

УДК 621.762.4.047

Сатонин А. В.
Кассов В. Д.
Бережная Е. В.
Данилюк В. А.
Махмудов К. Д.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАПЛАВКЕ ЛЕНТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОЦЕССОВ ПРОКАТКИ

Проблема износа механического оборудования свойственна любым инфраструктурным отраслям промышленного производства, в том числе и отраслям непосредственно связанным с обработкой давлением. Учитывая низкие темпы модернизации, актуальным является внедрение технологий реновации, в частности, нанесение металлопокрытий методом электроконтактной наплавки, обеспечивающей поверхностную модификацию наиболее критичных узлов и механизмов [1]. Нанесение покрытий из компактных материалов 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 лент существенное влияние оказывают дефекты в зоне соединения, структурные превращения в зоне термического влияния, остаточные напряжения и ряд других факторов [4–7]. Во многом это связано с тем, что режимы электроконтактной наплавки для каждого конкретного случая выбираются чисто эмпирически, поскольку результаты теоретические исследования, описывающие технологические особенности формирования наплавленного слоя в настоящее время отсутствуют.

Целью данного исследования является разработка математической модели локальных и интегральных характеристик напряженно-деформированного состояния металла при электроконтактной наплавке осесимметричных тел вращения металлическими лентами.

Основная технологическая сущность рассматриваемого процесса заключается в следующем (рис. 1): на поверхность восстанавливаемой осесимметричной вращающейся детали 1 помещают ленту 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 с основным металлом.

В основу математического моделирования процесса электроконтактной наплавки было положено численное рекуррентное решение конечно-разностной формы условий статического равновесия выделенных i -х элементарных объемов, полученных путем разбиения всей зоны пластического формоизменения $a_1c_1c_2a_2$ протяженностью L_{nl} на их n -е конечное множество. Используемая в этом случае расчетная схема очага деформации предполагает наличие также зоны упругого восстановления $c_1d_1c_2d_2$ протяженностью L_{yn} , при этом границы указанных зон являются параллельными плоскости проходящей через оси вращения наплавляемой детали 1 и ролика-электрода 3 (см. рис. 1). Кроме того, исходя из специфики условий реализации рассматриваемой технологической схемы, следует указать на то, что окружные скорости вращения наплавляемой детали 1 и металлической ленты 2 в сечении на выходе из зоны пластического формоизменения равны, то есть $V_{\theta l} = V_{\theta 2}$, вследствие чего на контактной поверхности наплавляемой детали присутствует только зона отставания протяженностью $L_{oml} = L_{nl}$, в которой касательные контактные напряжения τ_{xl} сонаправлены с процессом

электроконтактной наплавки-прокатки. Окружная скорость вращения ролика-электрода V_{e2} несколько меньше окружной скорости V_{e1} и при помощи показателя степени кинематической асимметрии K_v характеризуется соотношением $V_{e2} = V_{e1} / K_v$, вследствие чего на контактной поверхности данного ролика присутствует и зона отставания L_{om2} , в которой касательные контактные напряжения τ_{x2} сонаправлены, и смешанная зона L_{cm} , в которой касательные контактные напряжения τ_{x2} противоположны с процессом электроконтактной наплавки-прокатки (см. рис. 1).

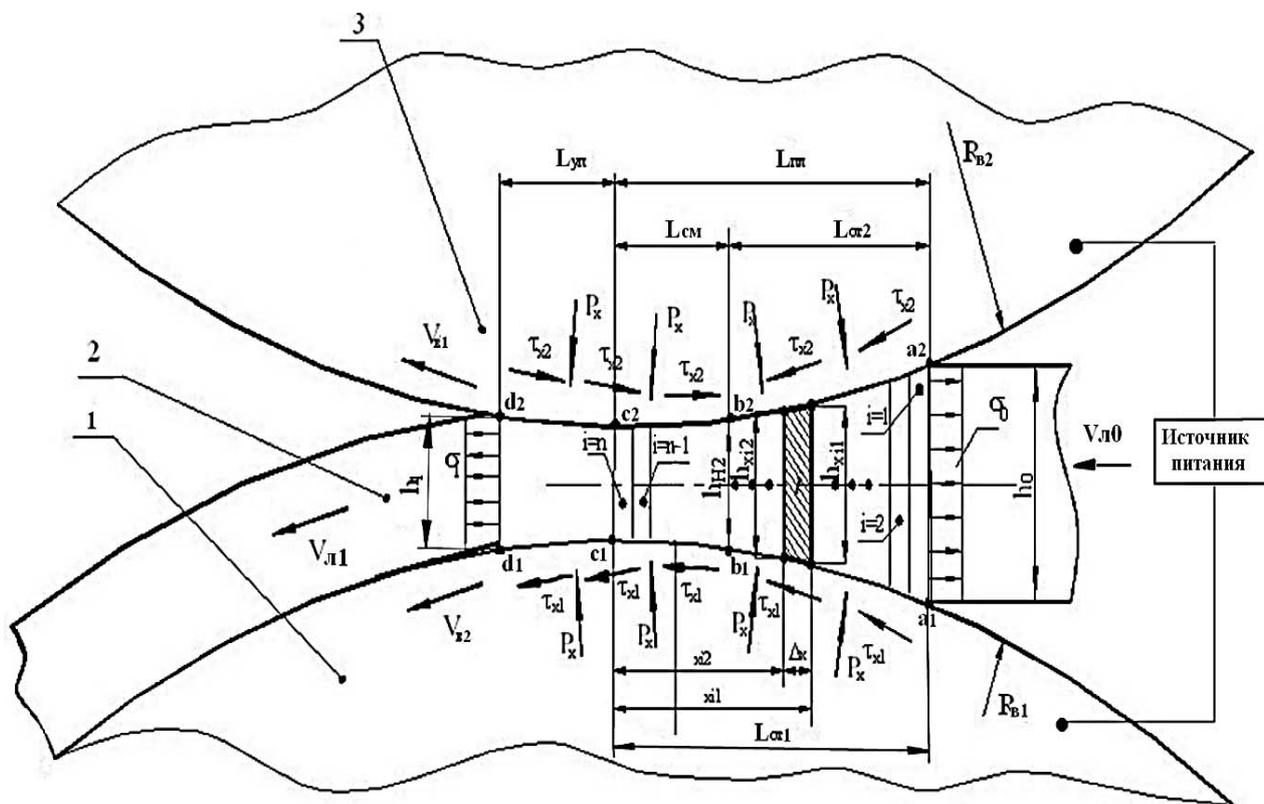


Рис. 1. Расчетная схема процесса наплавки цилиндрической детали:
 1 – наплавляемая деталь; 2 – металлическая лента; 3 – ролик-электрод

Помимо указанных выше и по аналогии с численными математическими моделями традиционных схем процессов электроконтактной наплавки-прокатки [8, 9] был принят еще ряд допущений, основными из которых являются следующие:

- деформация металлической ленты 2 (см. рис. 1) является плоской и установившейся во времени, при этом кинематика пластического течения ее материала подчиняется гипотезе плоских сечений [8–10], а нормальные осевые напряжения σ_{xi} и показатели удвоенного сопротивления сдвигу $2K_{xi}$ изменяются только по длине зоны пластического формоизменения, характеризуемой горизонтальной геометрической координатой X , имеющей свое начало в плоскости сопряжения зон пластического формоизменения и упругого восстановления c_1c_2 ;
- по длине каждого выделенного i -го элементарного объема (рис. 2) текущие значения толщин $h_{xi} = h_{xi1} \dots h_{xi2}$, нормальных контактных $P_{xi} = P_{xi1} \dots P_{xi2}$ и касательных контактных напряжений $\tau_{x2i1} = \tau_{x2i1} \dots \tau_{x2i2}$ изменяются линейно;
- аналитические описания касательных контактных напряжений τ_{x1} , τ_{x2} подчиняются закону пластического трения, предложенного Зибелем [10], и имеют следующий вид:

$$\tau_{x1} = 2K_x \mu_{x1}; \tau_{x2} = 2K_x \mu_{x2}, \tag{1}$$

где $2K_x$ – текущее по длине зоны пластического формоизменения значение удвоенного сопротивления сдвигу материала металлической ленты, определяемое с учетом аналогичных текущих значений степени, скорости и температуры деформации [8];

μ_{x1}, μ_{x2} – текущее значение коэффициентов пластического трения, определяемые в зависимости от геометрической координаты X как:

$$\mu_{x1} = \mu_{01}(x / L_{nl})^{a_{\mu 1}}; \tag{2}$$

$$\mu_{x2} = \mu_{02}[(x - L_{cm}) / (L_{nl} - L_{cm})]^{a_{\mu 2}} \text{ при } L_{cm} \leq x \leq L_{nl}; \tag{3}$$

$$\mu_{x2} = -\mu_{02}[(L_{cm} - x) / L_{cm}]^{a_{\mu 2}} \text{ при } 0 \leq x \leq L_{cm}, \tag{4}$$

где $\mu_{01}, \mu_{02}, a_{\mu 1}, a_{\mu 2}$ – опорные значения и степенные показатели, характеризующие распределения коэффициентов пластического трения на контактных поверхностях наплавляемой детали и ролика-электрода [8, 9];

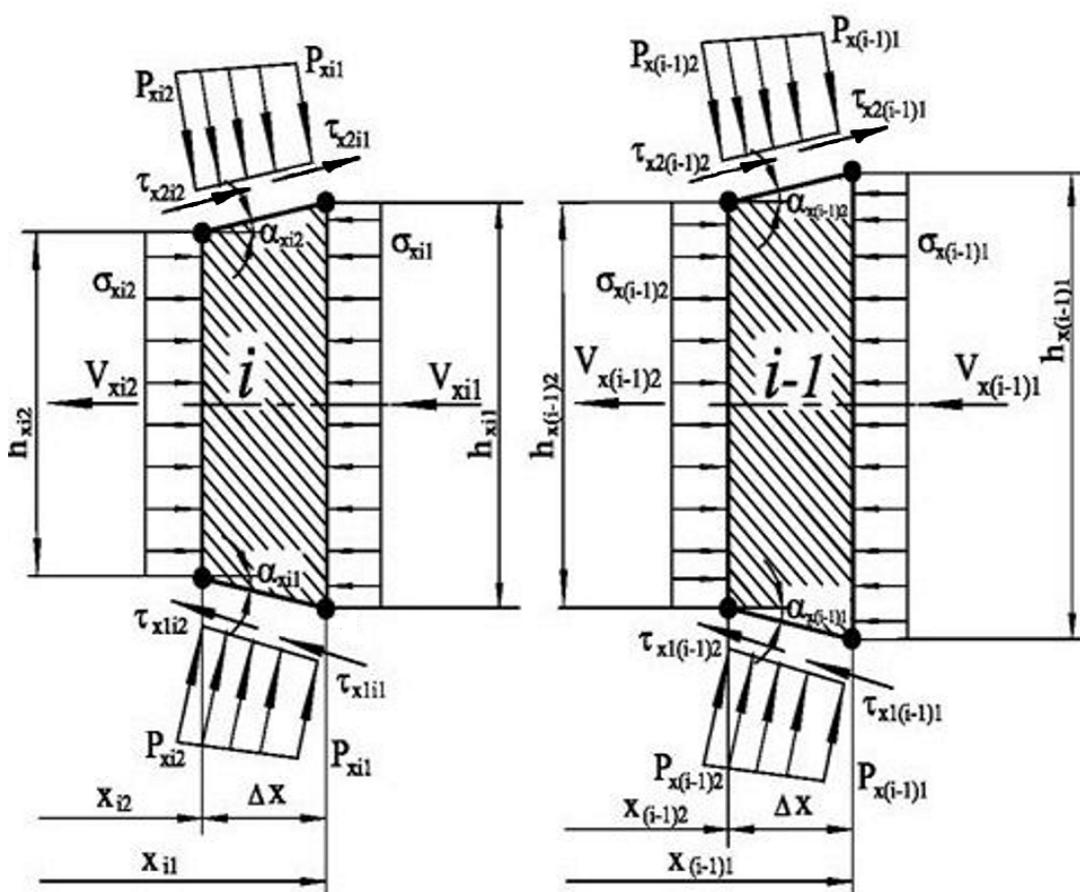


Рис. 2. Расчетные схемы выделенных элементарных объемов применительно к математическому моделированию напряженно-деформированного состояния наплавленного слоя металлической ленты

– наличием зоны упругого сжатия привариваемой стальной ленты в сечениях на входе в очаг деформации, а также инерционными составляющими условий равновесия, вследствие их весьма незначительной степени влияния, пренебрегаем;

– аналитическое описание текущего по длине зоны пластического формоизменения L_{nl} значения толщины привариваемой ленты h_x может быть представлено степенной зависимостью вида [8]:

$$h_x = h_1 + (h_0 - h_1)(x/L_{nl})^{a_h}, \quad (5)$$

где h_0, h_1 – исходное и конечное значения толщины металлической ленты (см. рис. 1);

$a_h \approx 2$ – степенной показатель, характеризующий реальную выпуклую форму деформирующих инструментов.

– в соответствии с рекомендациями работ [8–10] общая протяженность зоны пластического формоизменения L_{nl} , величина шага ее разбиения Δx , геометрические координаты начального x_{i1} и конечного x_{i2} граничных сечений выделенного i -го элементарного объема, а также протяженность смешанной зоны L_{cm} , знание которых необходимо для корректного использования зависимостей (1)–(5) могут быть определены как:

$$L_{nl} = \sqrt{2R_{e1}R_{e2}(h_0 - h_1)/(R_{e1} + R_{e2}) - (h_0 - h_1)^2/4}; \Delta x = L_{nl} / n; \quad (6)$$

$$x_{i1} = L_{nl} - \Delta x(i-1); x_{i2} = x_{i1} - \Delta x; h_{n2} = h_1 V_{e1} / V_{e2} = h_1 K_v; \quad (7)$$

$$L_{cm} = \sqrt{2R_{e1}R_{e2}(h_{n2} - h_1)/(R_{e1} + R_{e2}) - (h_{n2} - h_1)^2/4}, \quad (8)$$

где h_{n2} – толщина наплавляемой металлической ленты 2 в сечении, являющемся нейтральным по отношению к ролику-электроду 3 (см. рис. 1).

С учетом характера принятых допущений и конечно-разностной формы записи основных компонент напряженно-деформированного состояния (см. рис. 2) условие статического равновесия выделенного i -го элементарного объема при проектировании всех сил на ось X имеет следующий вид:

$$\sigma_{xi2}h_{xi2} - \sigma_{xi1}h_{xi1} + (p_{xi1} + p_{xi2})(h_{xi1} - h_{xi2})/2 + (2K_{xi1}\mu_{x1i1} + 2K_{xi2}\mu_{x1i2})\Delta x/2 + (2K_{xi1}\mu_{x2i1} + 2K_{xi2}\mu_{x2i2})\Delta x/2 = 0, \quad (9)$$

где положительные значения нормальных компонент тензора напряжений $\sigma_{xi1}, \sigma_{xi2}$ и p_{xi1}, p_{xi2} соответствуют напряжениям сжатия, противоположность касательных контактных напряжений τ_{x2} учтена знаками в аналитических описаниях (3), (4) текущих значений коэффициента пластического трения μ_{x2} .

Учитывая известные согласно (2)–(8) значения компонент $\Delta x, h_{xi1}, h_{xi2}, \mu_{x1i1}, \mu_{x1i2}, \mu_{x2i1}, \mu_{x2i2}$, а также используя общепринятые методы расчета текущих показателей удвоенного сопротивления сдвигу $2K_{xi1}, 2K_{xi2}$ [8] и исходя из рекуррентной схемы постановки решения, при которой компоненты напряженного состояния σ_{xi1}, p_{xi1} являются известными по результатам расчета предыдущего ($i-1$) элементарного объема (см. рис. 2), выражение (9) представляет собой уравнение с двумя неизвестными σ_{xi2}, p_{xi2} , которое, следуя инженерному варианту условия пластичности $p_{xi2} = 2K_{xi2} + \sigma_{xi2}$ [8–10], можно преобразовать как:

$$\begin{aligned} & (p_{xi2} - 2K_{xi2})h_{xi2} - \sigma_{xi1}h_{xi1} + (p_{xi1} + p_{xi2})(h_{xi1} - h_{xi2})/2 - \\ & - (2K_{xi1}\mu_{xi1} + 2K_{xi2}\mu_{xi2})\Delta x/2 - (2K_{xi1}\mu_{x2i1} + 2K_{xi2}\mu_{x2i2})\Delta x/2 = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Решив уравнение (10) по отношению к единственной неизвестной величине p_{xi2} в окончательном виде после соответствующих математических преобразований получим:

$$\begin{aligned} p_{xi2} = \{ & 2(\sigma_{xi1}h_{xi1} + 2K_{xi2}h_{xi2}) - p_{xi1}(h_{xi1} - h_{xi2}) + \\ & + [2K_{xi1}(\mu_{xi1} + \mu_{x2i2}) + 2K_{xi2}(\mu_{x2i1} + \mu_{x2i2})]\Delta x\} / (h_{xi1} + h_{xi2}), \end{aligned} \quad (11)$$

где нормальные осевые напряжения в зоне пластического формоизменения, следуя инженерному варианту условия пластичности, можно определить как $\sigma_{xi2} = p_{xi2} - 2K_{xi2}$.

В качестве направлений рекуррентной схемы решения использовали направление, соответствующее перемещению металлической ленты при ее электроконтактной наплавке-прокатке, с учетом чего начальные условия, для первого $i = 1$ элементарного объема и условия связи, используемые при переходе от расчета i -го к расчету $i + 1$, были приняты в виде:

$$\begin{aligned} x_{i1}|_{i=1} = L_{nl}; \quad h_{xi1}|_{i=1} = h_0; \quad \mu_{xi1}|_{i=1} = \mu_{01}; \quad \mu_{x2i1}|_{i=1} = \mu_{02}; \\ \sigma_{xi1}|_{i=1} = -\sigma_0; \quad p_{xi1}|_{i=1} = 0,0; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} x_{(i+1)1} = x_{i2}; \quad h_{x(i+1)1} = h_{xi2}; \quad \mu_{x1(i+1)1} = \mu_{xi2}; \quad \mu_{x2(i+1)1} = \mu_{x2i2}; \\ \sigma_{x(i+1)1} = \sigma_{xi2}; \quad p_{x(i+1)1} = p_{xi2}, \end{aligned} \quad (13)$$

где σ_0 – напряжения заднего натяжения наплавляемой ленты.

По мере расчета локальных характеристик напряженно-деформированного состояния в рамках зоны пластического формоизменения наплавляемой ленты путем численного интегрирования производили определение силы P и моментов M_1, M_2 электроконтактной наплавки:

$$P = \left[\sum_{i=1}^n (p_{xi1} + p_{xi2})\Delta x/2 \right] b; \quad (14)$$

$$M_1 = \left[\sum_{i=1}^n (p_{xi1}\mu_{xi1} + p_{xi2}\mu_{xi2})\Delta x/2 \right] bR_{\theta 1}; \quad (15)$$

$$M_2 = \left[\sum_{i=1}^n (p_{xi1}\mu_{x2i1} + p_{xi2}\mu_{x2i2})\Delta x/2 \right] bR_{\theta 2}. \quad (16)$$

Кроме того, по аналогии с результатами работ [8–10], представленная математическая модель электроконтактной наплавки-прокатки деталей типа тел вращения включает в себя расчет зоны упругого восстановления наплавленной ленты, оценку степени использования запаса пластичности ее материала и ряд других процедур. Полученный в этом случае программный комплекс использован для автоматизированного расчета ряда конкретных технологических схем, в том числе и в качестве целевой функции при автоматизированном выборе требуемой степени кинематической асимметрии K_v , обеспечивающей равенство нулю осевых напряжений в сечении на выходе из зоны пластического формоизменения, то есть $\sigma_{xi2}|_{i=n} \approx 0,0$.

ВЫВОДЫ

На основе рекуррентного решения конечно-разностной формы условий статического равновесия выделенных элементарных объемов разработана численная математическая модель локальных и интегральных характеристик напряженно-деформированного состояния металла при электроконтактной наплавке лент с использованием процессов прокатки. Отличительными особенностями данной модели является корректный учет реального характера распределений геометрических характеристик, механических свойств и условий внешнего контактного трения, при одновременном обеспечении возможности автоматизированного проектирования технологических режимов данного процесса, исходя из условия обеспечения требуемого качества восстанавливаемых деталей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сулима А. М. *Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин* / А. М. Сулима, В. А. Шулов, Ю. Д. Ягодкин. – М. : Машиностроение, 1988. – 240 с.
2. Бурак П. И. *Продление ресурса деталей электроконтактной приваркой* / П. И. Бурак // *Тракторы и сельхозмашины*. – 2010. – № 6. – С. 42–44.
3. Бережная Е. В. *Технологические особенности наплавки порошковой лентой* / Е. В. Бережная, В. В. Чигарев, Э. П. Грибков // *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку : V Міжнародна науково-технічна конференція, 4–7 червня 2007 р.* – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 118.
4. Panin V. E. *Mesomechanics of multiple cracking of brittle coatings in a loaded solid* / V. E. Panin, R. V. Goldstein // *International journal of Fracture*. – 2008. – V. 150. – P. 37–53.
5. Бережная Е. В. *Перспективные направления снижения затрат на восстановление деталей, работающих в условиях абразивного износа* / Е. В. Бережная // *Бъдецето проблемите на световната наука : V Междонародна научна практична конференция, 17–25 декември 2009.* – София, 2009. – С. 11–13.
6. Бережная Е. В. *Технологические особенности изготовления порошковой ленты для электроконтактной восстановительной наплавки рабочих органов почвообрабатывающих машин* / Е. В. Бережная, Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. пр.* – Краматорськ : ДДМА, 2011. – № 2 (23). – С. 11–14.
7. Бережная Е. В. *Восстановление деталей станочного оборудования электроконтактной наплавкой порошковой проволокой* / Е. В. Бережная // *Надійніть інструменту та оптимізація технологічних систем : зб наук. пр.* – Краматорськ : ДДМА, 2011. – № 29. – С. 175–179.
8. Федоринов В. А. *Математическое моделирование напряжений, деформаций и основных показателей качества при прокатке относительно широких листов и полос* : монография / В. А. Федоринов, А. В. Сатонин, Э. П. Грибков. – Краматорск : ДГМА, 2010. – 244 с.
9. *Численное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при горячей прокатке относительно тонких лент и полос* / А. В. Сатонин, М. Г. Коренко, С. С. Настоящая, В. Г. Переходченко // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 4 (25). – С. 31–36.
10. Целиков А. И. *Теория продольной прокатки* / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. – М. : Металлургия, 1980. – 320 с.

Сатонин А. В. – д-р техн. наук, проф. каф. АММ ДГМА;

Кассов В. Д. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ПТМ ДГМА;

Бережная Е. В. – канд. техн. наук, ст. преп. каф. ОиТСП ДГМА;

Данилюк В. А. – аспирант ДГМА;

Махмудов К. Д. – канд. техн. наук, доц., директор Каспийского филиала ДагГТУ.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

ДагГТУ – Дагестанский государственный технический университет, г. Каспийск, Россия.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua; ptm@dgma.donetsk.ua