

Дирда В.І., д-р техн. наук, професор,
Калганков Є.В., аспірант,
Цаніді І.М., аспірант
(ІГТМ НАН України),
Черній О.А., магістр
Кириленко О.І., інженер
(ДДАЕУ)

ДО РОЗРАХУНКУ ГУМОВОЇ ФУТЕРІВКИ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОВЕДІНКИ МАТЕРІАЛУ

Дырда В.И., д-р техн. наук, профессор,
Калганков Е.В., аспирант,
Цаниди И.Н., аспирант
(ИГТМ НАН Украины),
Черний А.А., магистр,
Кириленко А.И., инженер
(ДДАЕУ)

К РАСЧЕТУ РЕЗИНОВОЙ ФУТЕРОВКИ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛА

Dyrda V.I., D.Sc. (Tech.), Professor,
Kalgankov Ye.V., Doctoral Student,
Tsanidy I.N., Doctoral Student
(IGTM NAS of Ukraine),
Cherniy A.A., M.S (Tech.)
Kirilenko A.I., M.S (Tech.)
(DSAEU)

ON CALCULATION OF THE RUBBER LINING WITH MATERIAL SPECIFIC BEHAVIOUR TAKEN INTO ACCOUNT

Анотація. Запропоновано модель процесу локальної деформації гумової футерівки з урахуванням ударної дії кулькового завантаження млина та абразивно-втомного зносу поверхні футерівки. В основі локальної деформації розглянуто ефект об'ємного стискання гуми. Також в роботі розглянуто рудно-кулькове завантаження млина, його рух та взаємодія з гумовою футерівкою, а також його вплив на фізико-механічні властивості гуми.

Отримані експериментальні данні розподілу температури нагріву гумової футерівки по висоті для млина МШЦ 3,2×4,5: максимальна температура футерівки була в діапазоні 62-67 °С, температура рідини на виході з барабана була 45-55 °С.

Отримані експериментальні дані ударної дії кульок на футерівку вказали на локальне підвищення температури на (10...15) °С, що при певних умовах може призвести до швидкого руйнування футерівки. Розглянуто процес руйнування гуми в контексті фрактального аналізу при дії ударних навантажень на поверхню футерівки.

Ключові слова: об'ємний стиск, фрактал, фрактальний аналіз, кульковий млин, гумова футерівка, кластер, знос

В процесі експлуатації гумової футерівки барабаних рудорозмельних млинів елементи футерівки сприймають ударні навантаження, вдавлювання та абразивно-втомний знос. Тривала практика експлуатації дозволила встановити досить важливий експериментальний факт: для барабаних млинів типу МШЦ діаметром 3,2...5,5 м мають місце епізодичні контакти куль безпосередньо із гумовою футерівкою. При експериментальних спостереженнях встановлено, що в розглянутих млинах при оптимальному заповненні барабана кульковим завантаженням кількість ударів куль по гумовій футерівці становить приблизно 3...5 % від загального обсягу куль. З деяким допущенням можна вважати, що удари куль по футерівці не визначають її довговічність; основний внесок у втомний процес руйнування гуми вносить вдавнення кульового завантаження та матеріалу, що переробляється, у поверхню гумової футерівки, тобто абразивно-втомне зношування. При цьому механізм руйнування гумової футерівки має свої особливості, які до теперішнього часу не отримали належного висвітлення в літературі. Розглянемо найбільш важливі з них.

Ефект об'ємного стиску. У 1906 році в своїй докторській дисертації (видана в 1952 р. в Обраних працях) А.Н. Дінник, досліджуючи міцність різних матеріалів в умовах ударних напружень, у тому числі і таких які викликають руйнування площини, відмітив досить важливий факт: матеріали (в основному метали, А.Н. Дінник не досліджував гуму) локально можуть витримувати великі напруження без видимих ознак руйнування. Причини такої поведінки, на його думку, знаходяться в наступному: час удару незначний і напруження завдяки релаксаційним властивостям матеріалу не встигають проявитись в повній мірі; в зоні контакту матеріал знаходиться в умовах об'ємного стиску.

Розглянемо деякі наслідки ефекту об'ємного стиску при вивченні механізмів руйнування гумової футерівки.

Напружено-деформований стан. Монодисперсоїд рудно-кульового тіла здійснює на футерівку динамічний тиск із частотою, відповідній до частоти обертання барабана. При цьому футерівка у найпростішому випадку випробовує нормальні й дотичні напруження; у зв'язку із хвильовим характером зношування гуми надалі будемо розглядати переважно нормальні напруження, які викликають деформацію стиску футерівочних плит. Найбільш доцільно визначити величину деформації плит при експериментальних дослідженнях. З цією метою до робочої поверхні футерівки прикріплювалася металева пластина й через отвір у барабані й футерівці замірялася висота плит у вільному стані при оптимальному завантаженні. Динамічна деформація плит визначалася згідно

$$\Delta_{\delta} = \Delta_{cm} \cdot k_{\delta}, \quad (1)$$

де Δ_{cm} – статична деформація плити; k_{δ} – коефіцієнт динамічності гуми; (для частот (0,1...6,0) Гц, $k_{\delta} = 1,35-1,50$).

Для млина МШЦ 3,2×4,5 максимальна динамічна деформація стиску плит була в межах (5,5...6,8) мм; у подальшому приймалось усереднене значення динамічної деформації $\Delta_{\delta} = 6,4$ мм (для плити висотою 160 мм, наприклад від-

носний стиск $\varepsilon = 0,04$). Що стосується напружень, то найбільш значущі величини спостерігаються в зоні контакту металевих кульок при ударі по футерівці. Раніше встановлено [1], що при контакті кульки діаметром 60 мм з гумовими плитами товщиною 60 мм при швидкості $V = 10$ м/с отримані величини нормальних напружень $\sigma_z = (180 \dots 250)$ МПа. Як відмічалось, такі великі напруження гума може витримувати тільки завдяки ефекту об'ємного стиску в зоні контакту.

Локальні екзотермічні ефекти. Слід відзначити, що в зоні удару розвивається доволі висока температура; в гумі в устях тріщин, вона може сягати температури сублімації матеріалу. Це питання практично не вивчене, однак, судячи по кінетиці макроруйнування гумової футерівки, така температура завдяки низькій теплопровідності матеріалу та короткотривалості ударного імпульсу не надає такого великого впливу, як слід було б очікувати. Однак на мікрорівні чисельні пошкодження поверхні футерівки від вдавлювання контртіл можуть змінювати структуру матеріалу та підвищувати швидкість механізму абразивно-втомного руйнування. На рисунку 1 наведено схему експериментальної установки: на гумову плиту діаметром 480 мм та висотою 50 мм падала кулька діаметром 100 мм. Температура в зоні контакту фіксувалась точковою хромель-копелевою термопарою. Отримані при цьому величини приросту локальної температури в зоні контакту (зона відповідала діаметру спаю термопари і складала $1,2 \text{ мм}^2$) знаходилась в межах $\theta = (10 \dots 15)^\circ\text{C}$. Тут слід відзначити, що між спаєм термопари та кулькою існувала тонка перемичка гуми (товщина приблизно 0,5 мм), що природньо завдяки низькій теплопровідності матеріалу зменшувало величину фіксуємої температури. Безперечно, в локальному мікрооб'ємі гуми температура була вище, про що свідчать експериментальні дослідження [2].

Слід відмітити, що зафіксована локальна температура в зоні контакту може негативно вплинути на механізм руйнування футерівки. Це пов'язано з тим, що в більшості млинів гумова футерівка працює в передкритичній зоні температур порядку $(65 \dots 75)^\circ\text{C}$ (критична температура для наповнених гум вище 80°C), а в локальних об'ємах температура буде перевищувати 80°C .

При взаємодії футерівки з монодисперсоїдом завантаження в гумовому масиві за рахунок процесу стирання та дисипації енергії від динамічного навантаження виникало температурне поле. Внаслідок стохастичності процесу переробки матеріалу й циркуляції рідини таке температурне поле, як правило, не було стаціонарним; температура по об'єму плит розподілялася так, як показано на рис. 2.

Експериментально температура замірялася за допомогою хромель-копелевих термопар, установлених у різних точках плити, а також голчастою термопарою, що вводиться



епізодично в гумовий масив через отвір у барабані. Температура замірялася при зупинці млина МШЦ 3,2×4,5. Максимальна температура футерівки, що досліджувалась, спостерігалася на глибині приблизно (12...20) мм від робочої поверхні й дорівнювала $(62 \div 67)^\circ\text{C}$; температура рідини на виході з барабана була $(45 \dots 55)^\circ\text{C}$; точність вимірів $\pm 3^\circ\text{C}$.

Особливості фрактального аналізу поверхні руйнування. Розглянемо одну з важливих сторін механіки руйнування, фрактальний аналіз поверхні руйнування масивних гумових зразків при їхньому тривалому циклічному навантаженні. Використання фрактального трактування руйнування тут цілком доречно по наступних причинах. Для гум при циклічному навантаженні поверхня макротріщин має нерегулярну структуру з наявністю різного роду нерівностей. Важливою особливістю такої поверхні є статистична самоподібність рельєфу поверхні; при цьому властивість самоподібності зберігається на макро-, мезо- і мікрорівнях. Усе це дозволяє моделювати таку нерегулярну структуру фрактальними поверхнями [3].

Як відомо, реальна поверхня руйнування гум має шорсткувату, нерегулярну структуру, що відбиває динаміку процесу руйнування. При цьому незважаючи на уявну хаотичність, поверхня руйнування гуми має властивості самоподібності на мікро- і макрорівнях. Якщо площу S такої самоподібної (автомодельної) поверхні покрити квадратами зі стороною R , то вона буде пропорційна [3]

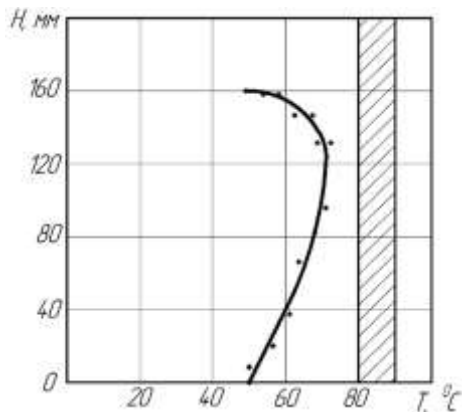
$$S = (R/R_0)^{d_f - 2}, \quad (2)$$

де d_f – фрактальна розмірність Хаусдорфа – Бесиковича.

Для гладких поверхонь руйнування (у гумі вони при циклічному руйнуванні не спостерігаються) $d_f = d - 1$ та при $d = 3$ (евклідовий простір) $d_f = 2$.

Як відзначалося вище, методи фрактального аналізу дозволяють одержати узагальнені співвідношення між механічними характеристиками гуми й параметрами її структури. Випробовувані гумові зразки мали евклідову розмірність $d = 3$; їх фрактальна розмірність змінювалася в межах $2 \leq d_f \leq 3$. Установлено, що саме дробова частина d_f відображає відхилення структури реального тіла від класичного евклідова тіла, а величина фрактальної розмірності поверхні руйнування d_p показує відмінність реальної поверхні руйнування ($d_p > 2$) від ідеалізованої лінійної. Якщо в лінійній механіці руйнування розмірність площини прийнята $d_p = 2$, то в реальних поверхнях руйнування завжди $d_p > 2$.

Для гуми в діапазоні досліджуваних масштабів поверхня руйнування має розмірність $d_f = 2,94$.



заштрихована зона-допустимі температури для гуми марки А

Рисунок 2 – Розподіл температури нагріву гумової футерівки по висоті для млина МШЦ 3,2×4,5

Для композитних матеріалів із квазів'язким руйнуванням отримано вираз, що зв'язує фрактальну розмірність із коефіцієнтом Пуассона [3]

$$d_p = \frac{2 \cdot (1 + 4 \cdot \nu)}{1 + 2 \cdot \nu}.$$

При $\nu = 0,5$ величина $d_p = 2$ відповідає гладкій поверхні (лінійний процес руйнування).

Коефіцієнт Пуассона може бути визначений при випробуванні зразків на об'ємний стиск

$$\nu = \frac{d_f}{d-1} - 1 = \frac{2,96}{3-1} - 1 = 0,48.$$

При незалежних експериментальних дослідженнях (об'ємний стиск циліндричного зразка діаметром 20 мм і висотою 15 мм із гуми з наробітком $t = 31350$ годин) отримана величина $\nu = 0,486$, яка перебуває в гармонійній згоді із цією величиною. Для незруйнованої гуми було отримане значення коефіцієнта Пуассона $\nu = 0,496$.

Як видно, метод фрактальної оцінки поверхні руйнування дозволяє визначити макроструктурні характеристики гуми за значеннями мікроструктурних параметрів матеріалу без яких-небудь підгінних коефіцієнтів. Результати досліджень свідчать про те, що процес руйнування гуми є нелінійним; очевидно, у локальних зонах, тобто в зонах інтенсивного руйнування матеріалу нелінійність процесу буде більше, чим у середньому за зразком.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дырда, В.И. Резиновые футеровки технологических машин / В.И. Дырда, Р.П. Зозуля. – Москва – Днепропетровск, 2013. – 237 с.
2. Powell, M.S. A study of charge motion in rotary mills. Part 2 – Experimental work / M.S. Powell, G.N. Nurick // *Minerals Engineering*. – 1996. – Vol. 9, No. 3. – Pp. 343-350.
3. Powell, M.S. A study of charge motion in rotary mills. Part 3 – Analysis of results / M.S. Powell, G.N. Nurick // *Minerals Engineering*. – 1996. – Vol. 9, No. 4. – Pp. 399-418.
4. The selection and design of mill liners / M. Powell, I. Smit, P. Radziszewski [et al.] // *Advances in comminution*. – Colorado: Mining, metallurgy and exploration, 2006. – Pp. 331-376.

REFERENCES

1. Dyrda, V.I. and Zozulya, R.P. (2013), *Rezinovyie futerovki tekhnologicheskikh mashin* [Rubber linings of technological machines], Dnepropetrovsk, Ukraine.
2. Powell, M.S. and Nurick, G.N. (1996), "A study of charge motion in rotary mills. Part 2 – Experimental work", *Minerals Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 343-350.
3. Powell, M.S. and Nurick, G.N. (1996), "A study of charge motion in rotary mills. Part 3 – Analysis of results", *Minerals Engineering*, vol. 9, no. 4, pp. 399-418.
4. Powell, M., Smit, I., Radziszewski, P. (et al.) (2006), *The selection and design of mill liners*, Mining, metallurgy and exploration, Colorado, USA.

Про авторів

Дирда Віталій Ілларіонович, доктор технічних наук, професор, завідувач відділу еластомерних конструкцій гірничих машин, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України (ІГТМ НАНУ), Дніпропетровськ, Україна, vita.igtm@gmail.com

Калганков Євген Васильович, аспірант, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України (ІГТМ НАНУ), Дніпропетровськ, Україна, vita.igtm@gmail.com

Цаніді Іван Миколайович, аспірант, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України (ІГТМ НАНУ), Дніпропетровськ, Україна, vita.igtm@gmail.com

Черній Олександр Анатолійович, магістр, старший викладач, Дніпропетровський державний аграрно-економічний університет (ДДАЕУ), Дніпропетровськ, Україна, sanek20.1984@gmail.com

Кириленко Олександр Іванович, інженер, старший викладач, Дніпропетровський державний аграрно-економічний університет (ДДАЕУ), Дніпропетровськ, Україна, info@dsau.dp.ua

About the authors

Dyrda Vitaly Illarionovich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Head of Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, vita.igtm@gmail.com

Kalgankov Evgeniy Vasilyevich, Doctoral Student in Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, vita.igtm@gmail.com

Tsanidy Ivan Nikolaevich, Doctoral Student in Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, vita.igtm@gmail.com

Cherniy Alexandr Anatolyevich, Master of Science, Senior Teacher, Dnepropetrovsk State Agrarian-Economic University (DSAEU), Dnepropetrovsk, Ukraine, sanek20.1984@gmail.com

Kirilenko Aleksandr Ivanovich, Master of Science, Senior Teacher, Dnepropetrovsk State Agrarian-Economic University (DSAEU), Dnepropetrovsk, Ukraine, info@dsau.dp.ua

Аннотация. Предложена модель процесса локальной деформации резиновой футеровки с учетом ударного действия шаровой загрузки мельницы и абразивно-усталостного износа поверхностей футеровки. В основе локальной деформации рассмотрено эффект объемного сжатия резины. Также в работе рассмотрено рудно-шаровая загрузка мельницы, ее движение и взаимодействие с резиновой футеровкой, а также ее влияние на физико-механические свойства резины.

Полученные экспериментальные данные распределения температуры нагрева резиновой футеровки по высоте для мельницы МШЦ 3,5×4,5; максимальная температура футеровки была в диапазоне 62-67 °С, температура жидкости на выходе из барабана была 45-55 °С.

Полученные экспериментальные данные ударного действия шаров на футеровку, указали на локальное повышение температуры на 10...15 °С, что при определенных условиях может привести к быстрому разрушению футеровки. Рассмотрен процесс разрушения резины в контексте фрактального анализа при воздействии ударных нагрузок на поверхность футеровки.

Ключевые слова: объемное сжатие, фрактал, фрактальный анализ, шаровая мельница, резиновая футеровка, кластер, износ

Abstract. A model of local deformation of the rubber lining was created with taken into account impact action of the balls in the mill and lining surface abrasion and fatigue. At the heart of the local deformation was effect of the rubber volume compression. Ball-and-ore mass in the mill, the mass moving, interacting with rubber lining and impacting on the rubber physical and mechanical properties were also in the focus of the study.

The experimental data were obtained on the heating temperature distribution in the rubber lining of the МШЦ 3,5×4,5 mill; maximum temperature of the lining was in the range of 62-67 °С, and the fluid temperature at the outlet of the drum was 45-55 °С.

The experimental data on impact action of the balls in the mill on the lining state have pointed out a local increase of temperature by 10...15 °С, which, under certain conditions, could lead to quick destruction of the lining. The process of the rubber destruction was studied in context of fractal analysis at the impact load on the lining surface.

Keywords: volume compression, fractal, fractal analysis, ball mill, rubber lining, cluster, wear

Статья поступила в редакцию 20.03.2015

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.П. Надутым