$$Э_{рег} = Р_{потр} \cdot Т = 343,7 \cdot 4368 = 1527489 \text{ кВт/ч.}$$

Таким образом, затраты электроэнергии дымососа при работе с регулируемым электроприводом составляет $(907702,8 / 1527489,6) \cdot 100\% = 60\%$ от работы без регулируемого электропривода. При этом стоимость электроэнергии:

при использовании регулируемого электропривода:

$$С = Э_{рег} \cdot Ц = 907702,8 \cdot 0,52 = 472005,5 \text{ грн;}$$

без использования регулируемого электропривода:

$$С = Э_{н.рег} \cdot Ц = 1527489,6 \cdot 0,52 = 79429,6 \text{ грн}$$

где *Ц* - стоимость одного кВт/ч электроэнергии на предприятии.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Произведенный анализ электропотребления позволяет снизить затраты на электроэнергию при регулировании производительности одного дымососа примерно в 1,7 раза, что при установленных 6 дымососов одной типовой районной котельной составляет около 5,0 млн.грн.

Однако при модернизации производств централизованного тепло-водоснабжения необходимы уточнения режимных характеристик автоматизированных электроприводов механизмов, а также экономических показателей с учетом затрат на приобретение нового электрооборудования.

При этом существующая система управления технологическим оборудованием также требует значительной модернизации.

Необходима замена устаревших средств КИП и А и внедрение новой автоматизированной системы управления технологическими процессами на базе современного программно-технического комплекса.

*Список литературы*

1. **Шарипов А.Я.** Энергоэффективные и энергосберегающие технологии в системе теплоснабжения жилого района. Энергосбережение, 2001. -№5.

2. **Радимов С.Н.** Потенциал энергоснабжения наиболее широко используемых агрегатов и установок. Реализация потенциала средствами электропривода. «Экологические системы», 2007. - №8.

3. **Ключев В.И., Терехов В.М.** Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: Учебник для вузов.-М.: Энергия, 1980. - 360 с.

Рукопись поступила в редакцию 20.03.14

УДК 621.791.92

Е.В. БЕРЕЖНАЯ, канд. техн. наук, Ю.А. ЧЕПЕЛЬ, аспирант
Донбасская государственная машиностроительная академия
Н.И. ЦЫВИНДА, канд. техн. наук доц., Криворожский национальный университет

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЗЕМЛЕРОЙНЫХ МАШИН МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАПЛАВКИ

Разработана численная одномерная математическая модель распределения локальных и интегральных характеристик напряженно-деформированного состояния металла при электроконтактной наплавке металлической лентой, учитывающая реальный характер распределения геометрических параметров наплавляемого слоя в зоне очага деформации.

**Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями.** Важной задачей эксплуатации современных подъемно-транспортных машин и почвообрабатывающего оборудования является повышение их экономической эффективности и безопасности. Решение этих вопросов прямо зависит от создания и освоения высокоэффективных технологических процессов производства, повышения качества изделий, снижения их себестоимости [1,2].

Изнашивание деталей рабочих органов является закономерным процессом, неизбежно сопровождающим работу землеройных машин, который приводит к изменению размеров, геометрической формы деталей и тем самым вызывает снижение функциональных качеств и производительности машин. Так, допускаемый на практике износ режущих элементов землерой-

© Бережная Е.В., Чепель Ю.А., Цывинда Н.И., 2014

ных машин вызывает увеличение силы резания на 60-80 % и более, что снижает производительность, повышает энергоемкость и себестоимость разработки грунта [3,4].

**Анализ исследований и публикаций.** Одним из путей повышения эффективности и экономичности работы землеройной техники является своевременный периодический ремонт режущих элементов (ножей бульдозеров, скреперов; зубьев экскаваторов, погрузчиков и т.д.) по мере их износа методом электроконтактной наплавки износостойких сплавов [5,6].

**Постановка задачи.** Указанный способ выгодно отличается от дуговых методов нанесения износостойких покрытия и характеризуется высокой производительностью, низкой энергоемкостью, минимальной зоной термического влияния импульса электрического тока на металл детали вследствие его кратковременности, а также отсутствием необходимости использования защитной атмосферы.

Процесс электроконтактной наплавки износостойких сплавов может применяться для восстановления деталей с плоской поверхностью различной протяженности, с цилиндрическими и коническими поверхностями [7,8].

Целью данной работы является численное математическое моделирование энергосиловых параметров процесса электроконтактной наплавки цилиндрических деталей, работающих в условиях абразивного износа.

**Изложение материала и результаты.** Сущность процесса восстановления цилиндрических деталей методом электроконтактной наплавки заключается в том, что 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 (рис. 1).

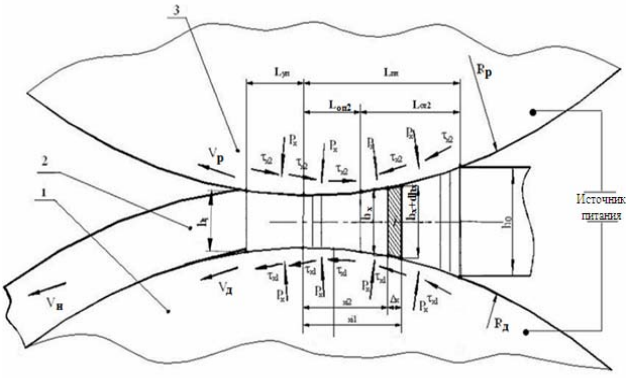


**Рис. 1.** Расчетная схема процесса электроконтактной наплавки цилиндрической детали

Вследствие совместной пластической деформации приконтактного объема восстанавливаемой детали *1* и присадочного материала *2* образуется твердофазное соединение покрытия с основным металлом.

В основу математического моделирования был положен ряд следующих допущений:

деформация наплавляемой ленты двухмерная и установившаяся во времени;

физико-механические свойства деформируемого металла и кинематические условия процесса пластического формоизменения металла изменяются только по длине очага деформации, а по высоте каждого отдельного сечения остаются постоянными;

текущие значения нормальных контактных напряжений $P_{1x}$ и $P_{2x}$ на противоположных контактных поверхностях равны;

касательные контактные напряжения $\tau_{1x}$ и $\tau_{2x}$ и значения углов контакта $\alpha_{1x}$ и $\alpha_{2x}$ по длине отдельно выделенного элементарного объема металла в очаге деформации не изменяются.

Геометрические параметры выделенного элементарного объема рассчитывали с учетом следующих выражений

$$h_{x(i+1)} = h_x - \Delta h_{1x} - \Delta h_{2xi};$$

$$\Delta h_{1(2)x} = R_{1(2)}\left(\cos\arcsin\frac{x_{i+1}}{R_{1(2)}} - \cos\arcsin\frac{x_i}{R_{1(2)}}\right),$$

где $n$ - число разбиений очага деформации на элементарные объемы.

С учетом принятых допущений условие равновесия элементарного объема металла в зоне очага деформации будет иметь вид

$$\sum F_x = -\sigma_x h_x + (\sigma_x + d\sigma_x)(h_x + dh_x) - \tau_{2x} d + P_{1x} d_x tg\alpha_{1x} + P_{2x} d_x tg\alpha_{2x} = 0$$

Учитывая, что $P_{1x}=P_{2x}=P_x$ и, проведя сокращения, получим

$$d\sigma_x h_x + \sigma_x dh_x - \tau_{1x} dx - \tau_{2x} dx + P_x dx(\mathrm{tg}\,\alpha_{1x} + \mathrm{tg}\,\alpha_{2x}) = 0.$$

Так как

$$dh_x = dh_{x1} + dh_{x2} = dx(\mathrm{tg}\,\alpha_{1x} + tg),$$

а контактные силы трения пропорциональны нормальному давлению $\tau_{1x} = P_x f_{1x}$ и $\tau_{2x} = P_x f_{2x}$ и, принимая условие пластичности в виде $P_x=2K_x-\sigma_x$ , получим

$$d\sigma_x h_x + \sigma_x dh_x(\mathrm{tg}\,\alpha_{1x} + \mathrm{tg}\,\alpha_{2x}) - (2K_x - \sigma_x)f_{1x} -$$

$$-(2K_x - \sigma_x)f_{2x} + (2K_x - \sigma_x)dx(\mathrm{tg}\,\alpha_{1x} + \mathrm{tg}\,\alpha_{2x}) = 0.$$

После сокращения подобных членов и, учитывая, что

$$\mathrm{tg}\,\alpha_{1x} = \mathrm{tg}\frac{\arcsin x}{R_д};\ \ \mathrm{tg}\,\alpha_2 = \mathrm{tg}\frac{\arcsin x}{R_р},$$

где $x$ - текущая координата положения рассматриваемого сечения, получим дифференциальное уравнение равновесия металла в очаге деформации в окончательном виде

в зоне опережения

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = \frac{1}{h_x}\left[(2K_x - \sigma_x)(f_{1x} + f_{2x}) - 2K_x\left(\mathrm{tg}\frac{\arcsin x}{R_д} + \mathrm{tg}\frac{\arcsin x}{R_р}\right)\right];$$

в зоне отставания

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = \frac{1}{h_x}\left[(2K_x - \sigma_x)(-f_{1x} - f_{2x}) - 2K_x\left(\mathrm{tg}\frac{\arcsin x}{R_д} + \mathrm{tg}\frac{\arcsin x}{R_р}\right)\right];$$

где $h_x$ - текущее значение толщины наплавляемого слоя; $2K_x$ - текущее значение сопротивления деформации; $f_{1x}, f_{2x}$ - текущие значения коэффициентов трения на контактной поверхности восстанавливаемой детали и ролика-электрода.

Определение текущих значений напряжений осуществлялось на основе метода Рунге-Кутта четвертого порядка с учетом соотношений вида

$$\sigma_{x(i)} = \sigma_{x(i-1)} - \frac{\Delta x}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4);$$

$$P_{x(i)} = 2K_{x(i)} + \sigma_{x(i)};$$

$$K_3 = f[x - 0{,}5\Delta x;\ \sigma_{x(i-1)} - 0{,}5K_2\Delta x];$$

$$K_4 = f[x - \Delta x;\ \sigma_{x(i-1)} - K_3\Delta x],$$

где начальные условия имеют вид

$$\sigma_{(xf|x=L_{пл})} = \sigma_0.$$

Аналитическое описание граничных условий имеет вид

$$h_x = h_1 + R_д\left(1 - cosarcsin\frac{x}{R_д}\right) + R_р\left(1 - cosarcsin\frac{x}{R_р}\right);$$

$$\varepsilon_x = \frac{h_0 - h_x}{h_0};$$

$$2K_x = 1{,}15(a_0 + a_1\varepsilon_x + a_2\varepsilon_x^2 + a_3\varepsilon_x^3);$$

где $h_x$ - текущая по длине очага деформации толщина наплавляемого слоя; $h_1$ - толщина износостойкого слоя после наплавки; $\varepsilon_x$ - текущее значение относительной деформации наплавляемого слоя; $K_x$ - текущее значение сопротивления сдвигу металла наплавляемого слоя; $a_o$, $a_1$, $a_2$, $a_3$ - коэффициенты регрессии аналогического описания зависимости предела текучести металла наплавляемого слоя от степени его деформации.

Изменение коэффициента трения по длине очага деформации было принято в виде:

для зоны отставания

$$f_{1(2)x} = f_{1(2)}(1 + \alpha)\left(\frac{x - L_{отс}}{L_{пл} - L_{отс}}\right)^{\alpha};$$

для зоны опережения

$$f_{1(2)x} = f_{1(2)}(1+\alpha)\left(\frac{L_{on2}-x}{L_{on2}}\right)^{\alpha},$$

где $f_{1(2)}$ - среднее значение коэффициента трения, соответственно, на детали и ролике-электроде; $\alpha$ - показатель степени (0,3-0,35).

Полное усилие на ролике-электроде при электроконтактной наплавке имеет следующий вид

$$P = \sum_{i=1}^{n} P_i \Delta x ,$$

Приведенный алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния наплавляемого металла в очаге деформации позволил разработать программные средства для расчета основных технологических параметров процесса электроконтактной восстановительной наплавки лентами цилиндрических деталей, что обеспечивает регулирование энергосиловых параметров процесса и получение наплавленного слоя с заданными показателями геометрических характеристик на поверхности цилиндрической детали.

В качестве примеров численной реализации одномерной математической модели представлены распределения текущих по длине контактных зон опережения и отставания значений нормальных и касательных контактных напряжений (рис. 2).

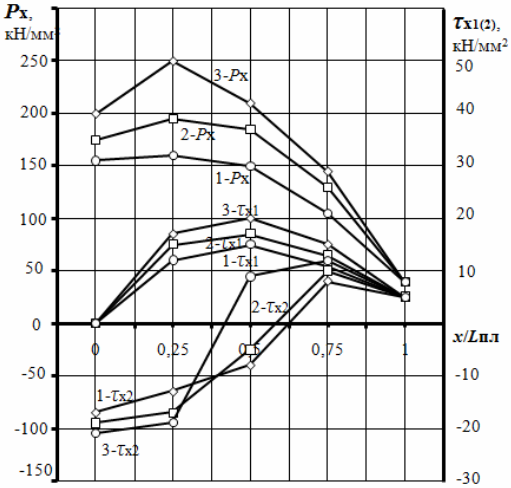


**Рис. 2.** Расчетные распределения нормальных $P_x$ и касательных контактных напряжений на восстанавливаемой детали $\tau_{x1}$ и ролике-электроде $\tau_{x2}$: *1* - $h_o$=1,0 мм, $h_1$=0,8 мм; *2* - $h_o$=1,0 мм, $h_1$=0,7 мм; *3* - $h_o$=1,0 мм, $h_1$=0,6 мм (материал - лента 30ХГСА)

Предложенная одномерная математическая модель позволяет определить распределения локальных и интегральных характеристик процесса электроконтактной наплавки цилиндрических деталей, работающих в условиях абразивного износа, и может быть использована как для анализа, так и для оптимизации процесса восстановления быстроизнашивающихся деталей.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Разработана одномерная математическая модель, позволяющая определить основные технологические параметры процесса электроконтактной наплавки цилиндрических деталей, работающих в условиях абразивного износа, учитывая реальный характер распределения геометрических характеристик очага деформации.

*Список литературы*


1. **Сухочев Г.А.** Вопросы технологии повышения качества нагруженных деталей транспортных машин / **Г.А. Сухочев** // Инженерный журнал, 2005. - № 12. С . 17-22.

2. **Хромченко Ф.А.** Сварочные технологии при ремонтных работах / **Ф.А. Хромченко**. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 368 с.

3. **Robin F.** The wear of steels by abrasives / F. Robin // Revue de Metallurgie. – 1991. – V.8. – P.47-84.

4. **Бренштейн Д.Б.** Абразивное изнашивание лемешного лезвия и работоспособность плуга / **Д.Б. Бренштейн** // Тракторы и сельскохозяйственные машины, 2002. – №6. – С. 39 – 42.

5. **Войнов Б.А.** Износостойкие сплавы и покрытия / **Б.А. Войнов** // М.: Машиностроение, 1990. - 204 с.

6. **Латыпов Р.А.** Упрочнение режущих органов сельхозмашин электроконтактной приваркой шлама ШХ15/Р / **Р.А. Латыпов, А.В. Поляченко, Б.А. Молчанов, Н.Д. Бахмудкадиев** // Механизация и электрификация сельского хозяйства, 1998. – №8. – С. 25-29.

7. **Бережная Е.В.** Перспективные направления снижения затрат на восстановление деталей, работающих в условиях абразивного износа / **Е.В. Бережная** // Бъдещето проблемите на световната наука: 5-а международна научна практична конференция, 17-25 декември 2009. – София,– 2009. – С. 11-13.

8. **Бережная Е.В.** Перспективные направления снижения затрат на восстановление деталей подъемно-транспортного оборудования, работающих в условиях абразивного износа / **Е.В. Бережная** // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: IX міжнародна науково-технічна конференція. – Краматорськ: ДДМА. – 2011. – С. 16.


Рукопис подано до редакції 02.10.13