

## АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТНОГО НАГРУЖЕНИЯ ЗАЩИТНОЙ ЭЛАСТИЧНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ГОРНЫХ МАШИН

*В.П. Надутый, П.В. Левченко, ИГТМ НАН Украины, г. Днепрпетровск Украина  
Д.В. Белюшин, ГВУЗ «НГУ», г. Днепрпетровск, Украина*

В данной работе путём регрессионного анализа ранее полученных экспериментальных данных установлена зависимость силы вдавливания от параметров резиновой футеровки (площадь и твёрдость резины), которая характеризует величину допустимой нагрузки в области линейной деформации резины. Показано, что увеличение площади резинового слоя приводит к повышению влияния эффекта объёмного сжатия на деформацию резины, что в свою очередь позволяет в уменьшить толщину защитной футеровки.

**Введение.** На протяжении многих лет при добыче и переработке полезных ископаемых получил широкий опыт применения полимерных материалов, позволяющих снижать металлоёмкость и энергопотребление машин и оборудования. В качестве защитных футеровок тяжело нагруженных машин применяются эластомеры (резина, полиуретана и др.). К примеру, резиновая футеровка используется для защиты рабочих поверхностей кузовов карьерных самосвалов, барабанов шаровых мельниц, лотков вибропитателей и конвейеров, бункеров, течек и др. Футерование рабочих поверхностей резиной позволяет защитить рабочие органы от абразивного износа и снизить ударные нагрузки, возникающие при загрузке кусковых материалов. Несмотря на то, что резина имеет на порядок ниже прочностные характеристики, чем защищаемая стальная поверхность, срок её службы довольно часто превышает показатели срока службы металлических поверхностей из легированных сталей. В результате эксплуатации машины напряжения при ударах по защищенной резиной металлической поверхности рабочих органов машин, как минимум, в 3 – 10 раз меньше, чем при ударе по незащищенной поверхности. При правильно подобранной толщине и твёрдости футеровки не происходит её разрушение (пробой).

Так, в выполненных ранее экспериментальных и теоретических исследованиях [1, 2] было установлено, что при ударе через футеровку происходит значительная диссипация энергии удара в слое футеровки. Кроме того, как показали дальнейшие исследования [3], площадь контакта соударения через резину значительно (в 5 – 10 раз) больше точечного контакта при жёстком ударе о металлическую поверхность. В результате чего время контакта при мягком ударе в 3 – 4 раза больше, чем при жёстком. Таким образом, возникает не точечная нагрузка (напряжение в точке соударения), а распределённая по площади мягкого контакта (участок вдавливания резины). При этом, импульс силы удара растянут во времени при той же выполненной энергии удара.

Вышеперечисленные факты объясняют положительное влияние резиновой футеровки на снижение ударных нагрузок в защищаемой металлической поверхности при условии правильного выбора толщины резинового слоя. Последний должен соответствовать максимальной энергии удара, и, при этом, в зоне контакта испытывать деформацию не более 20 % от своей толщины (линейная зона деформации) для предотвращения пробоя резины. При решении контактной задачи удара о резиновую футеровку из этих соображений определяется указанная допустимая деформация в площади соударения. В этом случае в расчётах используется статический или динамический модуль Юнга для резины.

При контактном взаимодействии кусковой горной массы с резиновой футеровкой авторам [4] удалось определить эмпирическую взаимосвязь между глубиной ( $z$ , мм) и силой ( $P$ , Н) вдавливания на основе обобщенной зависимости Н.А. Кильчевского:

$$z = A \cdot P^B,$$

где коэффициент пропорциональности  $A$  и показатель степени  $B$ , зависящие от диаметра сферического индентора  $D$ , толщины резинового слоя  $h$  и равновесного модуля сдвига  $G$  материала, определены экспериментальным путём. Показано, что отклонение теоретических

кривых, основанных на теории контактного взаимодействия Г. Герца [5], по отношению к экспериментальным точкам достигают 150 % и более, что можно объяснить учётом эффекта объёмного сжатия резины.

В работе [6] авторы экспериментально рассмотрели вопрос ударного взаимодействия кусковой горной массы с рабочими поверхностями, что позволило определить доминирующие факторы и их числовые значения в процессе взаимодействия непосредственно в зоне контакта куска падающей горной массы с поверхностью рабочего органа (с защитным слоем и без него). Впоследствии [7] удалось установить, путём регрессионного анализа, статистические модели напряжений ( $\sigma$ , МПа) в коробе рабочего органа и глубины вдавливания падающей горной массы ( $z$ , мм) в зависимости от энергии удара и параметров резиновой футеровки:

$$\sigma = 200,585 - 5,119 \cdot E_r + 1,755 \cdot E_k - 4,912 \cdot h_r + 0,041 \cdot E_r^2 - 0,007 \cdot h_r^2 - 0,051 \cdot E_k \cdot h_r ;$$

$$z = 7,066 - 0,145 \cdot E_r + 0,035 \cdot E_k + 0,275 \cdot h_r + 0,00074 \cdot E_r^2 + 0,00053 \cdot E_k^2 - 0,019 \cdot h_r^2 - 0,0025 \cdot E_r \cdot h_r + 0,0019 \cdot E_k \cdot h_r$$

где  $E_r$  – твёрдость резины по Шору, ед.;  $h_r$  – толщина резины, мм;  $E_k$  – энергия удара, Дж.

Деформирование резины при ударных нагрузках происходит не как упругого элемента в площади контакта соударения, а как соударение с пластиной с конечными размерами, в десятки раз превышающими площадь контакта соударения. Таким образом, при деформировании резина будет испытывать объёмное сжатием вокруг площади контакта. Однако при расчётах жёсткостных показателей эластомерных футеровок, исходя из которых происходит выбор её толщины, не учитывается влияние объёмного модуля.

В работе [8] авторами экспериментально установлено влияния эффекта объёмного сжатия при контактных деформациях защитных покрытий рабочих поверхностей горных машин из эластомеров. Установлено, что контактная жёсткость деформируемой резиновой пластины футеровки увеличивается на 20 – 45 % по отношению к жёсткости элементарного объёма (без учёта объёмного сжатия).

**Цель данной работы** – выполнить регрессионный анализ зависимости силы вдавливания от площади и твёрдости резины при заданной глубине вдавливания для определения напряжений в защищаемой поверхности машины..

**Методика экспериментальных исследований** [8] предусматривала статические испытания показателей работы резины при ударных нагрузках. В случае ударного взаимодействия сила удара принята равной силе вдавливания, как показано в процессе стендовых испытаний (рис. 1.).

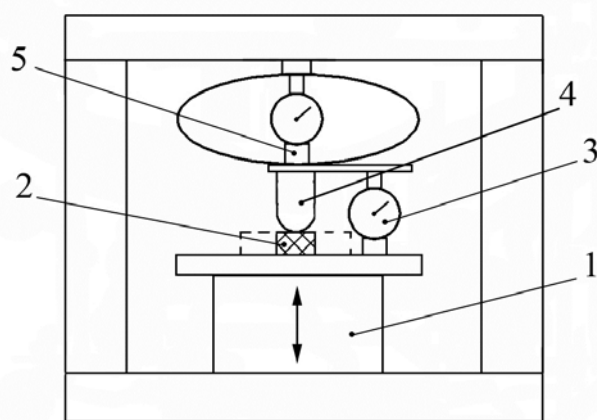


Рис. 1. Схема лабораторного стенда

1 – механический пресс; 2 – резина разной площади; 3 – индикатор перемещения; 4 – сферический индентор; 5 – динамометр

Лабораторный стенд состоит из механического пресса 1, резины разной площади 2, индикатора перемещения 3, сферического индентора 4 и динамометра 5. Исследовался процесс вдавливания сферического индентора 4 диаметром  $D = 58$  мм в листовую резину толщиной 24 мм и твердостью по Шору  $E_r = 52-64$ . Сила внедрения индентора 4 в резину создавалась ручным механическим прессом 1. Фиксировались глубина погружения индентора в резину  $z$  с помощью индикатора перемещения часового типа 3 и сила вдавливания  $P$ , которая измерялась динамометром 5 (ДОСМ 3 – 0,1). В данных экспериментах постоянной величиной являлась глубина погружения индентора в резину  $z = 4$  мм, а переменными величинами – площадь  $S_r$  и твердость резины  $E_r$ , при прочих равных условиях. Величина  $z$  выбиралась исходя из условия деформации резинового слоя не более чем на 20 %, так как в области малых деформаций зависимость "сила-деформация" линейна и наиболее предпочтительна для предотвращения разрушения резины.

По результатам лабораторных исследований [8] осуществлён графический анализ в виде пространственной модели зависимости силы вдавливания от площади  $S_r$ ,  $см^2$  и твердости резины  $E_r$ , ед.

Регрессионные зависимости силы вдавливания (функция отклика) от вышеперечисленных факторов получали на основании выполненных исследований, с общим объёмом статистических данных  $n = 34$ , в следующем виде:

$$P = a_0 + a_1 \cdot S_r + a_2 \cdot E_r + a_3 \cdot S_r \cdot E_r + a_4 \cdot S_r^2 + a_5 \cdot E_r^2.$$

Общее количество слагаемых уравнения регрессии составило  $m = 5$ . Расчёт данной модели методом наименьших квадратов производился средствами прикладного пакета обработки статистических данных SPSS Statistics с применением встроенной функции "Шаговый отбор". При работе данного алгоритма независимые переменные ( $x_i$ ), которые имеют наибольшие коэффициенты частичной корреляции с зависимой переменной ( $P$ ), пошагово включаются в регрессионное уравнение [9]. После каждого шага оценивалась адекватность полученной модели  $F$  (статистика Фишера) и коэффициент детерминации  $R^2$ , а факторы, коэффициенты регрессии которых по статистике Стьюдента оказывались незначимыми ( $t_{tabl} \geq t_{ai}$ ), исключались из регрессионной зависимости без особого влияния на результативный признак  $P$ . По знаку коэффициента регрессии  $a_i$  можно определить влияния соответствующего фактора  $x_i$  на выход меди: положительный знак свидетельствует о возрастании функции  $P$  при увеличении фактора  $x_i$ , отрицательный – о снижении [10], а абсолютное значение коэффициента  $a_i$  показывает, на сколько изменится результативный признак при изменении соответствующего фактора на единицу.

Расчётная зависимость силы вдавливания аппроксимируется следующим уравнением:

$$P = -170,795 + 0,055 \cdot S_r \cdot E_r - 0,16 \cdot S_r^2 + 0,138 \cdot E_r^2.$$

При этом статистика Фишера  $F = 375,54$ , а коэффициент множественной корреляции  $R^2 = 0,986$  показывает, что изменчивость функции  $P$  на 98,6 % объясняется влиянием учтённых в модели факторов. Данная зависимость, в виде поверхности, представлена на рис. 2.

Зависимость силы вдавливания от площади резины  $S_r$  имеет параболический характер: сила вдавливания  $P$  повышается с увеличением площади резины, при прочих равных условиях (при  $E_r = const$ ). Здесь проявляется эффект объёмного сжатия – чем больше площадь резины площади контакта, тем больше проявляется его влияние.

Аналогичный характер имеет зависимость силы вдавливания  $P$  от твердости резины  $E_r$ .

**Выводы.** Установленная регрессионная зависимость силы вдавливания от параметров резиновой футеровки, характеризующая величину допустимой нагрузки в области линейной деформации резины. При увеличении площади резинового слоя повышается влияние эффекта объёмного сжатия, приводящего, в некоторых случаях, к двухкратному увеличению модуля упругости

резины. Последний, в первую очередь, оказывает существенное влияние на расчётные параметры защитных эластомерных футеровок, позволяя уменьшить её толщину в области допустимых деформаций. К тому же, это позволит сократить себестоимость футеровки.

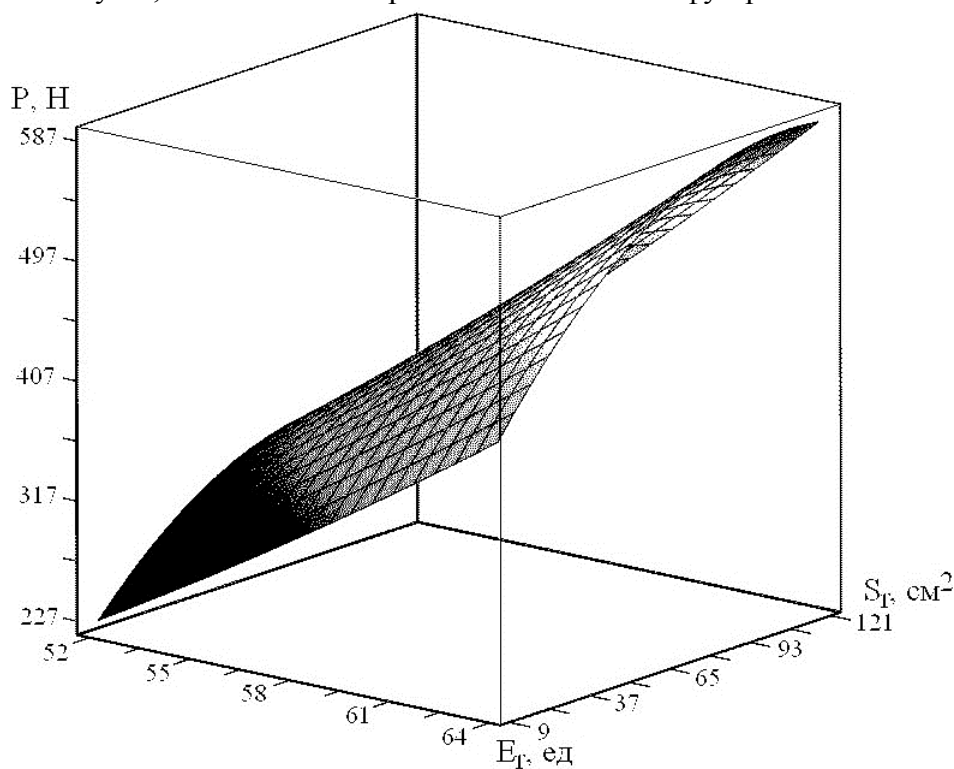


Рис. 2. Расчётная зависимость силы вдавливания  $P$  от площади  $S_T$  и твердости резины  $E_T$ .

#### Список литературы

1. Потураев В.Н. Резина в горном деле / В.Н. Потураев, В.И. Дырда, В.П. Надутый. – М.: Недра, 1974. – 150 с.
2. Потураев В.Н. Прикладная механика резины / В.Н. Потураев, В.И. Дырда, И.И. Круш. – К.: Наук. думка, 1975. – 214 с.
3. Надутый В.П. Исследование напряженного состояния рабочего органа вибрационной машины с защитным слоем при ударных нагрузках / В.П. Надутый, В.В. Сухарев, Д.В. Белюшин // Вібрації в техніці та технологіях. – 2012. – Вип. 4(68). – С. 71-75.
4. Надутый В.П. Экспериментальные исследования взаимодействия жёсткого штампа с эластичным слоем / В.П. Надутый, Ю.Я. Ободан // Транспортные и горные машины: Сб. научн. Тр. – Киев: Наук. Думка, 1983. – С. 69-73.
5. Голоскоков Е.Г. Нестационарные колебания деформируемых систем /Е.Г. Голоскоков, А.П. Филиппов. – Киев: Наук. Думка, 1977. – 338 с.
6. Надутый В.П. Определение напряженного состояния вибропитателя для выпуска руды из блока при ударных нагрузках / В.П. Надутый, В.В. Сухарев, Д.В. Белюшин // Metallurgical and Mining Industry. – Dnepropetrovsk. – 2013. – № 1. – С. 60-62.
7. Надутый В.П. Аппроксимация результатов экспериментальных исследований ударного взаимодействия горной массы с рабочими поверхностями вибромашин / В.П. Надутый, В.В. Сухарев, Д.В. Белюшин // Вібрації в техніці та технологіях: Всеукр. наук.-техн. журнал. – Вінниця, 2013. – Вип. 1. – С. 43-50.
8. Надутый В.П. Исследование влияния эффекта объёмного сжатия при определении параметров защитных покрытий из эластомеров / В.П. Надутый, В.В. Сухарев, Д.В. Белюшин // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. – Дніпропетровськ. – 2013. – Вип. 109. – С. 64-72.
9. Бююль А. SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей: Пер. с нем. / Бююль А., Цефель П. – СПб.: ООО «ДиаСофт ЮП», 2005. – 608 с.
10. Кухарев В.Н. Экономико-математические методы и модели в планировании и управлении: Учебник / В.Н. Кухарев, В.И. Салли, А.М. Эрперт. – К.: Выща шк., 1991. – 303с.