

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 плоскостями 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  $\tau_{xl}$  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  $\tau_{x2}$  сонаправлены, и смешанная зона  $L_{cm}$ , в которой касательные контактные напряжения  $\tau_{x2}$  противоположны с процессом электроконтактной наплавки-прокатки (см. рис. 1).

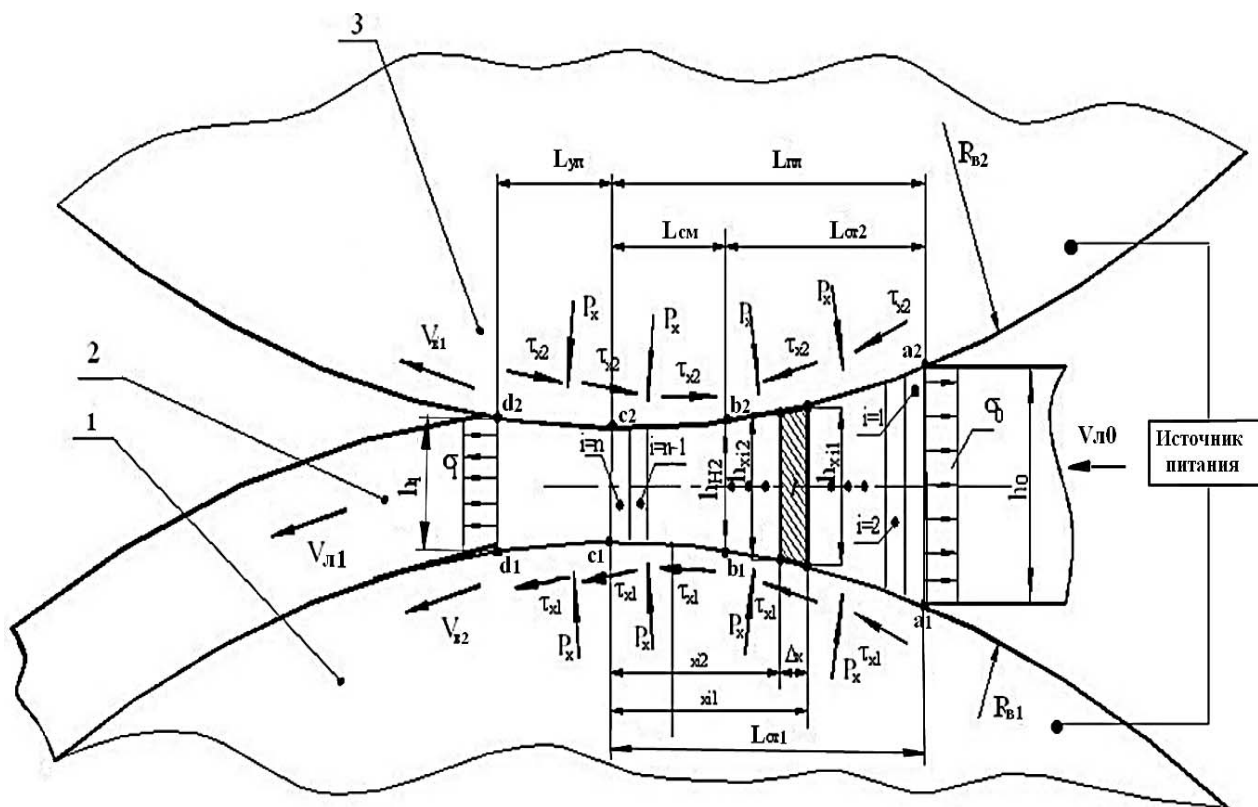


Рис. 1. Расчетная схема процесса наплавки цилиндрической детали:  
1 – наплавляемая деталь; 2 – металлическая лента; 3 – ролик-электрод

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  $\sigma_{xi}$  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  $\tau_{x1}$ ,  $\tau_{x2}$  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];

$\mu_{x1}, \mu_{x2}$  – 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];

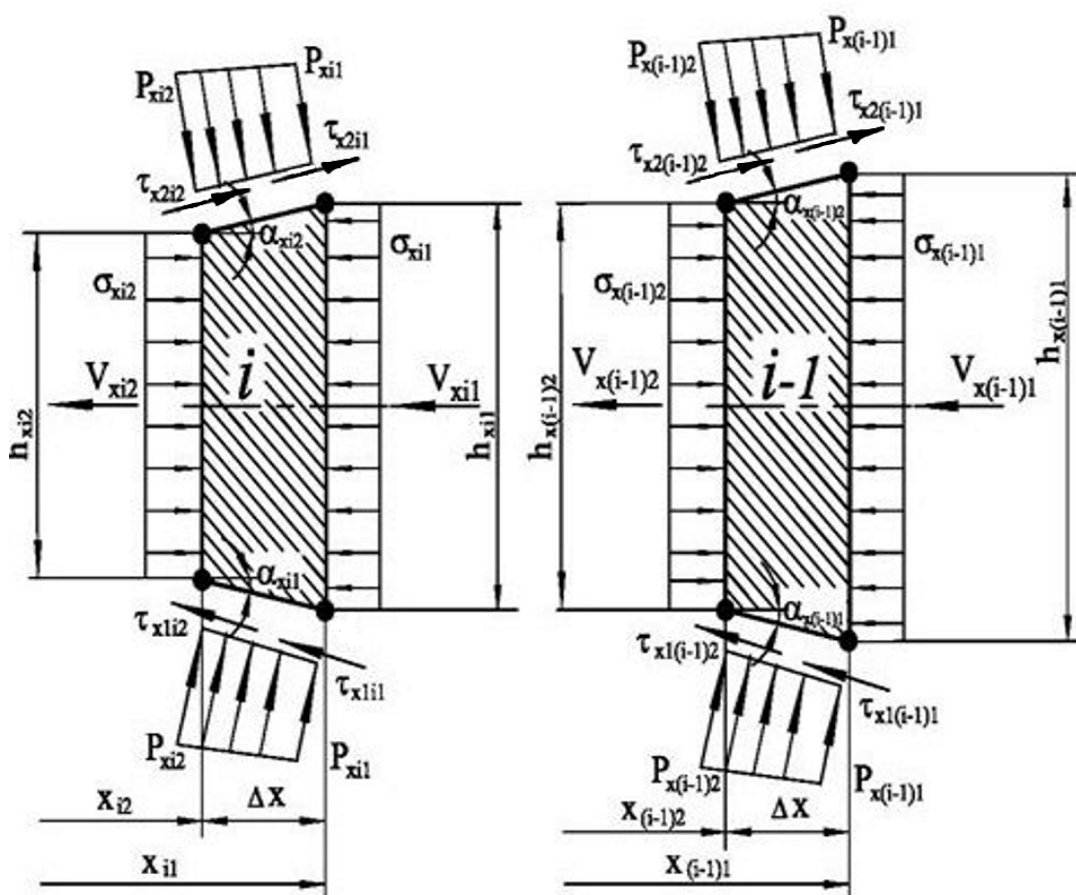


Рис. 2. Расчетные схемы выделенных элементарных объемов применительно к математическому моделированию напряженно-деформированного состояния наплавленного слоя металлической ленты

– 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  $\Delta x$ , 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  $\tau_{x2}$  учтена знаками в аналитических описаниях (3), (4) текущих значений коэффициента пластического трения  $\mu_{x2}$ .

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  $\sigma_{xi1}, p_{xi1}$  являются известными по результатам расчета предыдущего ( $i-1$ ) элементарного объема (см. рис. 2), выражение (9) представляет собой уравнение с двумя неизвестными  $\sigma_{xi2}, p_{xi2}$ , которое, следуя инженерному варианту условия пластичности  $p_{xi2} = 2K_{xi2} + \sigma_{xi2}$  [8–10], можно преобразовать как:

$$(p_{xi2} - 2K_{xi2})h_{xi2} - \sigma_{xi1}h_{xi1} + (p_{xi1} + p_{xi2})(h_{xi1} - h_{xi2})/2 - \\ - (2K_{xi1}\mu_{x1i1} + 2K_{xi2}\mu_{x1i2})\Delta x/2 - (2K_{xi1}\mu_{x2i1} + 2K_{xi2}\mu_{x2i2})\Delta x/2 = 0. \quad (10)$$

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

$$p_{xi2} = \{2(\sigma_{xi1}h_{xi1} + 2K_{xi2}h_{xi2}) - p_{xi1}(h_{xi1} - h_{xi2}) + \\ + [2K_{xi1}(\mu_{x1i1} + \mu_{x2i2}) + 2K_{xi2}(\mu_{x2i1} + \mu_{x2i2})]\Delta x\}/(h_{xi1} + h_{xi2}), \quad (11)$$

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:

$$x_{i1}|_{i=1} = L_{nl}; h_{xi1}|_{i=1} = h_0; \mu_{x1i1}|_{i=1} = \mu_{01}; \mu_{x2i1}|_{i=1} = \mu_{02}; \\ \sigma_{xi1}|_{i=1} = -\sigma_0; p_{xi1}|_{i=1} = 0,0; \quad (12)$$

$$x_{(i+1)1} = x_{i2}; h_{x(i+1)1} = h_{xi2}; \mu_{x1(i+1)1} = \mu_{x1i2}; \mu_{x2(i+1)1} = \mu_{x2i2}; \\ \sigma_{x(i+1)1} = \sigma_{xi2}; p_{x(i+1)1} = p_{xi2}, \quad (13)$$

где  $\sigma_0$  – 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:

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

$$M_1 = \left[ \sum_{i=1}^n (p_{xi1}\mu_{x1i1} + p_{xi2}\mu_{x1i2})\Delta x/2 \right] bR_{\theta 1}; \quad (15)$$

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

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