

УДК 621.96:678.02

Сатонин А. В.  
Емченко Е. А.  
Борисенко А. В.  
Селедцов А. С.

## РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОЦЕССА ПРОДОЛЬНОЙ РЕЗКИ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ФРАГМЕНТОВ НА ДИСКОВЫХ НОЖНИЦАХ

Измельчение и обеспечение возможности вторичного использования различного рода крупногабаритных резинотехнических отходов, включающих в себя изношенные автомобильные шины, является задачей актуальной как с точки зрения улучшения экологической ситуации, так и с точки зрения обеспечения весьма существенной экономии материальных ресурсов [1]. При этом, наряду с поперечной резкой, осуществляемой параллельными или наклонными ножами, при измельчении резинотехнических фрагментов целесообразным является использование процесса продольной резки, реализуемого на дисковых ножницах различной конструкции [2]. Вместе с тем недостаточно полная изученность данной технологической схемы наряду с отсутствием практического опыта её промышленной апробации делает актуальным проведение соответствующих теоретических и экспериментальных исследований, имеющих своей целью уточнение исходных данных на проектирование соответствующего оборудования.

Целью данной работы является развитие методов расчета процесса продольной резки резинотехнических фрагментов на дисковых ножницах, уточнение формул и анализ их точности методом сравнения теоретических и экспериментальных данных.

Следует отметить, что известные и достаточно широко используемые методики расчета энергосиловых параметров процесса резки на дисковых ножницах [2] предполагают аппроксимацию контактных поверхностей дисковых ножей хордами, что несколько искажает реальную геометрию очага деформации (рис. 1) и, как следствие, приводит к снижению степени достоверности результатов расчета, поскольку, например, сила резания  $P_{рд}$  в этом случае определяется как:

$$P_{рд} = k_1 k_2 k_3 \sigma_B F_s, \quad (1)$$

где  $k_1 k_2 k_3$  – коэффициенты, учитывающие соотношение напряжений среза и предела прочности  $\sigma_B$  разрезаемого материала, а также влияние бокового зазора и притупления режущих кромок дисковых ножей [2];

$F_s$  – площадь среза, определяемая геометрией очага деформации процесса резания дисковыми ножами, аппроксимация режущих кромок которых хордами и обуславливает наличие соответствующей погрешности.

Более строгое решение в этом случае может быть получено на основе степенного аналитического описания текущего по длине очага деформации значения толщины разрезаемой заготовки  $h_x$  (см. рис. 1):

$$h_x = -\delta_H + (h_\Phi + \delta_H)(x/L_1)^{a_h}, \quad (2)$$

где  $x$  – геометрическая координата, имеющая свое начало в плоскости осей вращения дисковых ножей;

$\delta_H$  – величина перекрытия дисковых ножей;

$h_\phi$  – исходная толщина резинотехнических фрагментов, подвергаемых резке;

$L_1$  – общая протяженность очага деформации, соответствующая расстоянию от плоскости входа разрезаемой заготовки в дисковые ножи  $ac$  до плоскости осей их вращения;

$a_h$  – степенной показатель, определяемый аппроксимацией контактных поверхностей дисковых ножей.

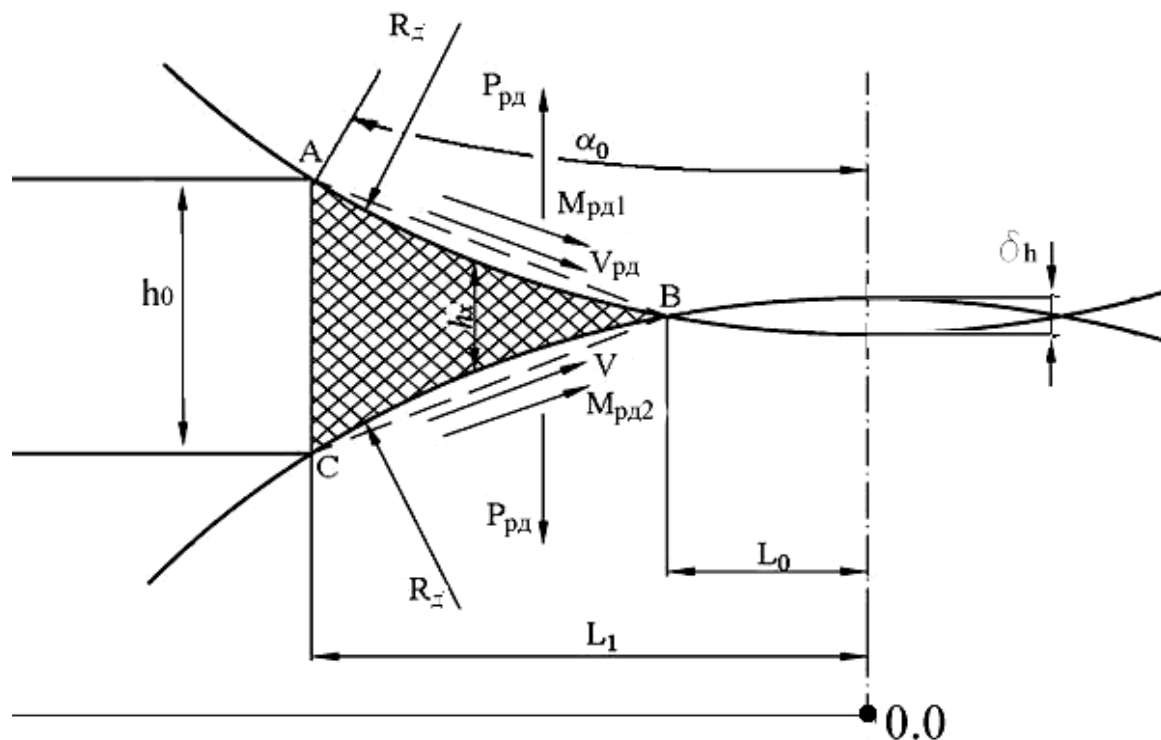


Рис. 1. Расчетная схема очага деформации процесса продольной резки резинотехнических фрагментов дисковыми ножами

С учетом зависимости (2), а также исходя из того, что как показали результаты экспериментальных исследований [3], окончательное разделение резинотехнических отходов происходит в точке  $B$ , то есть в точке пересечения образующих поверхностей дисковых ножей (см. рис. 1) искомая величина площади одного среза  $F_s$  может быть определена как:

$$F_s = \int_{L_0}^{L_1} h_x dx = \int_{L_0}^{L_1} [-\delta_h + (h_\phi + \delta_h)(x/L_1)^{a_h}] dx = \frac{(h_\phi + \delta_h)[L_1^{(a_h+1)} - L_0^{(a_h+1)}]}{(a_h + 1)L_1^{a_h}} - \delta_h(L_1 - L_0), \quad (3)$$

где  $L_0$  – геометрическая координата точки  $B$ , соответствующая расстоянию от участка окончательного разделения разрезаемых резинотехнических фрагментов до плоскости осей вращения дисковых ножей (см. рис. 1).

Следуя зависимости (1), количественно геометрическая характеристика  $L_0$  может быть определена, исходя из очевидного соотношения вида:

$$h_x = -\delta_h + (h_\phi + \delta_h)(L_0/L_1)^{a_h} = 0,0. \quad (4)$$

Откуда:

$$L_0 = L_1 \left[ \delta_h / (h_\phi + \delta_h) \right]^{(1/a_h)}. \quad (5)$$

Аналогично, то есть, исходя из чисто геометрических соотношений, может быть определена и общая протяженность очага деформации  $L_1$ :

$$L_1^2 = R_d^2 - (R_d - h_\phi/2 - \delta_H/2)^2, \quad (6)$$

Откуда в окончательном виде:

$$L_1 = \sqrt{R_d(h_\phi + \delta_H) - (h_\phi + \delta_H)^2/4}, \quad (7)$$

где  $R_d$  – радиус образующих поверхностей дисковых ножей (см. рис. 1).

Обобщив выражения (1) и (3) по отношению к суммарной силе резки резинотехнических фрагментов дисковыми ножами получим:

$$P_{рд} = k_1 k_2 k_3 \sigma_B n_P \left\{ \frac{(h_\phi + \delta_H)[L_1^{(a_h+1)} - L_0^{(a_h+1)}]}{(a_h + 1)L_1^{a_h}} - \delta_H(L_1 - L_0) \right\}, \quad (8)$$

где  $n_P$  – общее количество резов, а геометрические характеристики  $L_0$  и  $L_1$  определяются зависимостями (5) и (7), соответственно.

Учитывая то, что согласно рекомендациям работы [2] наиболее приемлемой аппроксимацией цилиндрических образующих поверхностей дисковых ножей является парабола, соответствующая при  $a_h = 2$  аналитическому описанию текущего значения толщины  $h_x$  вида:

$$h_x = -\delta_H + (h_\phi + \delta_H)(x/L_1)^2$$

выражение (8) может быть трансформировано как:

$$P_{рд} = k_1 k_2 k_3 \sigma_B n_P \left\{ \frac{(h_\phi + \delta_H)(L_1^3 - L_0^3)}{3L_1^2} - \delta_H(L_1 - L_0) \right\}. \quad (9)$$

По аналогии с силой может быть определен и момент резки резинотехнических отходов, действующий на каждый ножевой вал:

$$\begin{aligned} M_{рд1(2)} &= k_1 k_2 k_3 \sigma_B n_{P1(2)} \int_{L_0}^{L_1} h_x x dx = k_1 k_2 k_3 \sigma_B n_{P1(2)} \int_{L_0}^{L_1} \left[ -\delta_H + (h_\phi + \delta_H)(x/L_1)^{a_h} \right] x dx = \\ &= k_1 k_2 k_3 \sigma_B n_{P1(2)} \left\{ \frac{(h_\phi + \delta_H)}{L_1^{a_h}} \cdot \frac{[L_1^{(a_h+2)} - L_0^{(a_h+2)}]}{(a_h + 2)} - \delta_H \frac{(L_1^2 - L_0^2)}{2} \right\}; \end{aligned} \quad (10)$$

или с учетом  $a_h \approx 2$ :

$$M_{рд1(2)} = k_1 k_2 k_3 \sigma_B n_{P1(2)} \left\{ \frac{(h_\phi + \delta_H)(L_1^4 - L_0^4)}{4L_1^2} - \delta_H \frac{(L_1^2 - L_0^2)}{2} \right\}. \quad (11)$$

В качестве примеров результатов численной реализации полученной методики, на рисунке 2 представлены расчетные распределения приведенных значений силы  $P_{рд}^* = P_{рд} / (k_1 k_2 k_3 \sigma_B n_P)$  и моментов  $M_{рд1(2)}^* = M_{рд1(2)} / (k_1 k_2 k_3 \sigma_B n_{P1(2)})$  процесса резки дисковыми ножами, полученные при различных значениях исходной толщины разрезаемых фрагментов  $h_\phi$ , величины перекрытия дисковых ножей  $\delta_H$ , а также при различных значениях степенного показателя  $a_h$ , характеризующего согласно (2) текущие значения геометрических параметров очага деформации.

Из результатов анализа представленных и аналогичных им расчетных распределений является очевидным, что с увеличением толщины разрезаемых фрагментов  $h_\phi$ , приведенные значения и силы  $P_{рд}^*$  и моментов  $M_{рд1(2)}^*$  процесса резки на дисковых ножницах интенсивно возрастают. Некоторое снижение приведенной силы резки  $P_{рд}^*$  имеет место при увеличении перекрытия дисковых ножей  $\delta_n$ , в то время как изменение приведенных значений моментов резания  $M_{рд1(2)}^*$  является в этом случае крайне незначительным. Отмеченное качественно полностью соответствует аналогичным результатам выполненных экспериментальных исследований процесса резки резинотехнических фрагментов на дисковых ножницах [3].

Продолжая анализ полученных расчетных распределений (см. рис. 2) следует отметить, что весьма существенным является и влияние степенного показателя  $a_h$  уравнения (2),

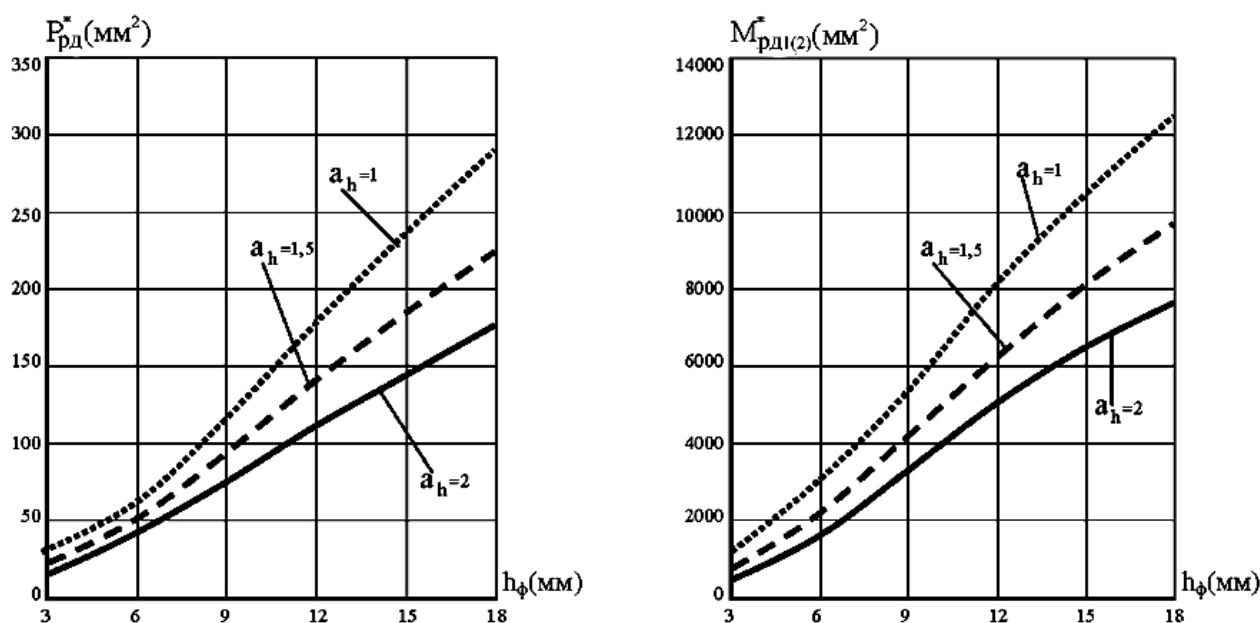


Рис. 2. Расчетные распределения приведенных значений силы  $P_{рд}^*$  (а) и моментов  $M_{рд1(2)}^*$  процесса резания резинотехнических отходов на дисковых ножницах в зависимости от толщины разрезаемых фрагментов  $h_\phi$  и количественной оценки степенного показателя  $a_h$ , аппроксимирующего контактные поверхности дисковых ножей ( $R_d = 150$  мм;  $\delta_n = 3,0$  мм)

В частности, при количественной оценке  $a_h = 1,0$ , используемой авторами работы [2], приведенные значения и силы  $P_{рд}^*$  и моментов  $M_{рд1(2)}^*$  процесса резки дисковыми ножами существенно превышают аналогичные значения, полученные при  $a_h = 2,0$ , то есть при более строгой аппроксимации цилиндрических образующих поверхностей дисковых ножей, при этом степень указанного несоответствия может достигать 30...40 (%) и более. Отмеченное подтверждает необходимость более корректного учета реальной геометрии очага деформации процесса резки резинотехнических отходов на дисковых ножницах, обеспечиваемого, в частности, полученными в рамках данной работы аналитическими зависимостями.

С точки зрения теоретико-экспериментального анализа представляет интерес и определение удельных значений энергосиловых параметров процесса резки резинотехнических фрагментов на дисковых ножницах, исключая влияние геометрии очага деформации и характеризующих, преимущественно, влияние физико-механических свойств разрезаемых

материалов, а также влияние боковых зазоров и степени притупления дисковых ножей. Согласно структуре зависимости (9) удельное значение силы резания в этом случае может быть определено как:

$$\bar{P}_{рд} = k_1 k_2 k_3 \sigma_B = \frac{P_{рд}}{n_p \left\{ \frac{(h_\phi + \delta_H)(L_1^3 - L_0^3)}{3L_1^2} - \delta_H(L_1 - L_0) \right\}}. \quad (12)$$

Аналогично, следуя (11) по отношению к удельным значениям моментов резания, действующим на верхний  $\bar{M}_{рд1}$  и нижний  $\bar{M}_{рд2}$  ножевые валы:

$$\bar{M}_{рд1(2)} = k_1 k_2 k_3 \sigma_B = \frac{M_{рд1(2)}}{n_{p1(2)} \left\{ \frac{(h_\phi + \delta_H)(L_1^4 - L_0^4)}{4L_1^2} - \delta_H \frac{(L_1^2 - L_0^2)}{2} \right\}}. \quad (13)$$

Полученные с учетом соответствующих экспериментальных данных [3], а также с учетом зависимостей (12) и (13) расчетно-эмпирические распределения удельных значений силы  $\bar{P}_{рд}$  и моментов  $\bar{M}_{рд1}$ ,  $\bar{M}_{рд2}$  процесса резки на дисковых ножницах резиновых и кордовых частей фрагментов изношенных крупногабаритных шин КГШ 18.0025 представлены на рис. 3. Следуя результатам анализа представленных и аналогичных им расчетно-эмпирических распределений, необходимо отметить следующее:

– при резке резиновых частей фрагментов КГШ удельные значения силы резания дисковыми ножами находятся в диапазоне  $\bar{P}_{рд} = 4,0 \dots 8,0$  (Н/мм<sup>2</sup>), в то время как аналогичный показатель для кордовых частей тех же фрагментов соответствует  $\bar{P}_{рд} = 6,0 \dots 12,0$  (Н/мм<sup>2</sup>), то есть на 30...50 (%) выше;

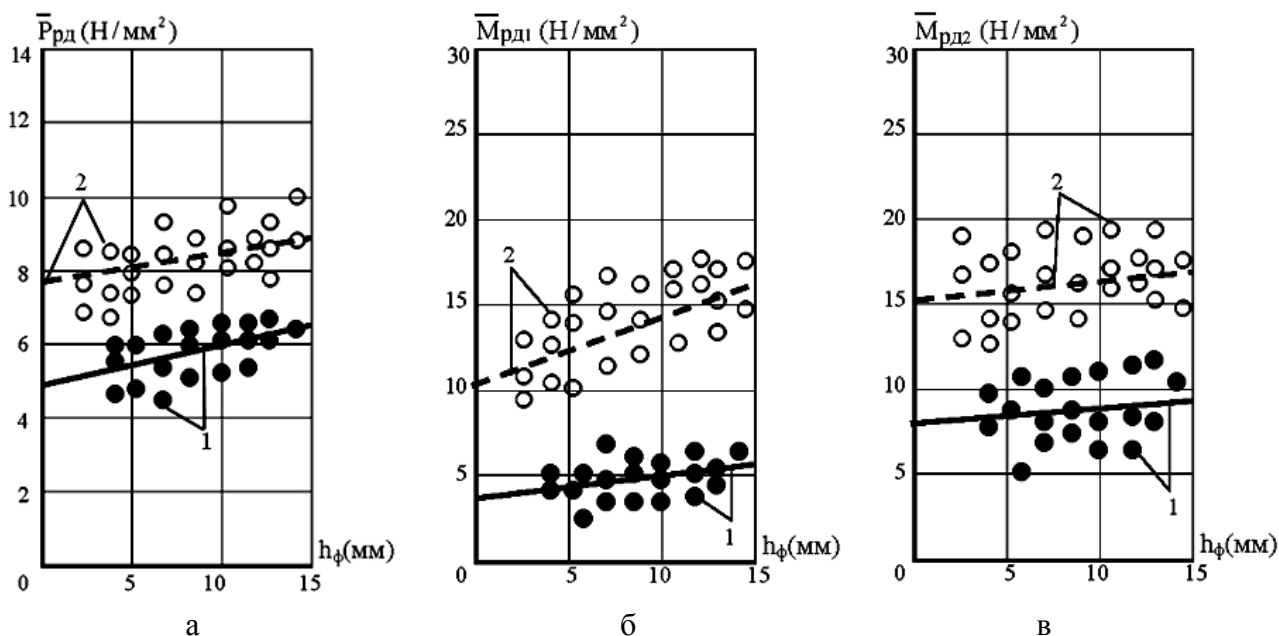


Рис. 3. Расчетно-экспериментальные распределения удельных значений силы  $\bar{P}_{рд}$  (а) и моментов  $\bar{M}_{рд1}$  (б),  $\bar{M}_{рд2}$  (в) процесса резки резиновых 1 (●) и кордовых 2 (○) частей фрагментов КГШ 18.0025 на дисковых ножницах при перекрытии дисковых ножей  $\delta_H = 1,5$  мм

– удельные значения моментов резания при порезке резиновых частей находятся в диапазоне  $\bar{M}_{рд1} = 5,0 \dots 12,0$  (Н/мм<sup>2</sup>) для верхнего и  $\bar{M}_{рд2} = 6,0 \dots 15,0$  (Н/мм<sup>2</sup>) для нижнего ножевых валов, в то время как при порезке кордовых частей данные показатели находятся в диапазонах  $\bar{M}_{рд1} = 8,0 \dots 20,0$  (Н/мм<sup>2</sup>) и  $\bar{M}_{рд2} = 10,0 \dots 25,0$  (Н/мм<sup>2</sup>), соответственно;

– превышение удельных значений моментов резки  $\bar{M}_{рд1(2)}$  над аналогичными показателями силы резки  $\bar{P}_{рд}$  обусловлено повышенным влиянием сил трения, имеющим место при затекании материала разрезаемых фрагментов в боковой зазор между дисковыми ножами, этим же может быть объяснено и некоторое несоответствие удельных значений моментов резки на верхнем  $\bar{M}_{рд1}$  и нижнем  $\bar{M}_{рд2}$  ножевых валах.

В целом, и количественно, и качественно полученные расчетно-эмпирические оценки удельных значений силы резки фрагментов КГШ на дисковых ножницах  $\bar{P}_{рд}$  в достаточной степени соответствуют аналогичным оценкам  $\bar{P}_{рпн}$  и  $\bar{P}_{рнн}$ , полученным при экспериментальном исследовании процесса резки параллельными и наклонными ножами [3], что, в свою очередь, подтверждает возможность использования разработанных методик и соответствующих им результатов в качестве научной основы при проектировании конкретных технологий и оборудования по измельчению различного рода резинотехнических отходов.

### ВЫВОДЫ

На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований уточнена методика расчета энергосиловых параметров при резке резинотехнических отходов на дисковых ножницах, показано, что степень уточнения за счет более корректного аналитического описания геометрических форм режущего инструмента составляет 30...40 (%). Экспериментально установлено, что при резке резиновых частей фрагментов КГШ удельные значения силы резания дисковыми ножами находятся в диапазоне  $\bar{P}_{рд} = 4,0 \dots 8,0$  (Н/мм<sup>2</sup>), в то время как аналогичный показатель для кордовых частей тех же фрагментов соответствует  $\bar{P}_{рд} = 6,0 \dots 12,0$  (Н/мм<sup>2</sup>), то есть на 30...50 (%) выше; удельные значения моментов резания при порезке резиновых частей находятся в диапазоне  $\bar{M}_{рд1} = 5,0 \dots 12,0$  (Н/мм<sup>2</sup>) для верхнего и  $\bar{M}_{рд2} = 6,0 \dots 15,0$  (Н/мм<sup>2</sup>) для нижнего ножевых валов, в то время как при порезке кордовых частей данные показатели находятся в диапазонах  $\bar{M}_{рд1} = 8,0 \dots 20,0$  (Н/мм<sup>2</sup>) и  $\bar{M}_{рд2} = 10,0 \dots 25,0$  (Н/мм<sup>2</sup>), соответственно.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Сатонин А. В. *Технология и оборудование по переработке изношенных автомобильных шин* / А. В. Сатонин // *Шина плюс*. – 2004. – № 2. – С. 3.
2. *Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3 т. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката: учебник для вузов* / А. И. Целиков и [др.]. – М.: Металлургия, 1988. – 680 с.
3. *Методика экспериментальных исследований процесса разделения крупногабаритных резинотехнических отходов* / А. Н. Бойденко, Е. А. Емченко, А. В. Борисенко, О. А. Титаренко, Е. Ю. Гаврильченко // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії: темат. зб. наук. пр.* – Краматорськ: ДДМА, 2005. – С. 133–136.

Сатонин А. В. – д-р техн. наук, проф. кафедры АММ ДГМА;  
Емченко Е. А. – канд. техн. наук, ст. преп. УЗПИ;  
Борисенко А. В. – ст. преп. кафедры ИГ ДГМА;  
Селедцов А. С. – аспирант ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск;  
УЗПИ – Украинский заочный политехнический институт, г. Славянск.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua