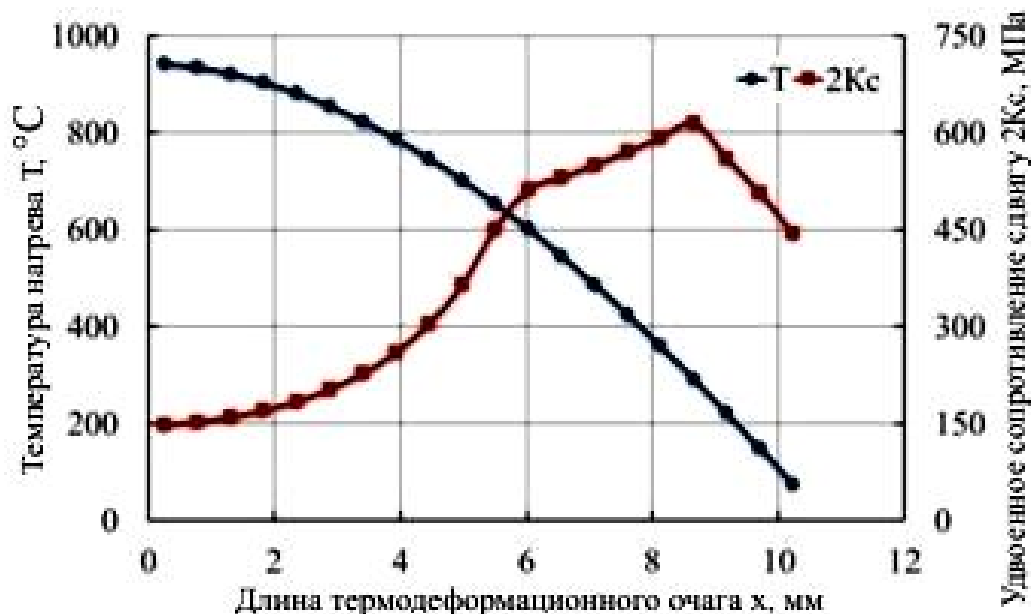


Рис. 4. – Распределение температуры нагрева проволоки  $T$  и удвоенного коэффициента сопротивления деформации  $2K_c$  по длине термомодеформационного очага

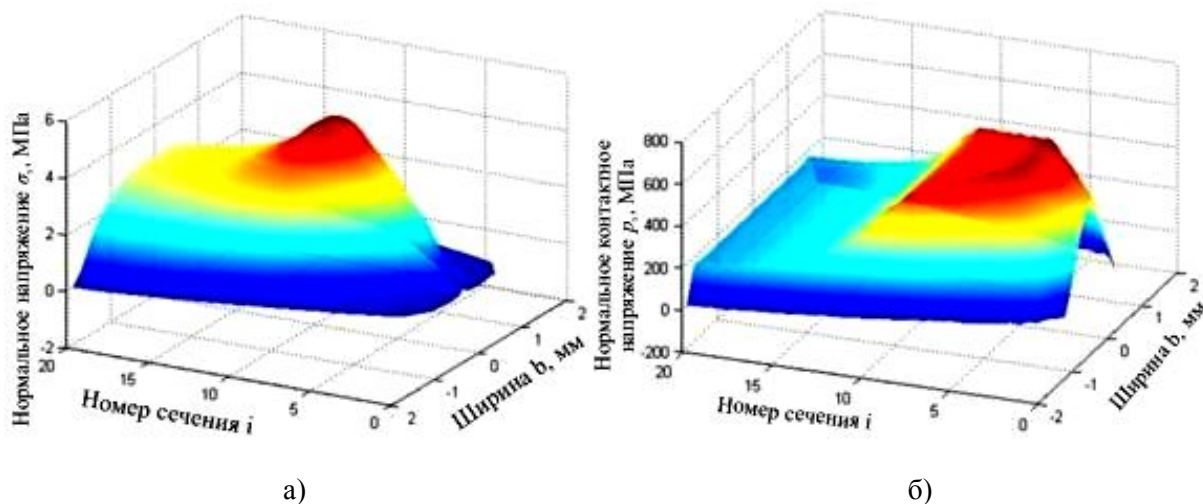


Рис. 5. – Распределение нормальных  $\sigma_x$  (а) и нормальных контактных  $p_x$  (б) напряжений по длине и ширине термдеформационного очага при электроконтактной наплавке

Из анализа графических зависимостей видно, что температура проволоки повышается плавно, приводя к снижению сопротивления деформации и перераспределению эпюр напряжений, при этом их максимум наблюдается в сечениях на входе в термдеформационный очаг. Влияние на форму эпюры оказывает и увеличение контактной поверхности между проволокой и роликом-электродом. Предложенный подход к изучению особенностей формирования покрытия раскрывает общие закономерности процесса, которые позволяют предвидеть результаты взаимодействия и прогнозировать качество получаемого износостойкого слоя.

### Выводы

1. Разработана математическая модель термонапряженного состояния износостойкого слоя при электроконтактной наплавке проволокой, позволяющая прогнозировать закономерности формирования соединения в твердой фазе и повысить эффективность восстановления изношенных деталей.

2. Установлено качественное и количественное влияние температуры нагрева наносимого материала на распределение напряжений и деформаций по длине термдеформационного очага во время электроконтактной наплавки. При этом наблюдается перераспределение максимальных напряжений на входе в термдеформационный очаг в зонах наименьшей температуры.

### Список использованных источников:

1. Хромченко Ф.А. Сварочные технологии при ремонтных работах / Ф.А. Хромченко. – М. : Интермет Инжиниринг, 2005. – 368 с.
2. Черноиванов В.И. Организация и технология восстановления деталей машин / В.И. Черноиванов, В.П. Лялякин. – М. : ГОСНИТИ, 2003. – 488 с.
3. Нафиков М.З. Рекомендации по разработке технологических процессов восстановления изношенных деталей типа «вал» электроконтактной наплавкой стальных проволок / М.З. Нафиков. – Уфа : ООО «Штайн», 2009. – 143 с.
4. Bulychev V.V. Electrical resistance deposition with a wire and deceleration of the roller electrode/ V.V. Bulychev, V.V. Zezyulya // Welding International. – Vol. 25. – № 5. – 2011. – P. 374-377.
5. Saifullin R.N. A method of production of sintered strips by electric resistance rolling / R.N. Saifullin, V.S. Natalenko // Welding International. – Vol. 25. – № 3. – 2011. – P. 205-208.
6. Burak P.I. Optimization of the process of electric resistance welding of metallic strips through an amorphous solder / P.I. Burak, A.V. Serov, R.A. Latypov // Welding International. – Vol. 26. – № 10. – 2012. – P. 814-818.
7. Бережная Е.В. Математическое моделирование напряжений и деформаций при электроконтактной наплавке проволок цилиндрических деталей / Е.В. Бережная, С.Н. Грибкова // Ре-



- сурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні : Зб. наук. праць. – Луганськ : вид-во СНУ ім. В. Даля, 2013. – № 1(14). – С. 206-213.
8. Development of welding equipment for the production of layered tapes / O. Berezshnaya, Ju. Chepel, N. Tsyvinda, A. Pikilnyak // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 12. – P. 332-338.
  9. Бережная Е.В. Математическое моделирование формообразования слоя при электроконтактной наплавке проволокой деталей типа вал / Е.В. Бережная, Э.П. Грибков // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2014. – № 6. – Ч. 2. – С. 93-96.
  10. Бережная Е.В. Математическое моделирование энергосиловых параметров процесса восстановления деталей землеройных машин методом электроконтактной наплавки / Е.В. Бережная, Ю.А. Чепель, Н.И. Цывинда // Гірничий вісник : наук.-техн. зб. – Кривий Ріг, 2014. – Вип. 97. – С. 201-205.
  11. Андреюк Л.В. Аналитическая зависимость сопротивления деформации металла от температуры, скорости и степени деформации / Л.В. Андреюк, Г.Г. Тюленев // Сталь. – 1972. – № 6. – С. 825-828.
  12. Бережная Е.В. Тепловое состояние режущего инструмента в зоне восстановительной электроконтактной наплавки / Е.В. Бережная // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : Зб. наук. пр. / ДДМА. – Краматорськ, 2014. – № 34. – С. 197-200.
  13. Бережная Е.В. К расчету температурного поля при электроконтактной наплавке многослойных покрытий / Е.В. Бережная // Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве : Материалы IV международной научно-технической конференции / ДГМА. – Краматорск, 2013. – С. 31.
  14. Бережная Е.В. Методика расчета теплового состояния порошкового слоя при ЭКН деталей литейного оборудования / Е.В. Бережная // Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве : Материалы IV международной научно-технической конференции / ДГМА. – Краматорск, 2013. – С. 32-33.
  15. Бережная Е.В. Тепловые процессы при консолидации порошковой среды электроконтактным способом / Е.В. Бережная // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку : XIII міжнародна науково-технічна конференція / ДДМА. – Краматорськ, 2015. – С. 14.
  16. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 600 с.

#### Bibliography:

1. Hromchenko F.A. Welding technologies in repair works / F.A. Hromchenko. – М. : Intermet Engineering, 2005. – 368 p. (Rus.)
2. Chernoiivanov V.I. Organization and technology of machine parts repairing / V.I. Chernoiivanov, V.P. Lalakin. – М. : GOSNITI, 2003. – 488 p. (Rus.)
3. Nafikov M.Z. References for development of technological recovery processes of worn machine parts of shaft type with electrocontact deposition of steel wires / M.Z. Nafikov. – Ufa : ООО «Shtain», 2009. – 143 p. (Rus.)
4. Bulychev V.V. Electrical resistance deposition with a wire and deceleration of the roller electrode / V.V. Bulychev, V.V. Zezyulya // Welding International. – Vol. 25. – № 5. – 2011. – P. 374-377.
5. Saifullin R.N. A method of production of sintered strips by electric resistance rolling / R.N. Saifullin, V.S. Natalenko // Welding International. – Vol. 25. – № 3. – 2011. – P. 205-208.
6. Burak P.I. Optimization of the process of electric resistance welding of metallic strips through an amorphous solder / P.I. Burak, A.V. Serov, R.A. Latypov // Welding International. – Vol. 26. – № 10. – 2012. – P. 814-818.
7. Berezshnaya E.V. Mathematical modeling of stresses and deformation under electrocontact surfacing of cylindrical details with wire / E.V. Berezshnaya, S.N. Gribkova // Resource saving technologies of the producing and pressure treatment of the materials in machinebuilding. – Lugansk : ENU named V. Dal, 2013. – № 1(14). – P. 206-213. (Ukr.)
8. Development of welding equipment for the production of layered tapes / O. Berezshnaya, Ju. Chepel, N. Tsyvinda, A. Pikilnyak // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 12. – P. 332-338.
9. Berezshnaya E.V. Mathematical modeling of layer forming under electrocontact surfacing with the wire of the shaft details / E.V. Berezshnaya, E.P. Gribkov // Herald of the East-European na-

- tional university named V. Dal. – 2014. – № 6. – Vol. 2. – P. 93-96. (Rus.)
10. Berezshnaya E.V. Mathematical modeling of the energy-power parameters of the recovery process of the earthmoving machine parts with electrocontact surfacing method / E.V. Berezshnaya, Yu.A. Chepel, N.I. Civinda // Mining herald : Scientific and technical collection. – Kryvyi Rih, 2014. – Vol. 97. – P. 201-205. (Rus.)
  11. Andreyuk L.V. Analytical dependence of the deformation resistance of the metal on the temperature, velocity and the deformation degree / L.V. Andreyuk, G.G. Tulenev // Steel. – 1972. – № 6. – P. 825-828. (Rus.)
  12. Berezshnaya E.V. The thermal state of the cutting instrument in the recovery electrocontact surfacing zone / E.V. Berezshnaya // Reliability of the instrument and optimization of the technological systems : Collection of scientific works / DSEA. – Kramatorsk, 2014. – № 34. – P. 197-200. (Rus.)
  13. Berezshnaya E.V. Calculation of the temperature field under electrocontact surfacing of the multilayer coatings / E.V. Berezshnaya // Advanced technologies, materials and equipment in the casting production / DSEA. – Kramatorsk, 2013. – P. 31. (Rus.)
  14. Berezshnaya E.V. Calculation method of the thermal state of the powder layer under electrocontact surfacing of the casting equipment parts / E.V. Berezshnaya // Advanced technologies, materials and equipment in the casting production / DSEA. – Kramatorsk, 2013. – P. 32-33. (Rus.)
  15. Berezshnaya E.V. Thermal processes under powder material consolidation with the electrocontact method / E.V. Berezshnaya // Heavy engineering. Problems and development prospects / DSEA. – Kramatorsk, 2015. – P. 14. (Rus.)
  16. Likov A.V. Heat conductivity theory / A.V. Likov. – M. : Vysshaya shkola, 1967. – 600 p. (Rus.)

Рецензент: С.В. Гулаков  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 28.04.2016

УДК 621.791

© Зусин В.Я.\*

### ОСОБЕННОСТИ ДЕГАЗАЦИИ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ ПРИ НАПЛАВКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ

*Выполнен анализ известных методик наплавки алюминиевых сплавов, определены основные проблемы при их наплавке. Показано, что при наплавке алюминиевых сплавов наиболее вероятны дефекты, связанные с образованием пор в наплавленном металле. Происходит зарождение микрополостей в сварочной ванне, что приводит к образованию дефектов. На основе проведенных исследований разработана технология наплавки алюминиевых сплавов, позволяющая управлять процессом порообразования при наплавке.*

**Ключевые слова:** алюминий, сварка, сварочная ванна, наплавка, поры, дегазация, водород.

**Зусин В.Я.** *Особливості дегазації зварювальної ванни при наплавленні алюмінієвих сплавів порошковим дротом. Виконано аналіз відомих методик наплавлення алюмінієвих сплавів, визначено основні проблеми при їх наплавленні. Показано, що при наплавленні алюмінієвих сплавів найбільш вірогідні дефекти, пов'язані з утворенням пір в наплавленому металі. Відбувається зародження мікропорожнин у зварювальної ванні, що призводить до утворення дефектів. На основі проведених досліджень розроблена технологія наплавлення алюмінієвих сплавів, що дозволяє управляти процесом пороутворення при наплавленні.*

\* д-р техн. наук, професор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь