
УДК 622.002.5:621.8.031.4

Сухарев В.В., канд. техн. наук
Левченко П.В.
(ИГТМ НАН Украины),
Белюшин Д.В.
(ГВУЗ «НГУ»)

**АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА МЕХАНИЗМ
УДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛАСТИЧНОЙ ФУТЕРОВКИ С
ГОРНОЙ МАССОЙ**

Сухарев В.В., канд. техн. наук
Левченко П.В.
(ИГТМ НАН України),
Белюшин Д.В.
(ДВНЗ «НГУ»))

**АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА МЕХАНІЗМ
УДАРНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛАСТИЧНОГО ФУТЕРУВАННЯ З
ГІРСЬКОЮ МАСОЮ**

Sukharyev V.V., Ph.D. (Tech.)
Levchenko P.V.
(IGTM NAS of Ukraine),
Beliushin D.V.
(SHEI "NMU")

**ANALYSIS OF FACTORS IMPACTING ON MECHANISM OF SHOCK
INTERACTION BETWEEN ELASTIC LINING AND ROCK MASS**

Аннотация. Целью данного исследования являлось определение факторов и способов регулировки защитных свойств эластичной футеровки путем анализа ударного взаимодействия горной массы с футерованной рабочей поверхностью.

Предыдущие исследования показали, что основными факторами, оказывающими влияние на защитные свойства футеровки, является ее толщина, твердость и сила удара, при этом не учитывалась комплексное воздействие изменения площади резиновой футеровки или модуля объемного сжатия. Эксперименты были проведены на лабораторном стенде, который моделирует короб вибропитателя в соотношении 1:4. В ходе эксперимента были установлены зависимости глубины вдавливания, времени удара и напряжения от энергии удара, твердости и площади резины. При этом определено, что использование эффекта объемного сжатия позволяет снизить напряжений в защищаемых рабочих поверхностях на 20-25%. Полученные результаты могут быть применены при разработке новых конструкций эластичных футеровок с более высокими защитными свойствами и позволят уменьшить их стоимость.

Ключевые слова: эластичная футеровка, удар, напряжение.

Введение. Снижение затрат на разработку месторождений полезных ископаемых, а также повышение эффективности переработки горной массы является актуальной проблемой, требующей изучения новых способов и методов решения этой задачи. Одной из основных статей расходов на переработку полезных ископаемых являются затраты на покупку нового или ремонт старого оборудования. Главной причиной выхода из строя оборудования, предназначенного для транспортировки и переработки горной массы (грохотов, вибропитателей, конвейеров), являются ударные нагрузки и абразивный износ. С целью повышения надежности и срока службы этих машин используются эластичные защитные покрытия их рабочих органов (коробов, приемных площадок). Это позволяет снизить значительные контактные напряжения и деформации, возникающие при ударном взаимодействии рабочей поверхности машины с перерабатываемой кусковой массой.

Научные исследования в данной области опираются на основы расчета колебаний и удара [1-2], а также посвящены решению вопросов, связанных с расчетами и изготовлением защитных резиновых футеровок, которые показали высокую эффективность в предохранении от ударных нагрузок и износа рабочих поверхностей горных машин [3]. Экспериментальному изучению ударного взаимодействия кусковой горной массы с рабочими поверхностями посвящена работа, выполненная ранее авторами статьи [4]. Однако в этих исследованиях остается неучтенным комплексное влияние изменения площади эластичной футеровки, ведь при решении контактной задачи удара о резиновую футеровку и расчета допустимой деформации используется стандартный динамический модуль Юнга, который не учитывает влияние площади футеровки.

Целью исследований авторов является определение факторов и способов регулировки защитных свойств эластичной футеровки путем анализа ударного взаимодействия горной массы с футерованной рабочей поверхностью разной площади.

Методика исследований предусматривает проведение экспериментов с целью определения факторов, влияющих на механизм ударного взаимодействия эластичной футеровки с горной массой, на лабораторном стенде, показанном на рис. 1., который моделирует короб вибропитателя в соотношении 1:4.

Стенд состоит из опорной рамы 1, стоек 2, по которым перемещается поперечная балка с фиксатором 3 и набором грузов 4, при падении груза осуществлялась ударная нагрузка на модель металлического короба питателя 5, корпус которого установлен на упругие опоры 6. Груз представляет собой сферический индентор, диаметром $D = 58$ мм. Напряжения и время удара в коробе питателя фиксируются комплектом тензометрической аппаратуры 7, с учетом изменения твердости и площади резиновой футеровки 8. При заданной высоте падения груза H и его кинетической энергии E_k фиксировались величина напряжений в металле σ при ударе, продолжительность импульса максимального напряжения t (время удара) и площадь контакта, по которой определялась глубина вдавливания z падающего груза в резину. Кроме величины энергии удара в экспериментах варьировалась твердость резиновой футеровки E_r , определяемая стан-

дартным твердомером ТМ-2, а также ее площадь S , толщина резины оставалась постоянной и составляла 24 мм. Исследование проводилось в области малых деформаций резины (20-25% от ее толщины), во избежание повреждения эластичной футеровки.

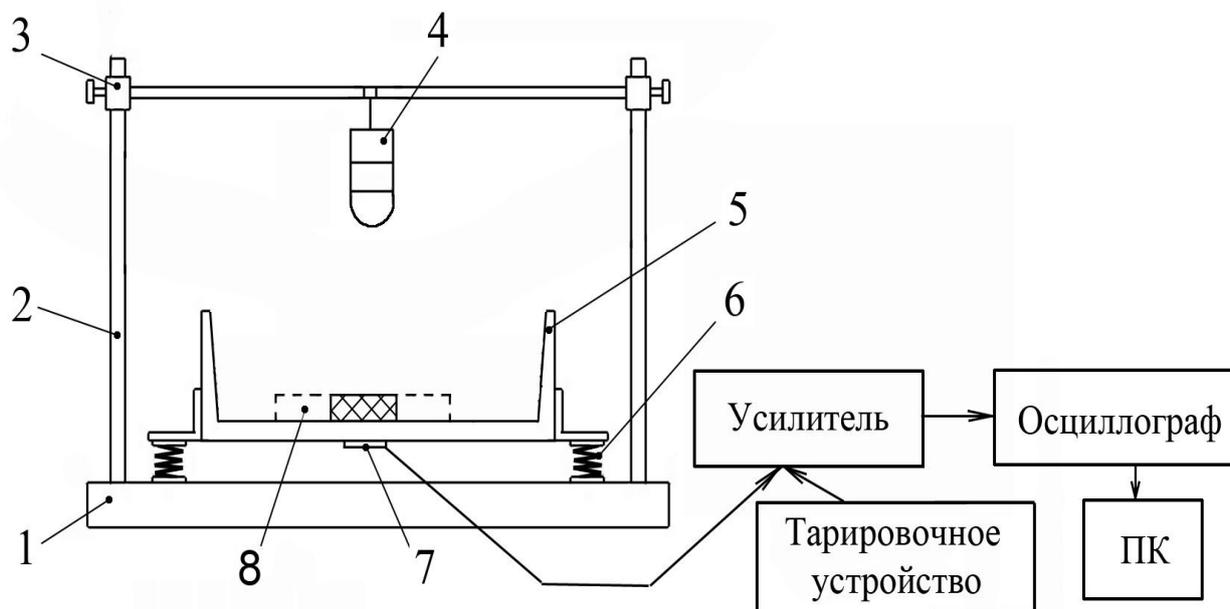
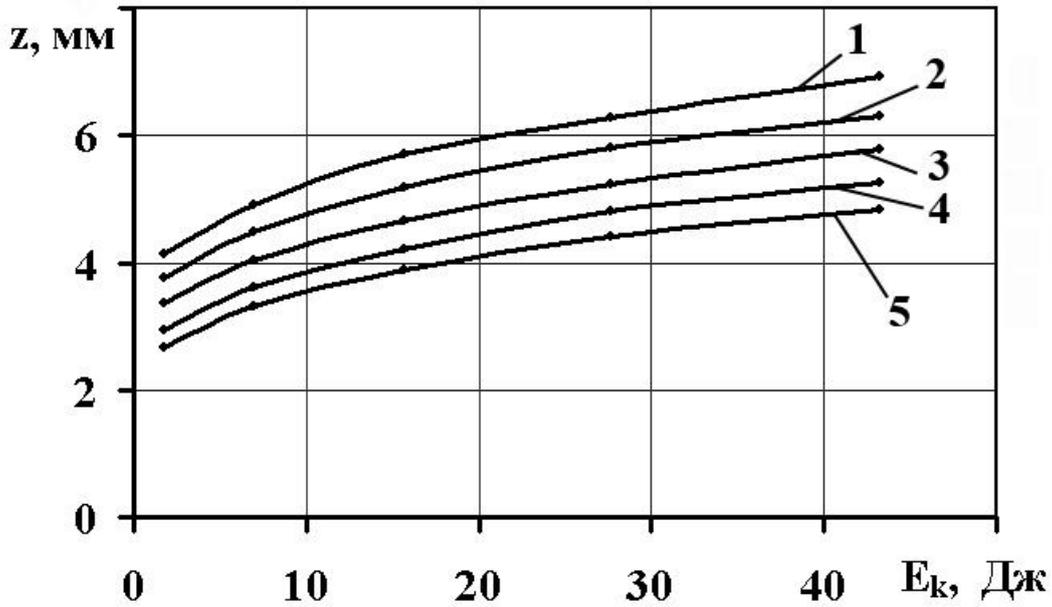


Рис. 1 – Схема лабораторного стенда

Экспериментальная часть. Одним из важнейших параметров при выборе футеровки является ее толщина, которая должна обеспечивать не только защиту рабочей поверхности горной машины, но выполнять условие предусматривающее отсутствие предельных деформаций резины, не допуская ее преждевременного износа. Предыдущими исследованиями установлено, что на изменение величины деформации резины или глубины удара z влияет энергия удара E_k и твердость резины E_r , но в этих исследованиях не было учтен фактор воздействия эффекта объемного сжатия, а именно изменение площади резины S , при постоянной величине диаметра индентора.

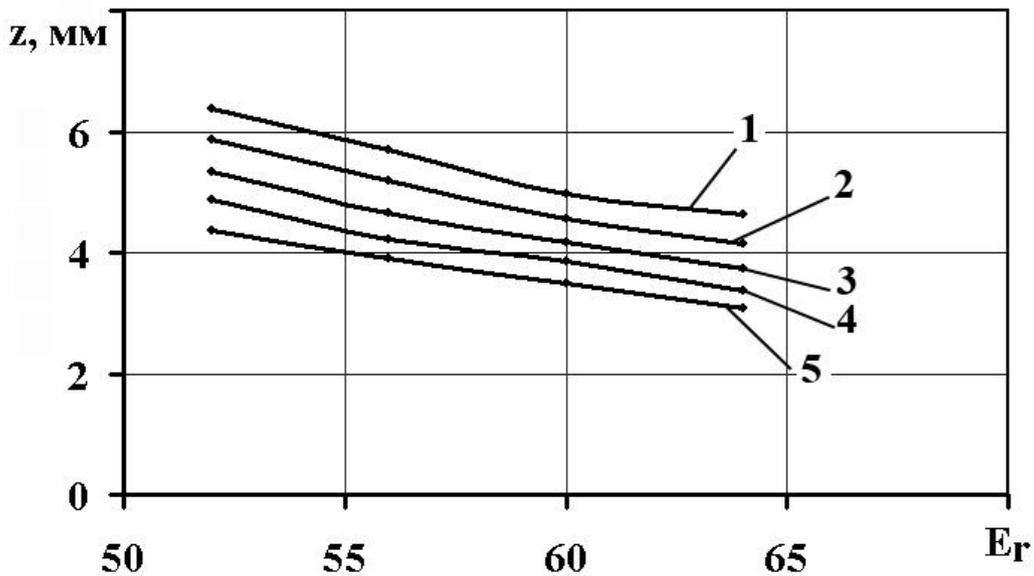
На рис. 2 представлены экспериментальные результаты определения зависимости глубины лунки z от энергии удара E_k при разной площади резины S_r и постоянной твердости резины $E_r = 56$. Характер зависимости глубины лунки от энергии удара слабонелиный, при увеличении силы удара величина деформации увеличивается, при этом характер зависимостей и их тенденция для разных площадей резины сохраняется.



1 – $S=9 \text{ cm}^2$; 2 – $S=25 \text{ cm}^2$; 3 – $S=49 \text{ cm}^2$; 4 – $S=81 \text{ cm}^2$; 5 – $S=121 \text{ cm}^2$

Рис. 2 – Зависимость глубины лунки z от энергии удара E_k при разной площади резины S

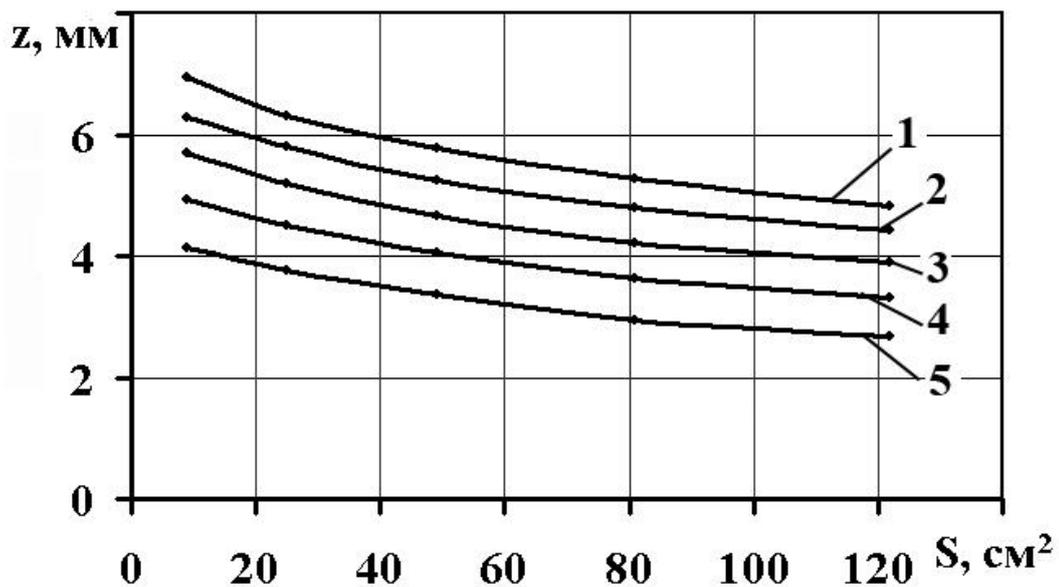
Зависимость глубины лунки z от твердости резины E_r при разной площади резины S и постоянной энергии удара $E_k = 15 \text{ Дж}$ представлена на рис. 3. В исследуемом диапазоне изменения твердости резины зависимость имеет линейный характер, при увеличении твердости резины происходит снижение деформации резины, что позволяет, увеличивая твердость резины, снижать ее толщину, а значит и стоимость.



1 – $S=9 \text{ cm}^2$; 2 – $S=25 \text{ cm}^2$; 3 – $S=49 \text{ cm}^2$; 4 – $S=81 \text{ cm}^2$; 5 – $S=121 \text{ cm}^2$

Рис. 3 – Зависимость глубины лунки z от твердости резины E_r при разной площади резины S

Влияние и характер зависимостей глубины лунки z от площади резины S при разной энергии удара E_k и постоянной твердости резины $E_r = 56$ представлен на рис. 4. Зависимость глубины лунки от площади резины имеет слабонелинейный характер, при увеличении площади резины по отношению к постоянной площади индентора происходит уменьшение деформации резины, что объясняется проявлением эффекта объемного сжатия, когда наличие резины вне границы площади отпечатка индентора приводит к увеличению жесткостных характеристик эластичной футеровки.

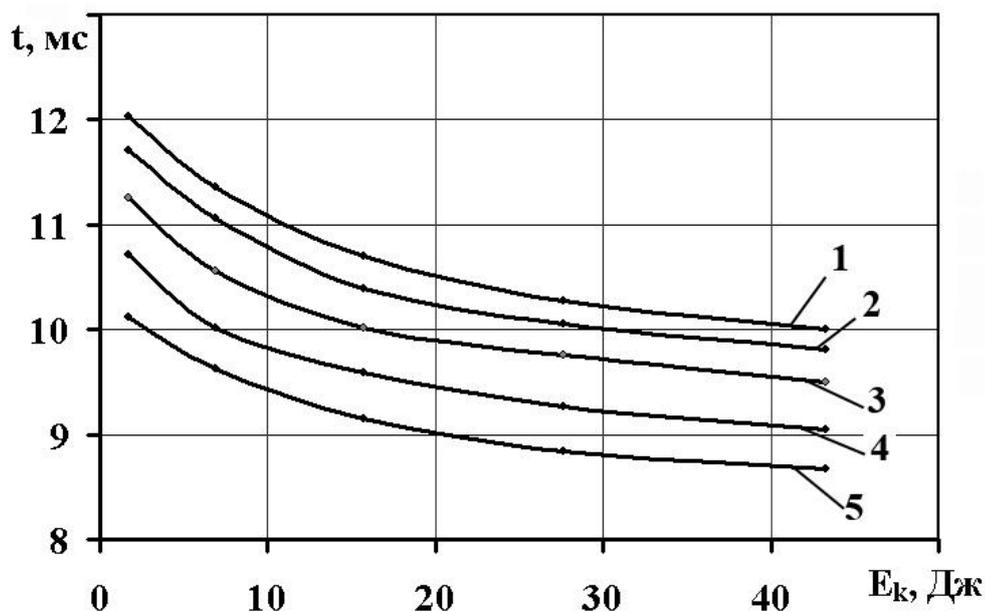


1 – $E_k = 43$ Дж; 2 – $E_k = 27$ Дж; 3 – $E_k = 15$ Дж; 4 – $E_k = 7$ Дж; 5 – $E_k = 1,7$ Дж

Рис. 4 – Зависимость глубины лунки z от площади резины S при разной энергии удара E_k

Время контакта также является одним из параметров, связанных с процессом выбора футеровки, несмотря на то, что величину времени удара не используют при стандартных расчетах защитной футеровки, как ее толщину и твердость, продолжительность импульса максимального напряжения t позволяет понять причины улучшения или ухудшения защитных свойств футеровки. Исходя из предыдущих исследований, был сделан вывод, что время удара необходимо увеличивать, ведь при равной ударной нагрузке пиковые напряжения в защищаемой поверхности будут меньше там, где время удара будет больше, что объясняется законом сохранения энергии.

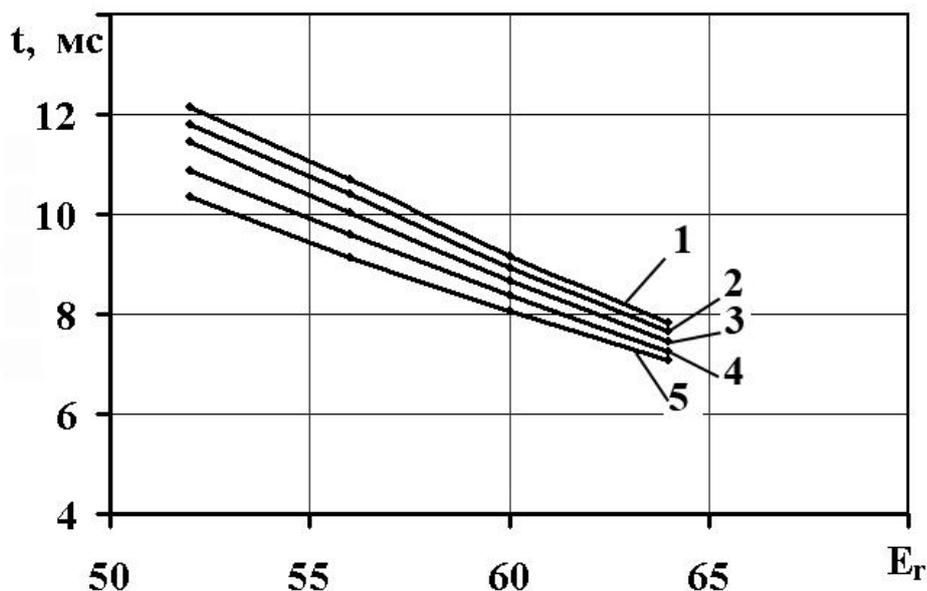
На рис. 5 представлены зависимости времени удара t от энергии удара E_k при разной площади резины S и постоянной твердости резины $E_r = 56$. Характер зависимости нелинейный, при увеличении силы удара происходит уменьшение времени удара, что объясняется уменьшением демпфирующих свойств и ростом жесткости резины вследствие увеличения скорости ударного импульса.



1 – $S = 9 \text{ см}^2$; 2 – $S = 25 \text{ см}^2$; 3 – $S = 49 \text{ см}^2$; 4 – $S = 81 \text{ см}^2$; 5 – $S = 121 \text{ см}^2$

Рис. 5 – Зависимость времени удара t от энергии удара E_k при разной площади резины S_r

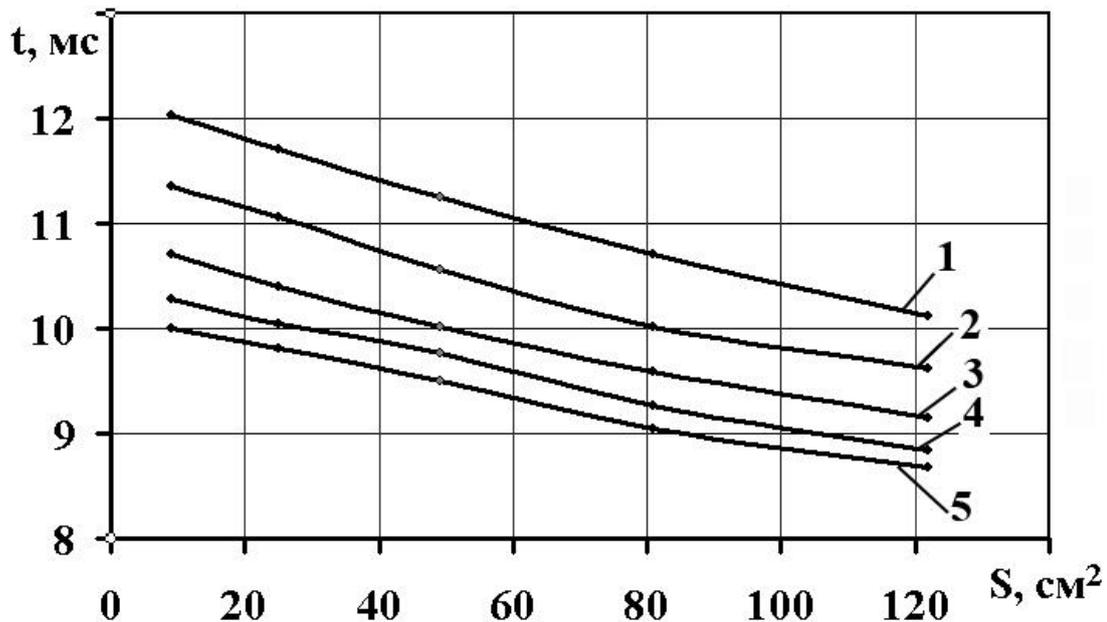
Зависимость времени удара t от твердости резины E_r при разной площади резины S и постоянной энергии удара $E_k = 15 \text{ Дж}$ представлена на рис.6. В исследуемом диапазоне изменения твердости резины зависимость имеет линейный характер, при увеличении твердости эластомера и одинаковой энергии удара происходит уменьшение времени удара, что приводит к росту напряжения в защищаемой поверхности, вследствие снижения демпфирующих и диссипативных свойств в твердой резине.



1 – $S = 9 \text{ см}^2$; 2 – $S = 25 \text{ см}^2$; 3 – $S = 49 \text{ см}^2$; 4 – $S = 81 \text{ см}^2$; 5 – $S = 121 \text{ см}^2$

Рис. 6 – Зависимость времени удара t от твердости резины E_r при разной площади резины S_r

Характер зависимости времени удара t от площади резины S при разной энергии удара E_k и постоянной твердости резины $E_r=56$ линейный. Уменьшение площади резиновой футеровки приводит к увеличению время удара, что благоприятно сказывается на снижении напряжения в защищаемой поверхности.

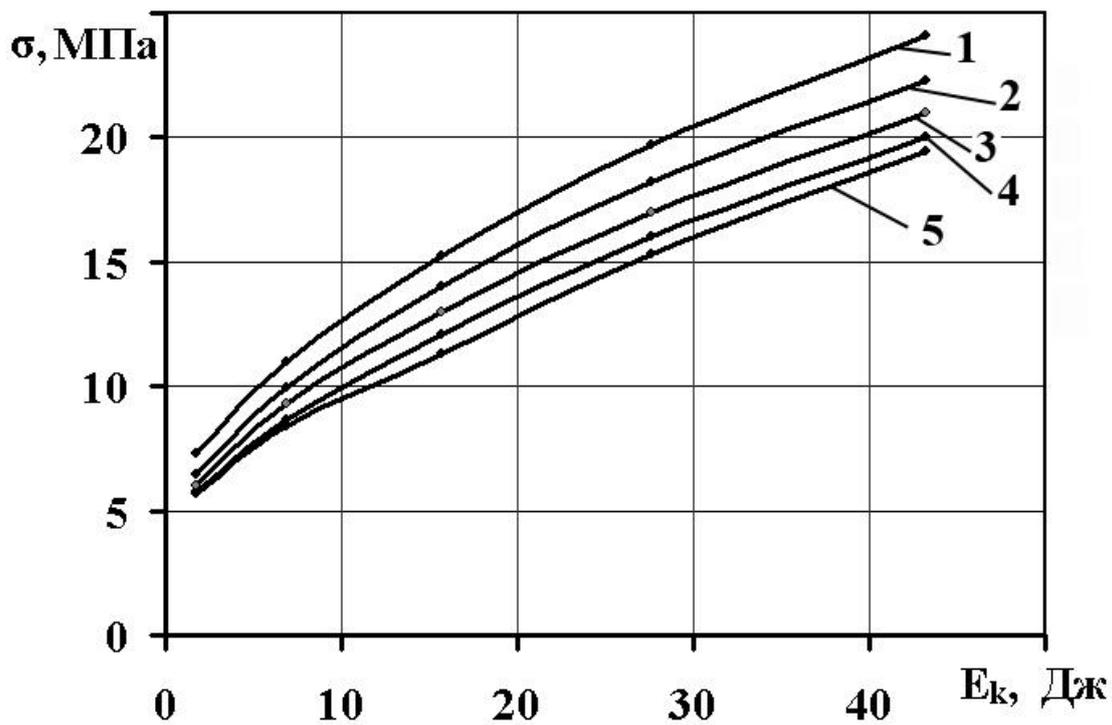


1 – $E_k = 1,7$ Дж; 2 – $E_k = 7$ Дж; 3 – $E_k = 15$ Дж; 4 – $E_k = 27$ Дж; 5 – $E_k = 43$ Дж

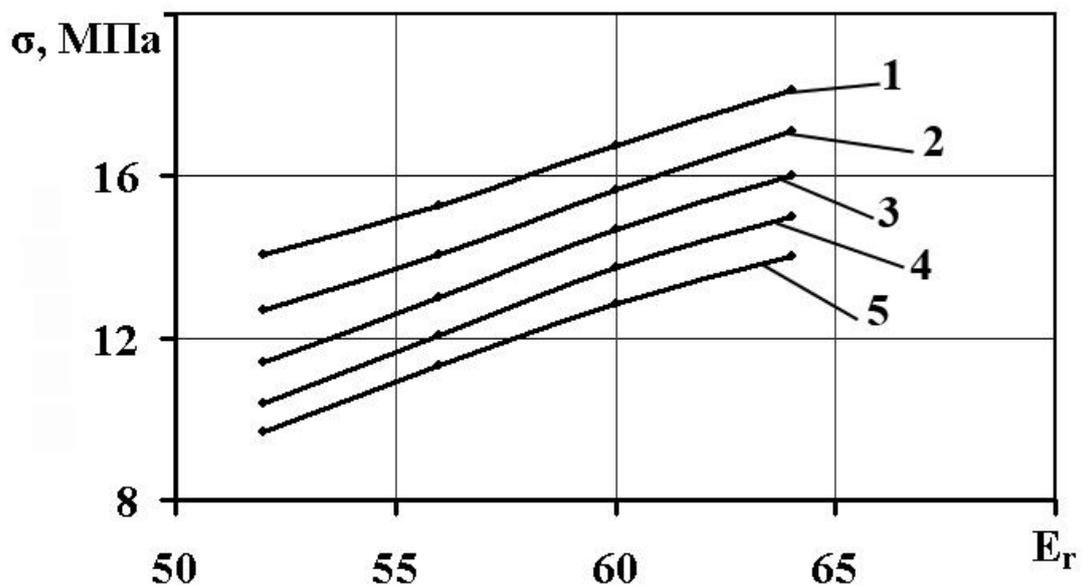
Рис. 7 – Зависимость времени удара t от площади резины S при разной энергии удара E_k

Типовые расчеты футеровок предусматривают подбор параметров защитных покрытий, исходя из определения способности футеровки выдерживать ударные нагрузки во избежание износа, путем подбора толщины и твердости покрытия, не принимая во внимание процессы, происходящие в защищаемых поверхностях и конструкциях. При этом уменьшение напряжений, возникающих при падении горной массы в конструкциях машин, является главной задачей для защитных футеровок. Для определения зависимости напряжения σ от энергии удара E_k при разной площади резины S и постоянной твердости резины $E_r=56$ были получены графики, представленные на рис.8. Характер зависимости нелинейный, при росте силы удара напряжения в рабочей поверхности увеличиваются.

Зависимость напряжения σ от твердости резины E_r при разной площади резины S и постоянной энергии удара $E_k = 15$ Дж представлена на рис.9. Зависимость имеет линейный характер, при увеличении твердости резины напряжение увеличивается, что объясняется снижением упруго-вязких свойств в твердых эластомерах.



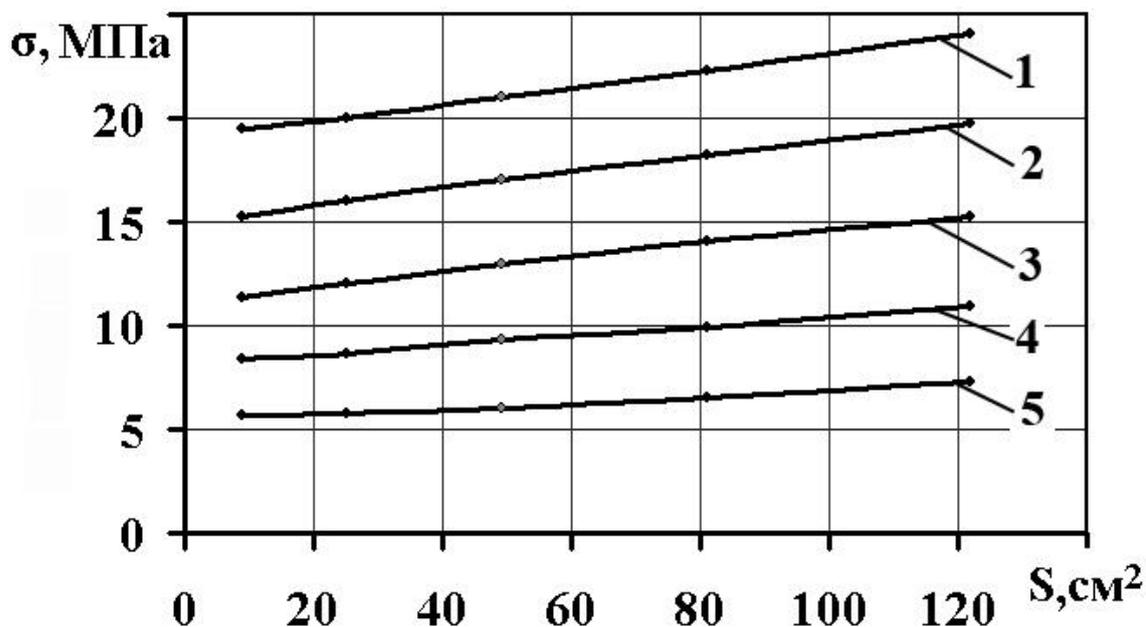
1 – $S = 121 \text{ см}^2$; 2 – $S = 81 \text{ см}^2$; 3 – $S = 49 \text{ см}^2$; 4 – $S = 25 \text{ см}^2$; 5 – $S = 9 \text{ см}^2$
 Рис. 8 – Зависимость напряжения σ от энергии удара E_k при разной площади резины S .



1 – $S = 121 \text{ см}^2$; 2 – $S = 81 \text{ см}^2$; 3 – $S = 49 \text{ см}^2$; 4 – $S = 25 \text{ см}^2$; 5 – $S = 9 \text{ см}^2$
 Рис. 9 – Зависимость напряжения σ от твердости резины E_r при разной площади резины S

Влияние эффекта объемного сжатия на изменения напряжения в рабочих поверхностях возможно определить из зависимости напряжения σ от площади резины S при разной энергии удара E_k и постоянной твердости резины $E_r=56$,

представленной на рис.10. Характер зависимости линейный, при увеличении площади резины напряжения в рабочей поверхности увеличиваются, тем самым подтверждается отрицательное влияние эффекта объемного сжатия на демпфирующие свойства резины, что приводит к увеличению жесткостных характеристик эластичной футеровки и снижению ее защитных свойств.



1 – $E_k = 43$ Дж; 2 – $E_k = 27$ Дж; 3 – $E_k = 15$ Дж; 4 – $E_k = 7$ Дж; 5 – $E_k = 1,7$ Дж

Рис. 9 – Зависимость напряжения σ от площади резины S при разной энергии удара E_k

Выводы

Выполненные исследования позволили выявить факторы, влияющих на защитные свойства футеровок и напряжения, возникающие в рабочих поверхностях горных машин, а также установить характер зависимостей глубины вдавливания, времени удара и напряжения от энергии удара, твердости и площади резины.

Глубина вдавливания индентора в футеровку, от которой зависит ее толщина, имеет слабонелинейную зависимость от энергии удара и площади резины, и линейную зависимость от твердости футеровки. Установлено, что наличие резины вне границы площади отпечатка индентора приводит к увеличению жесткости эластичной футеровки до 30%.

Продолжительность импульса максимального напряжения линейно зависит от твердости и площади резины, и нелинейно от энергии удара, при этом использование эластичной футеровки позволяет в 4-5 раз увеличить время удара по сравнению с ударом без защитного покрытия, это приводит к снижению напряжений в рабочих поверхностях горных машин в 8-10 раз, по сравнению с жестким ударом. Определено, что величина напряжения нелинейно зависит от

энергии удара и линейно от твердости и площади резины. Использование эффекта объемного сжатия, путем уменьшения площади резины, позволяет снизить напряжений в защищаемых рабочих поверхностях на 20-25%

Увеличение толщины или уменьшение твердости защитной футеровки – это обычные способы увеличения времени удара и уменьшения напряжений, но такие изменения приводят к росту стоимости футеровки. Альтернативой этому, при прочих равных условиях, является использования неравномерных по высоте защитных футеровок, которые позволяют устранить влияние эффекта объемного сжатия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдсмит, В. Удар. Теория и физические свойства соударяемых тел / В. Гольдсмит – М.: Госстройиздат, 1965. – 448 с.
2. Пановко, Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я.Г. Пановко – Л.: Машиностроение, 1976. – 240 с.
3. Потураев, В.Н. Резина в горном деле / В.Н. Потураев, В.И. Дырда, В.П. Надутый. – М.: Недра, 1974. – 150 с.
4. Надутый, В.П. Исследование напряженного состояния рабочего органа вибрационной машины с защитным слоем при ударных нагрузках / В.П. Надутый, В.В. Сухарев, Д.В. Белоштин // Вібрації в техніці та технологіях. – 2012. – Вип. 4(68). – С. 71-75.

REFERENCES

1. Goldsmit, V. (1965), *Udar. Teoriya i fizicheskiye svoystva soudariayemykh tel* [The theory and the physical properties of the colliding bodies], Gosstroyizdat, Moscow, Russia.
2. Panovko, Ya.G. (1976), *Osnovy prikladnoy teorii kolebaniy i udara* [Fundamentals of applied theory of vibrations and impact], Mashinostroenie, Leningrad, Russia.
3. Poturayev, V.N., Dyrda, V.I. and Naduty, V.P. (1974), *Rezina v gornom dele* [Rubber is on mountain business], Nedra, Moscow, Russia.
4. Naduty, V.P., Sukharyev, V.V. and Beliushin, D.V. (2012), "Research of the tense state of working organ of oscillation machine with a protective layer at the shock loading", *Vibratsi v tekhnitsi ta tekhnologiyakh*, no. 4, pp. 71-75.

Об авторах

Сухарев Виталий Витальевич, кандидат технических наук, научный сотрудник отдела механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, agnivik@ukr.net.

Левченко Павел Владимирович, младший научный сотрудник отдела механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, prodvnutiy2005@ukr.net.

Белоштин Дмитрий Владимирович, аспирант, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (ГБУЗ «НГУ»), Днепропетровск, Украина.

About the author

Sukharyev Vitaliy Vitalievich, Candidate of Technical Sciences (Rh.D), Researcher in Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, M.C. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, agnivik@ukr.net.

Levchenko Pavel Vladimirovich, Junior Researcher in Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, M.C. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, prodvnutiy2005@ukr.net.

Beliushin Dmitriy Vladimirovich, Doctoral Student of the State Higher Educational Institution “National Mining University”, SHEI “NMU”, Zaporozhye iron-ore combine, designer, Dnepropetrovsk, Ukraine.

Анотація. Метою даного дослідження було визначення факторів і способів регулювання захисних властивостей еластичною футерування шляхом аналізу ударної взаємодії гірської маси з футерованою робочою поверхнею.

Попередні дослідження показали, що основними чинниками, що впливають на захисні властивості футерування, є її товщина, твердість і сила удару, при цьому не враховувалася комплексний вплив зміни площі гумової футеровки або модуля об'ємного стиснення. Експерименти були проведені на лабораторному стенді, який моделює короб віброживильника у співвідношенні 1:4. У ході експерименту були встановлені залежності глибини вдавнення, часу удару і напруги від енергії удару, твердості і площі гуми. При цьому визначено, що використання ефекту об'ємного стиснення дозволяє знизити напруження в робочих поверхнях на 20-25%. Отримані результати можуть бути застосовані при розробці нових конструкцій еластичних футерівок з більш високими захисними властивостями і дозволять зменшити їх вартість.

Ключові слова: еластична футерівка, удар, напруга.

Abstract. Purpose of this work was to determine factors and methods for adjusting protective properties of elastic lining and to study shock interaction between rock mass and lined work surface.

Previous studies shown that the main factors which impacted on protective properties of the lining were the lining thickness and hardness and shock force, however, the studies did not take into account a combined effect of a changed area of rubber lining or bulk modulus. Experiments were conducted on a laboratory stand, which simulated a vibratory feeder box in 1:4 ratio. The experiments shown interdependence between indentation depth, shock duration, shock stress and rubber area and hardness. It was also determined that use of 3D compression effect could reduce stress of working surfaces under the protection by 20-25%. The findings can be applied in designing new elastic liners with better protective properties and reduce the lining cost.

Keywords: elastic lining, impact, stress.

*Стаття поступила в редакцію 28.08.2013
Рекомендовано к публікації д.т.н., проф. В.П. Надутым*