

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СТАЛЬНЫХ И РЕЗИНОВЫХ  
ПОКРЫТИЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОНСТРУКЦИЙ ПРЕДПРИЯТИЙ  
ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПРИ УДАРНЫХ НАГРУЗКАХ**

**Настоящий В.А.**, к.т.н., профессор,  
**Яцун В.В.**, к.т.н., доцент,  
*Кировоградский национальный технический университет*  
brmb73@gmail.com

**Аннотация.** Внедрения гуммированных покрытий поверхностей бункеров, перегрузочных узлов, непосредственно контактирующих с перерабатываемым материалом, взамен металлических сдерживается отсутствием методик инженерных расчетов, обосновывающих условия, при которых износостойкость резиновых покрытий поверхностей, работающих в условиях ударного нагружения, не уступает металлическим. Для определения критерия сравнения износостойкости резиновых и металлических покрытий по отношению к ударным нагрузкам использована классическая теория Герца упругого столкновения тел, на основе которой для случая нагружения покрытия частицами, ударяющими по перпендикуляру к его поверхности, получено выражение для критической скорости столкновения, при которой достигается предел прочности материала покрытия.

**Ключевые слова:** резиновая футеровка, износостойкость покрытия, теория упругого столкновения тел, критическая скорость столкновения, выбор материала защитных покрытий.

**ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЗНОСОСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ І ГУМОВИХ ПОКРИТТІВ  
ПОВЕРХОНЬ КОНСТРУКЦІЙ ПІДПРИЄМСТВ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНОГО  
КОМПЛЕКСУ ПРИ УДАРНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ**

**Настоящий В.А.**, к.т.н., професор,  
**Яцун В.В.**, к.т.н., доцент,  
*Кіровоградський національний технічний університет*  
brmb73@gmail.com

**Анотація.** Впровадження гумованих покриттів бункерів, перевантажувальних вузлів, що безпосередньо контактують з матеріалом, що переробляється замість металевих стримується відсутністю методик інженерних розрахунків, що обґрунтовують умови, при яких зносостійкість гумових покриттів поверхонь, які працюють в умовах ударного вантаження, не поступається металевим покриттям. Для визначення критерію порівняння зносостійкості гумових і металевих покриттів по відношенню до ударних навантажень використана класична теорія Герца пружного зіткнення тіл, на основі якої для випадку навантаження покриття частками, що ударяють по перпендикуляру до його поверхні, отримано вираження для критичної швидкості зіткнення, при якій досягається межа міцності матеріалу покриття.

**Ключові слова:** гумове футерування, зносостійкість покриття, теорія пружного зіткнення тіл, критична швидкість зіткнення, вибір матеріалу захисних покриттів.

# COMPARATIVE ESTIMATION OF WEAR-RESISTANCE OF STEEL AND RUBBER COVERAGES OF SURFACES OF CONSTRUCTIONS OF ENTERPRISES OF MINING AND METALLURGICAL COMPLEX AT SHOCK LOADING

Nastoyashiy V.A., PhD., Professor,  
Yatsun V.V., PhD, Assistant Professor,  
Kirovograd national technical University  
brmb73@gmail.com

**Abstract.** As lining-up materials of surfaces of bunkers, lowering of ore, shifting knots directly contacting with the processed material, wear-proof rubbers are widely used. Further introduction of rubberized coats instead of the metallic ones is restricted by the absence of methodologies of engineering calculations, grounding terms at which the wear-resistance of rubber coverages of surfaces of transporting and shifting buildings of the enterprises of mining and metallurgical complex working in the conditions of shock loading, does not yield to the metallic coverages. For determination of criterion of comparison of wear-resistance of rubber and metallic coverages in relation to the shock loading the classic theory resilient collision of bodies of Hertz is used, on the basis of which for the case of loading of the coverage with particles striking on a perpendicular to its surface, expression is obtained for stalling speed of collision, at which the strength limit of surface material is arrived at. Thus, set by the terms of loading of the coverage (closeness of material and radius of falling abrasive particles, coefficients of Poisson for particles and coverage, corresponding Young's modulus for particles and coverage; speed of particles before hitting) the terms may be determined at which the wear-resistance of rubber coverage of surfaces of transporting and shifting buildings of enterprises of mining and metallurgical complex working in the conditions of shock loading does not yield to the metallic coverage, that allows to choose the material of protective sheeting of the equipment and constructions more reasonably.

**Keywords:** rubber lining-up, wear-resistance of coverage, theory of resilient collision of bodies, stalling speed of collision, choice of material of sheeting.

**Постановка проблеми.** Резина прочно заняла ведущие позиции, как конструкционный материал для износостойких покрытий и футеровок поверхностей бункеров, рудоспусков, перегрузочных узлов, непосредственно контактирующих с перерабатываемым материалом. Дальнейшее внедрение гуммированных покрытий взамен металлических зачастую сдерживается отсутствием методик инженерных расчетов, которые обоснуют преимущества резиновых элементов, применяемых в качестве покрытий и футеровок, перед металлическими.

**Анализ последних публикаций.** Анализ литературных источников показывает, а длительная практика эксплуатации машин и сооружений с резиновыми футеровками, в том числе и с участием авторов, подтверждает, что резина как конструкционный материал, обладает удельным весом в 6-7 раз меньшим, чем удельный вес стали, способностью к большим обратимым деформациям, а также к выдерживанию значительного количества циклов силовых нагрузений без разрушения, что определяют высокую износостойкость и стойкость под ударными и контактными нагрузками, обеспечивает снижение массы оборудования и сооружений, легкость установки и замены футеровки, а также уменьшение потребления электроэнергии, что отражено в публикациях [1-5], в которых подробно рассматривается использование резиновых футеровок и покрытий для защиты от износа мельниц, дробилок, скипов, кузовов тяжелых автомобилей, течек, перепусков и т.д.

**Цель работы.** Проблема расширения области использования износостойких резиновых покрытий поверхностей транспортирующих и перегрузочных сооружений предприятий горно-металлургического комплекса может быть решена путем разработки методики, определяющей условия, при которых резиновые элементы, применяемых в качестве покрытий и футеровок будут иметь преимущества перед металлическими.

Целью данной работы является обоснование и определение условий, при которых износостойкость резиновых поверхностей бункеров, рудоспусков, перегрузочных узлов, непосредственно контактирующих с перерабатываемым материалом и работающих в условиях ударного нагружения, не уступает металлическим покрытиям.

**Результаты исследований.** Процесс разрушения металла и резины при ударных нагрузках имеет существенные отличия. Однако имеются и общие закономерности, вызванные спецификой взаимодействия технологической загрузки и футеровки.

Один из самых простых критериев для сравнения износостойкости по отношению к ударным нагрузкам можно получить на основе классической теории Герца упругого столкновения тел [6, 7].

Предполагаем, что сталкивающиеся тела представляют собой падающую сферу и полупространство, тогда из теории Герца следует выражение для наибольшей силы  $F_{\max}$ , действующей на площади контакта соударяющихся тел:

$$F_{\max} = \left( \frac{20}{3} \pi d \right)^{3/5} R^2 \left[ \frac{1}{6 \left( \frac{1-q_1^2}{E_1} + \frac{1-q_2^2}{E_2} \right)} \right]^{2/5} \cdot v^{6/5} \quad (1)$$

где  $d$  – плотность материала сферы;  $R$  – радиус сферы;  $q_1, q_2$  – коэффициенты Пуассона для сферы и полупространства;  $E_1, E_2$  – соответствующие модули Юнга для сферы и полупространства;  $v$  – скорость сферы перед соударением.

Радиус проекции поверхности контакта  $r_e$  на плоскую границу полупространства определяем из выражения:

$$r_e = \left[ \frac{3}{4} F_{\max} R \left( \frac{1-q_1^2}{E_1} + \frac{1-q_2^2}{E_2} \right) \right]^{1/3} \quad (2)$$

Поэтому среднее давление  $P_{cp}$  на площадке контакта:

$$P_{cp} = \frac{F_{\max}}{\pi r_e^2} = \frac{2}{3} \left[ \frac{40d}{\pi^4} \left( \frac{1}{\frac{1-q_1^2}{E_1} + \frac{1-q_2^2}{E_2}} \right)^4 \right]^{1/5} \cdot v^{2/5} \quad (3)$$

Согласно теории Герца,  $P_{cp}$  составляет две трети наибольшего давления  $P_{\max}$ , имеющего место в центре площадки контакта. Пусть наибольшая ударная нагрузка, которую можно приложить к телу, не причиняя ему разрушения, равна  $\sigma_{\max}$ . В случае металла эта нагрузка влечет за собой начало пластического течения. Тогда наибольшее среднее давление на поверхности контакта, которое может быть приложено при совершенно упругом ударе, равно  $2/3 \sigma_{\max}$ .

Подставляя это значение в формулу (3), получаем выражение для критической скорости столкновения  $v_{\max}$ , при которой достигается предел прочности материала:

$$v_{\max} = \frac{\pi \sigma_{\max}^{5/2}}{2\sqrt{10}} \left( \frac{1}{d} \right)^{1/2} \left( \frac{1-q_1^2}{E_1} + \frac{1-q_2^2}{E_2} \right)^2 \quad (4)$$

Для материала, лучше сопротивляющегося разрушению частицами, ударяющими по перпендикулярно к его поверхности (к поверхности полупространства), величина  $v_{\max}$  будет иметь большее значение.

Таким образом,  $v_{\max}$  можно считать характеристическим параметром – критерием прочности материала по отношению к нормальному удару абразивной частицы.

Для сравнения износостойкости двух материалов составляем соотношение критических скоростей  $K$ :

$$K = \sqrt{\frac{v_{1\max}}{v_{2\max}}} = \left( \frac{\sigma_{1\max}}{\sigma_{2\max}} \right)^{5/4} \left( \frac{\frac{1-q_1^2}{E_1} + \frac{1-q_3^2}{E_3}}{\frac{1-q_2^2}{E_2} + \frac{1-q_3^2}{E_3}} \right), \quad (5)$$

где индексы 1 и 2 относятся к сравниваемым материалам полупространства, а 3 – к материалу ударяющей частицы.

Критическое условие, на основании которого проводится прогноз, записывается в виде  $K < 1$ .

Для примера рассмотрим следующие возможные случаи.

1. Резиновая футеровка, работающая в пределах переменного модуля упругости  $E_2=3,5-4,0$  МПа ( $\sigma_{2\max}=18$  МПа;  $q_2=0,45$ ), сравнивается со стальной (сталь 110Г13Л,  $\sigma_{1\max}=550$  МПа;  $E_1=210$  ГПа;  $q_1=0,31$ ), при этом в качестве абразивной среды использована металлическая дробь  $E_3=210$  ГПа;  $q_3=0,31$ .

Подставив данные в формулу (5), вычислим значения критерия  $K$  в виде:

$$K = \left( \frac{550}{18} \right)^{5/4} \left( \frac{\frac{1-0,31^2}{2,1 \cdot 10^5} + \frac{1-0,31^2}{2,1 \cdot 10^5}}{\frac{1-0,31^2}{2,1 \cdot 10^5} + \frac{1-0,45^2}{4,0}} \right) \cong 0,8$$

Поскольку выполняется условие  $K < 1$ , то критическая скорость разрушения для стали 110Г13Л при данных условиях меньше, чем для резины, иначе говоря, резиновая футеровка лучше сопротивляется абразивному износу.

Подставив данные в формулу 4 приведенной методики, определим критическую скорость столкновения металлической дроби диаметром 2 мм с резиновым, покрытием, при которой достигается предел прочности резины:

$$v_{\max} = \frac{3,14 \cdot (18 \cdot 10^6)^{5/2}}{2\sqrt{10}} \left( \frac{1}{0,002} \right)^{1/2} \left( \frac{1-0,31^2}{210 \cdot 10^6} + \frac{1-0,45^2}{4 \cdot 10^6} \right)^2 = 15,5 \text{ м/с}$$

2. Резиновая футеровка, работающая в пределах переменного модуля упругости  $E_2=3,5-4,0$  МПа ( $\sigma_{2\max}=18$  МПа;  $q_2=0,45$ ), сравнивается со стальной (сталь 110Г13Л,  $\sigma_{1\max}=550$  МПа;  $E_1=210$  ГПа;  $q_1=0,31$ ), при этом поверхность нагружается потоком падающих частиц гранитного щебня, для которого  $E_3=49$  ГПа;  $q_3=0,3$ .

Подставив данные в формулу (5), вычислим значения критерия  $K$  в виде:

$$K = \left( \frac{550}{18} \right)^{5/4} \left( \frac{\frac{1-0,31^2}{2,1 \cdot 10^5} + \frac{1-0,3^2}{0,49 \cdot 10^5}}{\frac{1-0,31^2}{2,1 \cdot 10^5} + \frac{1-0,45^2}{4,0}} \right) \cong 0,008$$

Таким образом, критическая скорость разрушения для резины при данных условиях намного больше, чем для стали, т.е. резиновая футеровка лучше сопротивляется абразивному износу при нагружении потоком падающих каменных или рудных частиц.

Воспользовавшись формулой 4 приведенной методики, определим критическую скорость столкновения гранитных частиц диаметром 10 мм с резиновым, покрытием, при которой достигается предел прочности резины:

$$v_{\max} = \frac{3,14 \cdot (18 \cdot 10^6)^{5/2}}{2\sqrt{10}} \left( \frac{1}{0,01} \right)^{1/2} \left( \frac{1 - 0,3^2}{49 \cdot 10^6} + \frac{1 - 0,45^2}{4 \cdot 10^6} \right)^2 = 194,8 \text{ м/с}$$

**Выводы.** Пользуясь приведенной методикой, можно прогнозировать сравнительную износостойкость резиновых и стальных футеровок, работающих при ударном воздействии, а также определять параметры нагружения, при которых обеспечивается работа резинового покрытия в пределах прочности материала, что позволит расширить область применения износостойких резин и обеспечит уменьшение массы оборудования, легкость установки и замены футеровки, а также снижения потребления электроэнергии.

### Литература

1. Тарасенко А.А. Защитные футеровки и покрытия горно-обогатительного оборудования / А.А. Тарасенко, Е.Ф. Чижик, А.А. Взоров, В.А. Настоящий. – М.; Недра, 1985. – 204 с.
2. Франчук В.П. Рабочие поверхности и футеровки барабанных и вибрационных мельниц / В.П. Франчук, В.А. Настоящий, А.Е. Маркелов, Е.Ф. Чижик. – Комсомольск - Кременчук; Науково-виробниче видання, 2008. – 382 с.
3. Настоящий В.А. К вопросу прогнозирования долговечности резиновых поверхностей измельчительного и транспортного оборудования работающих в условиях ударно-абразивного износа / В.А. Настоящий, А.А. Тарасенко, С.А. Джирма // Вибрация в технике и технологиях. – 1998. – №3. – С. 68-69.
4. Настоящий В.А. О возможности повышения технологических показателей измельчительного и транспортного оборудования при применении резиновых футеровок специальных конструкций / В.А. Настоящий, В.В. Яцун, С.О. Джирма // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини – 2001. – №58. – С. 28-31.
5. Настоящий В.А. О выборе критерия для прогнозирования износостойкости эластомерных покрытий транспортирующих и перегрузочных сооружений предприятий горно-металлургического комплекса / Настоящий В.А., Яцун В.В., Джирма С.О. // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Одеса: ОДАБА, 2013 – Вип. № 49, Ч. 1. – С. 257-261.
6. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле / С.П. Тимошенко. – М.: Наука, 1959. – 440 с.
7. Тимошенко С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гурьер – М.: Наука, 1975. – 576 с.

Стаття надійшла 15.05.2017