

УДК 622.73:621,926.002.75

DOI: <https://doi.org/10.15407/geotm2020.151.150>

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА СОВРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ФУТЕРОВАНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МАШИН

<sup>1</sup>Дырда В.И., <sup>2</sup>Черний А.А., <sup>2</sup>Калганков Е.В., <sup>2</sup>Толстенко А.В., <sup>1</sup>Филиппенко Е.Н.  
<sup>1</sup>Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, <sup>2</sup>Днепропетровский  
государственный аграрно-экономический университет

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АБРАЗИВНОГО ЗНОСУ СУЧАСНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ФУТЕРУВАННЯ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ МАШИН

<sup>1</sup>Дирда В.І., <sup>2</sup>Черній О.А., <sup>2</sup>Калганков Є.В., <sup>2</sup>Толстенко А.В., <sup>1</sup>Філіпенко О.М.  
<sup>1</sup>Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, <sup>2</sup>Дніпровський  
державний аграрно-економічний університет

## TESTS FOR ABRASIVE WEAR OF MODERN MATERIALS FOR FUTTING WORKING SURFACES OF MACHINES

<sup>1</sup>Dyrda V.I., <sup>2</sup>Chernii O.A., <sup>2</sup>Kalhankov Ye.V., <sup>2</sup>Tolstenko A.V., <sup>1</sup>Filipenko O.M.  
<sup>1</sup>Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of NAS of Ukraine, <sup>2</sup>Dnipro State  
Agrarian and Economic University

**Аннотация.** Истирание является основной причиной разрушения рабочих поверхностей машин, которые работают в разных отраслях промышленности. В этом исследовании представлены результаты испытания на истирание материалов, которые используются для изготовления деталей защитных покрытий: резина для футеровок производства НПП ООО «Валса-ГТВ» и термопластичный полиуретан с торговым названием «Desmorap». В процессе испытаний были измерены сила трения и абразивный износ образцов. Изношенные поверхности и частицы износа были исследованы с использованием оптического микроскопа. На изношенных поверхностях испытываемых образцов наблюдались царапины (параллельно направлению скольжения) и гребни (перпендикулярно направлению скольжения).

Изучение частиц износа показывает, что они (особенно для «Desmorap») в состоянии сухого скольжения при трении по абразивной шкурке P150 были агрегированы в частицы скатки. При трении по абразивной шкурке P40 агрегация частиц износа отсутствовала. Результаты показывают, что коэффициент трения у резины уменьшается с ростом величины размера абразива. У материала «Desmorap» коэффициент не так сильно зависит от величины абразива. Также у всех образцов величина веса стёртого материала с ростом величины абразива уменьшается. Истираемость термопластичного полиуретана с торговым названием «Desmorap» при испытании на абразивный износ во всех экспериментах больше, чем в футеровочной резине.

Натурные экспериментальные исследования проводились на Полтавском ГОКе на мельнице МШР 4,5×6,0 третьей стадии измельчения (размер кусков руды +2 мм); на торцевых лифтерах приклеивались пластины «Desmorap» толщиной 10 мм. Долговечность до отказа равнялась примерно 1500 часов.

Показано, что термопластичный полиуретан «Desmorap» может успешно использоваться как защитное покрытие деталей, которые работают в среде мелкого абразива и не воспринимают ударных нагрузок. Применения полиуретана в качестве материала для футеровки барабанов шаровых мельниц и лотков вибропитателей показало низкую эксплуатационную надёжность.

**Ключевые слова:** резина, термопластичный полиуретан, абразивный износ, истираемость

### Введение

В последнее время эластомеры (резины, полиуретаны) широко используются в качестве защитных футеровок и износостойких покрытий машин: вибропитателей для выпуска и доставки руды, скипов, барабанных мельниц для дезинтеграции минерального сырья и т.д.

В настоящей статье излагаются результаты сравнительных испытаний на истираемость футеровочной резины производства ООО «Валса-ГТВ» и термопластичного полиуретана производства фирмы «Covestro» с торговым наименованием «Desmorap».

Целью испытаний являлось определение истираемости при скольжении представленных образцов резины и термопластичного полиуретана.

### Методика испытаний

Нормативно-правовой базой работы являлся Межгосударственный стандарт ГОСТ 426-77 «Резина. Метод определения сопротивления истиранию при скольжении».

Работа проводилась на машине трения МИ-2 (машина Грассели), которая соответствует требованиям, предусмотриваемым стандартом.

Был испытан ряд образцов (по три пары) из резины марки А размером  $20 \times 20 \times 8$ , а также образцы термопластичного полиуретана «Desmoran» размером  $20 \times 20 \times 5$ . Свойства тестируемых материалов следующие: твердость по Шору резины – 66 ед., «Desmoran» – 92 ед.; плотность резины –  $1,200 \text{ г/см}^3$ , «Desmoran» –  $1,240 \text{ г/см}^3$ .

Перед истиранием образцы были наклеены на твёрдую подкладку таким образом, чтобы их общая высота соответствовала  $10 \pm 0,2 \text{ мм}$ . Затем образцы притирались до появления следов износа на всей поверхности их контакта с абразивом.

В качестве абразивного материала была использована шлифовальная шкурка по ГОСТ 6456 с зернистостью абразива: 8Н (ГОСТ 3647-80) или P150 (ISO-6344); 40Н (ГОСТ 3647-80) или P40 (ISO-6344).

Перед началом испытания была проведена стабилизация шкурки стандартной резиной на основе каучука СК(М)С-30АРКМ-15, а также определена истирающая способность шкурки, согласно методике стандарта.

Проведение испытаний осуществлялось по методике, указанной в стандарте. Основными параметрами были: нормальная сила, действующая на два образца – 26 Н (2,6 кгс), окружная скорость диска в точке касания образцов – 0,29 м/с, время проведения теста – 300 с.

Схема конфигурации испытания показана на рис. 1.

В этих экспериментах использовались два набора абразивных кругов SiC с разным размером зёрен (# 40 и # 150), и твёрдость абразивных частиц составляла HV 30-800. Параметры испытаний приведены в табл. 1.

### Результаты экспериментальных исследований

**Абразивный износ.** Проведя анализ экспериментальных данных, на рис. 2 показано величины изношенного испытываемого материала. Из графиков видно, что при разных уровнях теста больше изнашивался полиуретан. Но при увеличении размера зерна абразива износ образцов обоих материалов уменьшался.

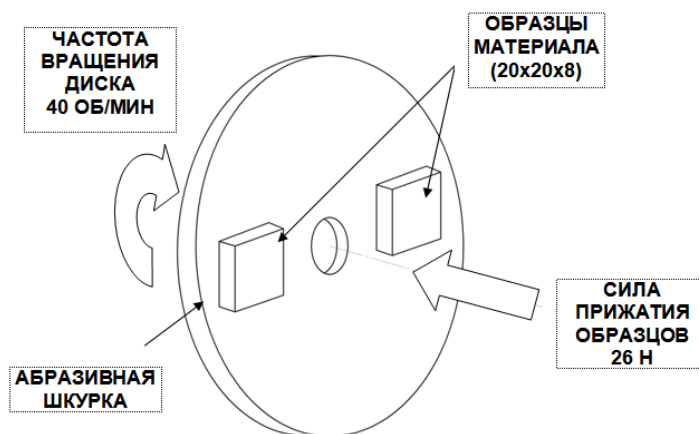


Рисунок 1 – Схема проведения эксперимента

Таблиця 1 – Параметри теста

Уровни теста	Номер абразивного круга, # (номинальный размер зерна, мкм)	Скорость скольжения, м/с	Нагрузка, Н	Время теста, с
Уровень 1	P150 (90)	0,29	26	300
Уровень 2	P40 (450)	0,29	26	300

**Трение.** Величины коэффициентов трения испытываемых материалов приведены на рис. 3. Как видно, во время теста, проведённого по уровню 1, фетерочная резина имеет больший коэффициент трения, чем полиуретан, а при тесте с уровнем 2 полиуретан имеет величину коэффициента трения больше, чем фетерочная резина.

**Истираемость.** Основной, по стандарту, величиной, что указывает на сопротивление материалов абразивному износу, является истираемость  $\alpha$ , измеряемая в м<sup>3</sup>/Дж и определяемая по формуле:

$$\alpha = \frac{\Delta V}{A} \cdot \frac{1}{K}, \quad (1)$$

где  $A$  – работа трения, Дж;

$\Delta V$  – объём изношенного материала, м<sup>3</sup>.

Коэффициент  $K$ , учитывающий истирающую способность шлифовальной шкурки, принимали равным 1.

На рис. 4 показаны величины истираемости тестируемых материалов. Из него видно, что в обоих уровнях проведённого теста фетерочная резина имела величину истираемости ниже, чем термопластичный полиуретан. Особенно велика их разница при тестах, проведённых по второму уровню.

### Результаты исследований

Типичные изношенные поверхности показаны на рис. 5. Можно заметить, что на полученных поверхностях образовались как царапины (расположены параллельно направлению движения абразива при тесте), так и

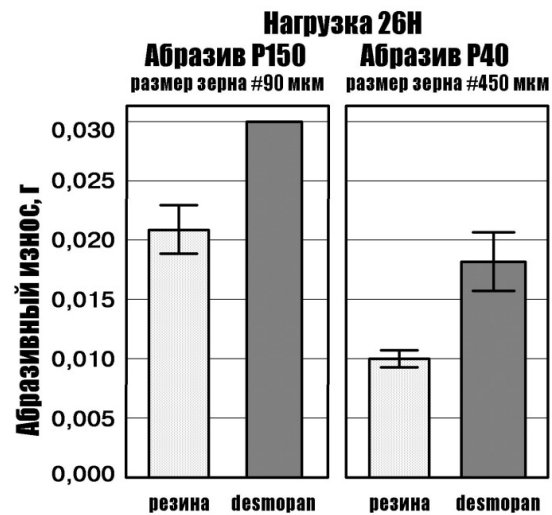


Рисунок 2 – Величина стёртого материала во время теста

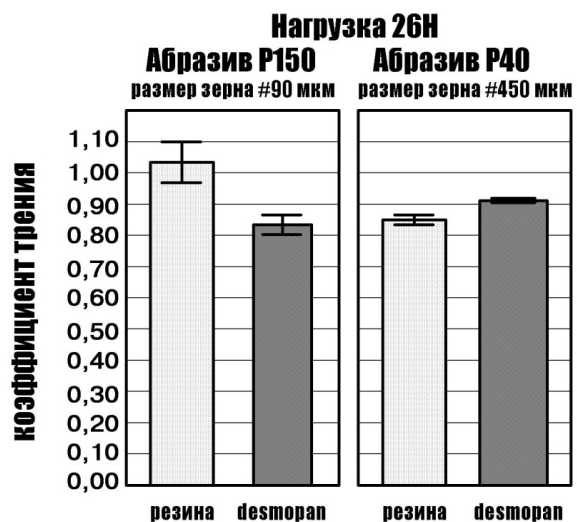


Рисунок 3 – Коэффициент трения материалов во время теста

выступы, которые расположены перпендикулярно направлению скольжения.

На рис. 6 показаны механизмы образования царапин и гребней на поверхности эластомеров [3]. Когда эластомер скользит по резким неровностям в точечных контактах, его поверхность износа характеризуется царапинами, параллельными направлению скольжения (рис. 6, а); когда эластомер скользит по твёрдой поверхности в линейном контакте, изношенная поверхность характеризуется выступами, перпендикулярными направлению скольжения (рис. 6, б). В реальной ситуации может возникнуть комбинация двух механизмов. Поскольку контактное давление распределяется более равномерно, ожидается, что механизм, показанный на рис. 6, б, станет более значительным, а изношенная поверхность характеризуется большим количеством выступов и меньшим количеством царапин.

На рис. 7 показаны частицы износа испытываемых материалов, которые образовались при разных уровнях теста.

Частицы износа полиуретана при испытании по уровню 1 были агрегированы в скатки, а по уровню 2 – были разделены и имели вид сухого мелкого порошка; в то время как частицы износа образцов из резины во всех тестах имели вид сухого порошка.

Натурные экспериментальные исследования проводились на Полтавском ГОКе на мельнице МШР 4,5×6,0 третьей стадии измельчения (размер кусков руды +2 мм); на торцевые лифты приклеивались пластины «Desmopan» толщиной 10 мм. В настоящее время испытания продолжаются.

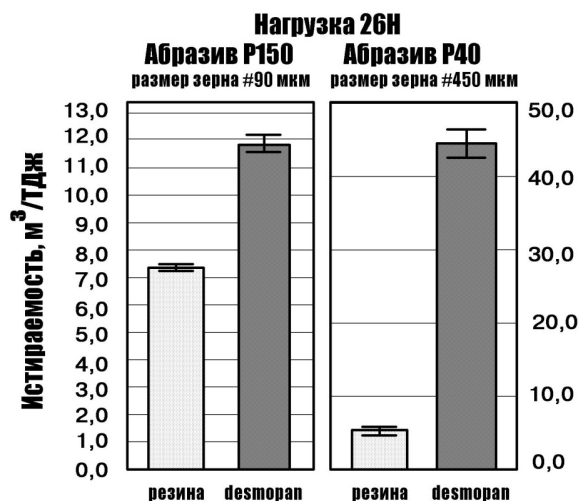


Рисунок 4 – Величины истираемости материалов во время теста

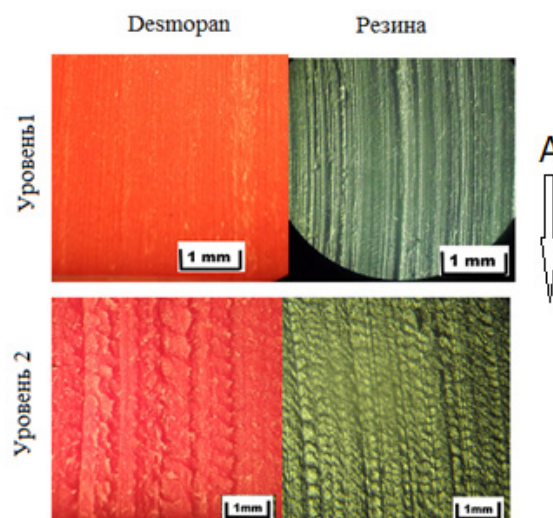


Рисунок 5 – Типичные изношенные поверхности материалов во время теста (направление движения абразива по стрелке А)

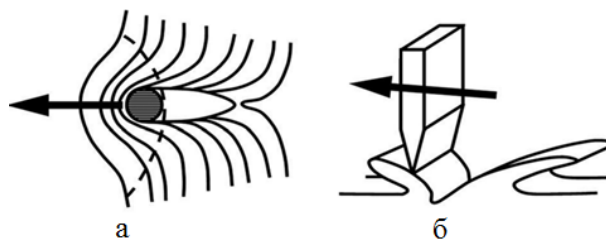


Рисунок 6 – Механизм получения изношенной поверхности при: а – точечном контакте, б – линейном контакте [3]

## Выводы

1. Исследован абразивный износ и процесс трения двух материалов для производства защитных покрытий: резины и термопластичного полиуретана. Результаты показывают, что коэффициент трения у резины уменьшается с ростом величины размера абразива; у материала «Desmoran» коэффициент не так сильно зависит от величины абразива.

2. С увеличением размера абразива износ всех образцов уменьшался.

3. Анализ изношенной поверхности показал, что оба материала характеризовались одинаковым механизмом истирания: при абразиве Р150 их поверхности имели царапины, а при абразиве Р40 к царапинам добавились выступы. Полученные агрегаты износа имели следующий вид: в полиуретане при тесте по уровню 1 – частицы-скатки, по уровню 2 – мелкий сухой порошок; в резине все частицы имели примерно одинаковый размер и не были агрегированы в более крупные частицы, т.е. носили характер сухого порошка.

4. Экспериментальные исследования показали, что полиуретан типа «Desmoran» при истирании крупным абразивом имел большую истираемость, чем футеровочная резина; при истирании мелким абразивом, истираемость полиуретана и резины были примерно одинаковыми.

5. Были проведены испытания на истирание футеровочной резины и материала «Desmoran» по Межгосударственному стандарту ISO 4649:2017 «Резина. Метод определения сопротивления истиранию при скольжении по возобновляемой поверхности». Результаты, полученные по машине трения МТИ-1, удовлетворительно совпадают с данными испытаний на истирание на машине трения МИ-2.

6. Футеровочная резина производства НПП ООО «Валса-ГТВ» достаточно хорошо зарекомендовала себя при дезинтеграции твердых и абразивных руд (железных, медных и полиметаллических), и если рассматривать её как эталон, то полиуретан «Desmoran» более пригоден в качестве защитных покрытий рабочих органов машин и механических устройств при переработке и транспортировке мелких фракций материала, таких как внутренние полости насосов перекачки пульпы, пульпопроводы, транспортерные ленты, поверхности накопительных ёмкостей и т.д.

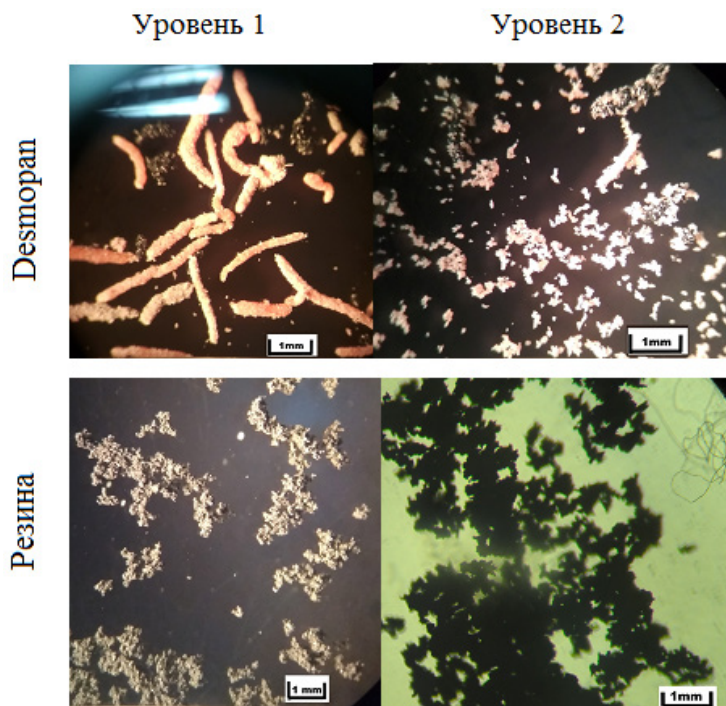


Рисунок 7 – Агрегаты износа испытываемых материалов

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дырда В.И. Прочность и разрушение эластомерных конструкций в экстремальных условиях. Киев: Наук. думка, 1988. 232 с.
2. Прикладная механика упругонаследственных сред: в 4 т. / А.Ф. Булат, В.И. Дырда, Е.Л. Звягильский, А.С. Кобец. Киев: Наук. думка, 2012. Т. 2: Методы расчета эластомерных деталей. 616 с.
3. M. Mofidi, B. Prakash. Influence of counterface topography on sliding friction and wear of some elastomers under dry sliding conditions. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J.: J. Eng. Tribol.* 2008. 222(5). pp. 667-673.  
DOI: <https://doi.org/10.1243/13506501JET392>
4. Абразивно-втомний знос гумової футерівки в контексті фрактального аналізу / А.С. Кобець, В. І. Дирда, Є.В. Калганков, І.М. Цаніді, О.А. Черній. Геотехнічна механіка. Дніпро: Інтеграл, 2019. Вип. 144. С. 103-110.  
DOI: <https://doi.org/10.15407/geotm2019.144.103>
5. Desmopan® – Thermoplastic Polyurethane. URL: [www.covestro.com](http://www.covestro.com) (дата звернення 15 березня 2020).

## REFERENCES

1. Dyrda, V.I. (1988), *Prochnost i razrusheni y eelastomernykh konstruktсий v ekstremalnykh usloviyakh* [Strength and destruction of elastomeric structures in extreme conditions], Naukova dumka, Kyiv, USSR.
2. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., Zviagilskii, E.L. and Kobets, A.S. (2012), *Prikladnaya mekhanika uprugonasledstvennykh sred. Tom 2. Metody rascheta elastomernykh detalei* [Applied mechanics of elastic-hereditary media. Vol. 2. Design techniques of elastomeric parts], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine.
3. M. Mofidi and B. Prakash (2008), "Influence of counterface topography on sliding friction and wear of some elastomers under dry sliding conditions", *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J.: J. Eng. Tribol.*, 222(5), pp. 667-673.  
DOI: <https://doi.org/10.1243/13506501JET392>
4. Kobets, A.S., Dyrda, V.I., Kalhankov, Ye.V., Tsanidi, I.M. and Cherniy, O.A. (2019), "Abrasive-fatigue wear of the rubber lining in the context of fractal analysis", *Geo-Technical Mechanics*, no. 144, pp. 103-110.  
DOI: <https://doi.org/10.15407/geotm2019.144.103>
5. Covestro Global Corporate Website (2020), "Desmopan® – Thermoplastic Polyurethane", available at: [www.covestro.com](http://www.covestro.com) (Accessed 15 March 2020).

## Об авторов

**Дырда Виталий Илларионович**, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), г. Днепр, Украина, [vita.igtm@gmail.com](mailto:vita.igtm@gmail.com)

**Черний Александр Анатольевич**, магистр, старший преподаватель кафедры «Надежность и ремонт машин», Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет (ДГАЭУ), г. Днепр, Украина, [sanek20.1984@gmail.com](mailto:sanek20.1984@gmail.com)

**Калганков Евгений Васильевич**, магистр, старший преподаватель кафедры «Надежность и ремонт машин», Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет (ДГАЭУ), г. Днепр, Украина, [kalhankov.ye.v@dsau.dp.ua](mailto:kalhankov.ye.v@dsau.dp.ua)

**Толстенко Александр Васильевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Надежность и ремонт машин», Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет (ДГАЭУ), г. Днепр, Украина, [info@dsau.dp.ua](mailto:info@dsau.dp.ua)

**Филиппенко Елена Николаевна**, инженер, инженер I категории отдела механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), г. Днепр, Украина, [ElenaFilippenko123@gmail.com](mailto:ElenaFilippenko123@gmail.com)

## About the authors

**Dyrda Vitalii Illarionovych**, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Head of Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Science of Ukraine, Dnipro, Ukraine, [vita.igtm@gmail.com](mailto:vita.igtm@gmail.com)

**Chernii Oleksandr Anatoliiovych**, Master of Science, Senior Lecturer of Department "Reliability and repair of machines", Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine, [sanek20.1984@gmail.com](mailto:sanek20.1984@gmail.com)

**Kalhankov Yevhen Vasylovych**, Master of Science, Senior Lecturer of Department "Reliability and repair of machines", Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine, [kalhankov.ye.v@dsau.dp.ua](mailto:kalhankov.ye.v@dsau.dp.ua)

**Tolstenko Oleksandr Vasylovych**, Candidate of Technical Science (Ph. D.), Associate Professor of Department "Reliability and repair of machinery", Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine, [info@dsau.dp.ua](mailto:info@dsau.dp.ua)

**Filipenko Olena Mykolaivna**, Master of Science, Engineer of Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine, [ElenaFilippenko123@gmail.com](mailto:ElenaFilippenko123@gmail.com)

**Анотація.** Стирання є основною причиною руйнування робочих поверхонь машин, які працюють в різних галузях промисловості. У цьому дослідженні представлені результати випробування на стирання матеріалів, які використовуються для виготовлення деталей захисних покриттів: гума для футерівок виробництва НВП ТОВ «Валса-ГТВ» і термопластичний поліуретан з торговою назвою «Desmopan». В процесі випробувань були виміряні сила тертя і абразивний знос зразків. Зношені поверхні і частки зносу були досліджені з використанням оптичного мікроскопа. На зношених поверхнях зразків спостерігалися подряпини (паралельно напрямку ковзання) і гребені (перпендикулярно напрямку ковзання).

Вивчення частинок зносу показує, що вони (особливо для «Desmopan») в стані сухого ковзання при терті по абразивній шкурці P150 були агреговані в частинки скатки. При терті по абразивній шкурці P40 агрегація частинок зносу була відсутня. Результати показують, що коефіцієнт тертя у гуми зменшується з ростом величини розміру абразиву. У матеріалі «Desmopan» коефіцієнт не так сильно залежить від величини абразиву. Також у всіх зразків величина ваги стертого матеріалу з ростом величини абразиву зменшується. Стирання термопластичного поліуретану з торговою назвою «Desmopan» при випробуванні на абразивний знос у всіх експериментах більше ніж у футерувальній гумі.

Натурні експериментальні дослідження проводилися на Полтавському ГЗК на млині МШР 4,5×6,0 III стадії подрібнення (розмір шматків руди +2 мм); на торцевих ліфтерах приклеювалися пластини «Desmopan» товщиною 10 мм. Довговічність до відмови дорівнювала приблизно 1500 годин.

Показано, що термопластичний поліуретан «Desmopan» може успішно використовуватися як захисне покриття деталей, які працюють в середовищі дрібного абразиву і не сприймають ударних навантажень. Застосування поліуретану в якості матеріалу для футерування барабанів кульових млинів і лотків віброживильників показало низьку експлуатаційну надійність.

**Ключові слова:** гума, термопластичний поліуретан, абразивний знос, стирання

**Abstract.** Abrasion is the main reason for the destruction of the working surfaces of machines that work in different sectors of industry. This study presents the abrasion test results for materials that are used to make parts for protective coatings: a rubber for linings manufactured by Valsa-GTV LLC and thermoplastic polyurethane with the trade name Desmopan. During the tests, the friction force and abrasive wear of the samples were measured. Worn surfaces and wear particles were examined using an optical microscope. On worn surfaces of test specimens, scratches were observed (parallel to the sliding direction), and ridges (perpendicular to the sliding direction).

The study of wear particles shows that they (especially for Desmopan) in a dry slip state during friction on the abrasive sandpaper P150 were aggregated into skating particles. During friction on the abrasive sandpaper P40, aggregation of wear particles was absent. The results show that the coefficient of friction of rubber decreases with increasing size of the abrasive. For Desmopan, the coefficient does not depend so much on the size of the abrasive. Also, in all samples, the weight of the erased material decreases with an increase in the abrasive value. Abrasion of thermoplastic polyurethane under the trade name “Desmopan” in the abrasion test in all experiments is more than in lining rubber.

Full-scale experimental studies were carried out at the Poltava GOK at the mill МШР 4,5×6,0 III grinding stages (size of ore pieces +2 mm); 10 mm thick Desmopan plates were glued on the face lifters. Longevity to failure was approximately 1,500 hours.

It is shown that the Desmopan thermoplastic polyurethane can be successfully used as a protective coating for parts that work in a medium of small abrasive and do not perceive impact loading. The use of polyurethane as a material for lining drums of ball mills and trays of vibratory feeders has shown the low operational reliability.

**Keywords:** rubber, thermoplastic polyurethane, abrasive wear, abrasion

*Статья поступила в редакцию 12.02.2020*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук С.П. Минеевым*