

Бережная Е.В., Грибкова С.Н.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ  
ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАПЛАВКЕ ПРОВОЛОК  
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ**

Berezhnaya E.V., Gribkova S.N.

**MATHEMATICAL MODELING OF PRESSURE AND  
DEFORMATIONS AT ELECTROCONTACT SURFACING WIRES  
CYLINDRICAL DETAILS**

*Разработана математическая модель процесса формоизменения круглой проволоки при электроконтактной наплавке поверхностей. Основным допущением является наличие только поперечного течения металла при деформации. Модель построена на разбиении очага деформации на множество элементарных объемов и последующем использовании метода полей линий скольжения в случае относительно толстых сечений или метода совместного решения условия пластичности и равновесия в случае относительно тонких сечений. В модели также учтены геометрическая асимметрия процесса и деформация металла в горячем состоянии.*

**Ключевые слова:** прокатка, плющение, лента плющенная, модель математическая, наплавка электроконтактная.

**Введение**

Экономический ущерб от износа элементов машин, механизмов, инструмента не ограничивается стоимостью безвозвратных потерь металла, а носит «лавинный» характер [1]. Сравнительный анализ технико-экономических характеристик альтернативных вариантов регенерации изнашивающихся рабочих поверхностей показывает, что в современных условиях дефицита материальных и энергетических ресурсов восстановительная электроконтактная наплавка круглыми проволоками является высокоэффективным ресурсосберегающим технологическим приемом. Нанесение покрытий из компактных материалов в виде проволок выгодно отличается от электродуговых технологий отсутствием выгорания легирующих элементов, малым нагревом деталей, экологичностью процесса, закалкой покрытия непосредственно в процессе формирования покрытия [2, 3]. Однако на эксплуатационные

свойства покрытий из проволок существенное влияние оказывают дефекты в зоне соединения, структурные превращения в зоне термического влияния, остаточные напряжения и ряд других факторов [4]. Во многом это связано с тем, что режимы электроконтактной наплавки для каждого конкретного случая выбираются чисто эмпирически.

### Цель

Целью настоящей работы является разработка математической модели локальных и интегральных характеристик напряженно-деформированного состояния металла при электроконтактной наплавке тел вращения металлическими круглыми лентами.

### Математическая модель

Основная технологическая сущность рассматриваемого процесса заключается в следующем (рис. 1): на поверхность восстанавливаемой осесимметричной вращающейся детали 1 помещают проволоку 2, через нее пропускают импульсы электрического тока от источника питания, доводят присадку до пластического состояния и деформируют ее при помощи ролика-электрода 3 наплавочной электроконтактной машины. Вследствие совместной пластической деформации приконтактного объема восстанавливаемой детали 1 и присадочного материала 2 образуется твердофазное соединение покрытия 4 с основным металлом.

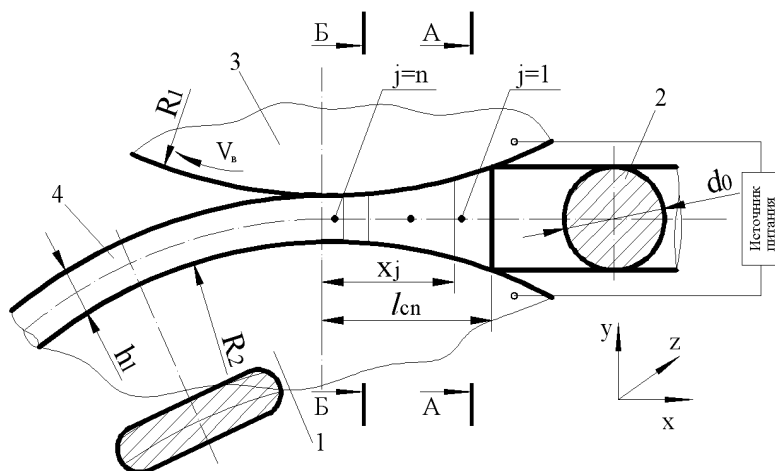


Рис. 1. Расчетная схема процесса наплавки цилиндрической детали (1 – наплавляемая деталь; 2 – круглая проволока; 3 – ролик-электрод; 4 – наплавленная поверхность)

Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при электроконтактной наплавке проволоки заключалось в разбиении всей протяженности зоны пластического формоизменения на элементарные поперечные сечения ( $j$ -ый цикл) и последующем численном анализе каждого из них ( $i$ -ый цикл).

При этом были рассмотрены два случая: наличие относительно толстых ( $b_{kx_j} / h_{xj} < 2,0$ ) и относительно тонких ( $b_{kx_j} / h_{xj} > 2,0$ ) поперечных сечений (рис. 2).

Теоретическое исследование энергосиловых параметров металла при  $b_{kx_j} / h_{xj} < 2,0$  было проведено на основе численного построения и последующего анализа кинематически возможных полей характеристик в физической плоскости и плоскости годографа скоростей. При этом в качестве основного было использовано допущение об исключительно поперечном пластическом течении металла.

Исходя из известных значений толщины  $h_{xj}$  и ширины  $b_{kx_j}$ , геометрические координаты особых точек кинематически возможных полей в физической плоскости  $ZY$  (рис. 1):

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

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 (см. рис. 2, а) могут быть определены как:

$$\begin{aligned} V_{z4j} = V_{y5j} = V_{y7j} = 0,0; V_{y4j} = V_{x_{\dot{E}j}}; \\ V_{z5j} = -V_{y4j} / \operatorname{tg} \beta_{xj}; V_{z7j} = V_{y4j} / \operatorname{tg} \beta_{xj}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $V_{x_{\dot{E}j}}$  – вертикальная составляющая скорости перемещения ролика-электрода.

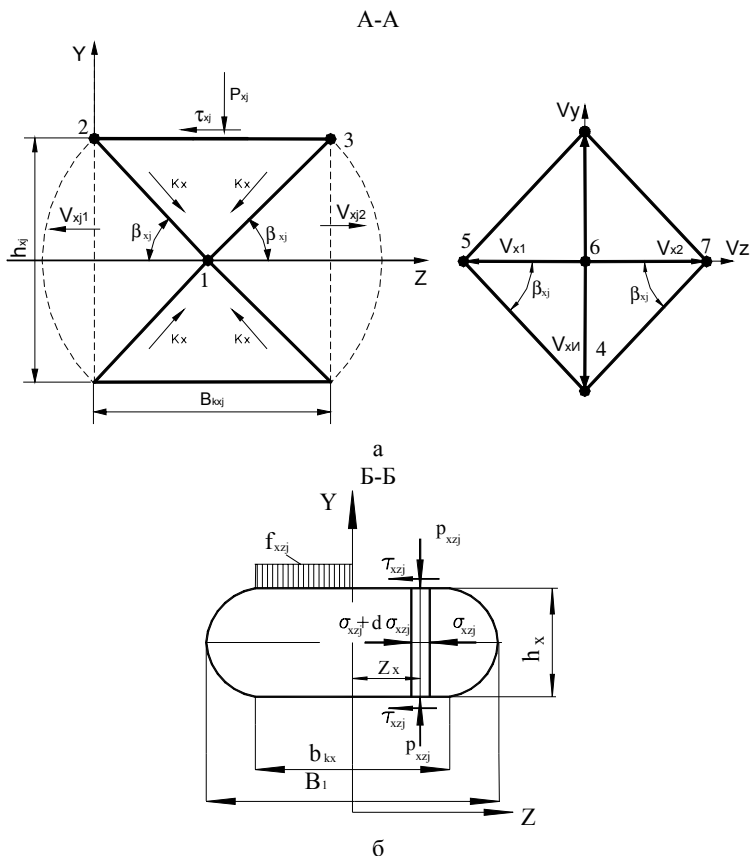


Рис. 2. Расчетные схемы для расчета относительно толстых сечений ( $b_{kx_j} / h_{xj} < 2,0$ ) (а) и относительно тонких сечений ( $b_{kx_j} / h_{xj} > 2,0$ ) (б) наплавленного шва

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

$$N_{xj\Sigma} = K_{xj} \sqrt{(z_1 - z_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \sqrt{(-Vz_5 - Vz_4)^2 + (Vy_4 - Vy_5)^2} + \\ + K_{xj} \sqrt{(z_3 - z_1)^2 + (y_3 - y_1)^2} \sqrt{(Vz_7 - Vz_4)^2 + (Vy_4 - Vy_7)^2}, \quad (4)$$

где  $K_{xj}, K_{xj}$  – текущие по длине очага деформации значения сопротивления сдвигу деформируемого металла на соответствующих границах зоны пластического формоизменения (рис. 2, а).

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

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

где  $t$  – порядковый номер цикла итерационной процедуры;

$A_z$  – шаг изменения геометрической координаты  $z_l$ .

По мере определения суммарной мощности сдвига производили расчет значения силы плющения проволоки  $P_j$ , действующей в рамках данного  $j$ -го сечения очага деформации. Из условия эквивалентности мощностей внутренних и внешних сил, значение силы  $P_j$  составляет:

$$P_j = N_{xj\Sigma_{min}} / V_{y4}. \quad (6)$$

Численное одномерное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации процесса плющения проволоки при  $b_{kxj} / h_{Xj} > 2,0$  было получено на основе численного рекуррентного решения зоны пластического формоизменения металла, вытекающего из совместного анализа условия пластичности и дифференциального уравнения равновесия, рассматриваемых для каждого отдельного поперечного сечения (рис. 2, б).

При этом интегральное значение силы наплавки-прокатки по ширине сечения будет равно:

$$P_{xcj} = 2K_{xcj} \frac{h_{xj}}{f_{xcj}} \left[ \text{EXP} \left( \frac{b_{kxj} f_{xcj}}{h_{xj}} \right) - 1 \right], \quad (9)$$

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

$\sigma_{sx}$  – текущее значение сопротивления деформации металла;

$f_{xcj}$  – коэффициент внешнего трения.

Для аналитического описания сопротивления деформации при горячей прокатке наибольшее распространение получила методика Л. В. Андreyока [5], определяющая величину  $\sigma_{sx}$  в зависимости от степени  $\epsilon$ , скорости  $U$  и температуры  $t$  деформации как:

$$\sigma_{sx} = \sigma_{s0} U^{a_1} (20 / 3\epsilon)^{a_2} (t / 1000)^{a_3}, \quad (10)$$

где  $\sigma_{s0}$  – опорное значение сопротивления деформации сплава;

$a_1, a_2, a_3$  – степенные показатели.

Непосредственно сила плющения может быть определена как:

$$P = \sum_{j=1}^n P_{xcj} \frac{l_{\tilde{m}i}}{n} + P^*, \quad (11)$$

где  $l_{cп}$  – длина дуги контакта;

$n$  – число разбиений по длине дуги контакта;

$P^*$  – значение силы, определяемой для сечений  $b_{kx} / h_x \leq 2,0$ ;

$X_j$  – координата  $j$ -го поперечного сечения.

В случае, когда наплавка проволокой производится на определенную поверхность  $R_1$ , радиус кривизны которой не соответствует радиусу ролика-электрода  $R_2$ , при электроконтактной наплавке имеет место геометрическая асимметрия процесса, учет которой производится при определении длины дуги контакта:

$$l_{\tilde{m}i} = \sqrt{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} (d_0 - h_1).$$

## Результаты исследования

Степень уточнения по энергосиловым параметрам может достигать 15-20% и более, что подтверждает целесообразность реализации рассмотренного подхода. Возможным является также прогнозирование

и деформационного состояния, т.е. динамики изменения геометрических параметров поперечных сечений во времени.

### **Выводы**

Разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния процесса пластической деформации проволоки, позволяющая прогнозировать и оптимизировать геометрические параметры электродного материала, определяющих эффективность наплавочных операций.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Патон Б. Е. Проблемы сварки на рубеже веков / Б. Е. Патон // Автоматическая сварка. – 1999. – № 1. – С. 4-15.
2. Дубровский В. А. Восстановление деталей сельхозмашин двухпроволочной электроконтактной наплавкой / В. А. Дубровский // Техника в сельском хозяйстве. – 1996. – № 5. – С. 38-40.
3. Логинов Г. П. Электроконтактная наплавка проволокой – эффективный способ восстановления изношенных деталей машин / Г. П. Логинов, В. А. Дубровский // Автоматизация и современные технологии. – 1998. – № 7. – С. 10-12.
4. Бережная Е. В. Восстановление деталей станочного оборудования электроконтактной наплавкой порошковой проволокой / Е. В. Бережная // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб наук. пр. – Краматорськ, 2011. – №29. – С. 175-179.
5. Андреюк Л. В. Определение давлений металла на валки при горячей прокатке сталей и сплавов широкого сортамента / Л. В. Андреюк // Теоретические проблемы прокатного производства. Теория прокатки : материалы всесоюз. науч.-техн. конф. – М. : Металлургия, 1975. – С. 383-385.

### **REFERENCES**

1. Paton B.E. Problemy svarki na rubezhe vekov / B. E. Paton // Avtomaticheskaja svarka. – 1999. – No. 1. – pp. 4-15.
2. Dubrovskij V.A. Vosstanovlenie detalej sel'hozmashin duhprovolochnoj jelektrokontaktnoj naplavkoj / V.A. Dubrovskij // Tehnika v sel'skom hozjajstve. – 1996. – No. 5. – pp. 38-40.
3. Loginov G.P. Jelektrokontaktnaja naplavka provolokoj – jeffektivnyj sposob vosstanovlenija iznoshennyh detalej mashin / G.P. Loginov, V.A. Dubrovskij // Avtomatizacija i sovremennye tehnologii. – 1998. – No. 7. – pp. 10-12.
4. Berezhnaja E. V. Vosstanovlenie detalej stanocznego oborudovanija jelektrokontaktnoj naplavkoj poroshkovej provolokoj / E. V. Berezhnaja // Nadijnist' instrumentu ta optimizacija tehnologichnih sistem: zb. nauk. pr. – Kramatorsk, 2011. – No. 29. – p. 175-179.
5. Andrejuk L. V. Opredelenie davlenij metalla na valki pri gorjachej prokatke stalej i splavov shirokogo sortamenta / L. V. Andrejuk // Teoreticheskie problemy

prokatnogo proizvodstva. Teorija prokatki : materialy vsesojuzn. nauch. - tehn. konf. – Moscow. : Metallurgija, 1975. – pp. 383-385.

***Бережна О.В., Грибкова С.М. Математичне моделювання напруг і деформацій при електроконтактному напавленні дротів циліндричних деталей.***

*Розроблено математичну модель процесу формозміни круглого дроту при електроконтактному напавленні поверхонь. Основним допущенням є наявність суто поперечного плину металу. Модель побудована на розбитті осередку деформації на безліч обсягів і використанні методу полів ліній ковзання у разі відносно товстих перетинів або інженерного методу у разі відносно тонких перетинів. Модель враховує асиметрію процесу і гарячу деформацію металу та дозволяє прогнозувати і оптимізувати геометричні параметри електродного матеріалу, що визначають ефективність напавки.*

***Ключові слова:*** прокатка, плющення, стрічка плющена, модель математична, напавлення електроконтактне.

***Berezhnaya E.V., Gribkova S.N. Mathematical modeling of pressure and deformations at electrocontact surfacing wires cylindrical details.***

*Purpose of this work is development the mathematical models of local and integral characteristics of the stress-strain metal state  $\epsilon$  in the electric-surfacing of bodies of revolution round metal tapes.*

*The model is based on the decomposition of the deformation on the set of elementary volumes and the subsequent use of the method of slip lines fields in the case of relatively thick sections or method of joint solutions plasticity condition and equilibrium in the case of relatively thin cross-sections. The model takes into account the geometric asymmetry of the process and the hot deformation of the metal.*

*The degree of refinement on the power parameters may reach 15-20% or more, which confirms the feasibility of the implementation of this approach. It is also possible prediction and strain state, i.e. dynamics geometry cross-section in time.*

*A mathematical model of the stress-strain state of plastic deformation wire, which takes into account the asymmetry of the process and a hot deformation of the metal and allows to predict and optimize the geometric parameters of the electrode material.*

***Keywords:*** rolling, flattening, flatted stripe, mathematical model, electrocontact deposition.

Бережная Е. В. – канд. техн. наук, ст. преп. Донбасской государственной машиностроительной академии, г. Краматорск, Украина,  
e-mail: sp@dgma.donetsk.ua.

Грибкова С. Н. – канд. техн. наук, доц., доцент Донбасской государственной машиностроительной академии, г. Краматорск, Украина,  
e-mail: amm@dgma.donetsk.ua.