

Сокол С.П., канд. техн. наук
(ДГАЭУ),

Дырда В.И., д-р техн. наук, профессор
(ИГТМ НАН Украины)

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПОЛНЕННЫХ РЕЗИН ПРИ ДЕФОРМАЦИЯХ ПРОСТОГО СДВИГА

Сокол С.П., канд. техн. наук
(ДДАЕУ),

Дирда В.И., д-р техн. наук, професор
(ИГТМ НАН України)

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПОВНЕНИХ ГУМ ПРИ ДЕФОРМАЦІЯХ ПРОСТОГО ЗСУВУ

Sokol S.P., Ph. D. (Tech.)
(DSEU),

Dyrda V.I., D. Sc. (Tech.), Professor
(IGTM NAS of Ukraine)

RESEARCH OF FILLED RUBBER UNDER OF SIMPLE SHEAR DEFORMATION

Аннотация. Рассматриваются деформационные характеристики элементов типа БРМ (блоки резинометаллические), которые широко используются в различных машинах (вибрационные питатели, конвейеры, грохоты, дробилки и т.д.) в виде упругих звеньев и виброизоляторов. В таких элементах в процессе эксплуатации машин реализуются деформации простого сдвига, а также сочетание деформаций сжатия и сдвига. Элементы в зависимости от назначения могут изготавливаться из резин с различными степенями наполнения. В статье рассматриваются следующие эффекты, сопровождающие деформацию элементов: влияние поджатия; влияние направления прикладываемых деформаций; влияние степени наполнения резин техническим углеродом. Исследовались также параметры диссипативного разогрева при длительных циклических нагрузках и стационарное температурное поле.

Ключевые слова: элементы сдвига типа БРМ, наполненные резины, диссипативный разогрев, стационарное температурное поле

Исследуемые детали представляют собой резиновый массив в виде прямоугольной призмы с привулканизованными металлическими пластинами. При испытаниях два элемента с одинаковой жёсткостью закреплялись в металлическую обойму (рисунок 1), которая затем устанавливалась на испытательном стенде. Наружные плоскости обоймы фиксировались, и срединная плоскость подвергалась деформированию вдоль оси x . Поджатие осуществлялось вдоль оси y .

Испытания осуществлялись для резин, изготовленных на основе синтетического каучука СКИ-3 с содержанием технического углерода от 5 до 75 масс.ч.

Исследование нелинейных эффектов в резиновых элементах

Квазистатические испытания. Их цель состояла в нахождении зависимости силы сдвига P от деформации сдвига ε при различных значениях предварительно устанавливаемой деформации сжатия Δ . Зависимость $P = P(\varepsilon)$ определялась методом ступенчатого нагружения: переход от одной деформации сдвига к другой осуществлялся последовательно с выдержкой на каждом значении деформации 1 ч. Полученные данные представлены в таблице 1 и табл. 2. Сила сдвига P и поджатие Δ даны для двух элементов, испытывавшихся вместе.

Как видно из полученных данных, зависимость квазистатической сдвиговой жёсткости от предварительного поджатия весьма мала: для БРМ-101 она уменьшается менее чем на 7 % при поджатии на 25 %, для БРМ-102 уменьшается на 5 % при поджатии на 17 %.

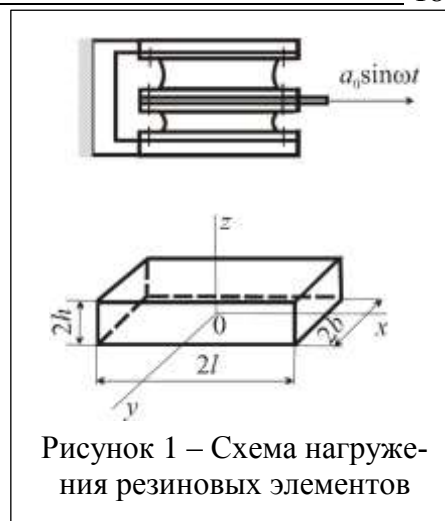


Рисунок 1 – Схема нагружения резиновых элементов

Таблица 1 – Результаты квазистатических испытаний элементов БРМ-101

ε , мм	P , кН			
	$\Delta = 0$	$\Delta = 5,75$ мм	$\Delta = 11,50$ мм	$\Delta = 17,25$ мм
2,00	0,37	0,38	0,38	0,37
4,00	0,77	0,78	0,78	0,75
6,00	1,18	1,19	1,19	1,13
8,00	1,58	1,58	1,58	1,50
10,00	1,96	1,98	1,94	1,85

Таблица 2 – Результаты квазистатических испытаний элементов БРМ-102

ε , мм	P , кН		
	$\Delta = 0$	$\Delta = 7,3$ мм	$\Delta = 17,1$ мм
2,00	0,95	0,93	0,98
4,00	1,91	1,91	1,90
6,00	2,84	2,86	2,76
8,00	3,76	3,79	3,65
10,00	4,66	4,71	4,50
12,00	5,55	5,61	5,35

Динамические испытания

Исследование механических характеристик БРМ от степени наполнения резины (предварительное поджатие $\Delta = 0$). Исследованию подлежали элементы типа БРМ-101, резиновый массив которых имел следующие размеры: длина основания $\ell = 100$ мм, ширина основания $b = 60$ мм, высота $h = 35$ мм. Режим нагружения: частота $\omega = 11$ Гц, амплитуда $A = 0,005$ м, поджатие $\Delta = 0$.

Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 2, рис. 3. Приняты следующие обозначения: G – модуль сдвига, ψ – технический коэф-

коэффициент диссипации энергии, указывающий, какая часть амплитудного значения удельной потенциальной энергии расходуется за цикл.

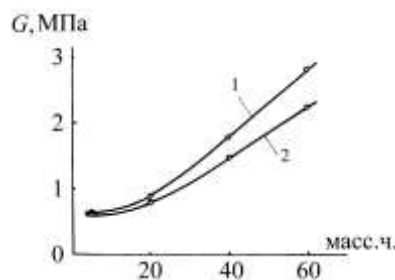
Полученные данные подтверждают вывод, что упругие и демпфирующие характеристики резиновых деталей в значительной степени зависят от степени наполнения техническим углеродом. Эта зависимость выражается в монотонном росте всех измеренных величин при увеличении степени наполнения.

Исследование механических характеристик БРМ от величины предварительного поджатия. Исследованию подлежали элементы типа БРМ-102 со следующими размерами резинового массива: $l = 200$ мм, $b = 100$ мм, $h = 50$ мм. Режим нагружения: $\omega = 11$ Гц, $A = 0,005$ м. Поджатие 0-0,016 м.

Результаты испытаний представлены на рис. 4 – рис. 7. Величина предварительного поджатия приведена для двух элементов, испытывавшихся в паре. Полученные данные позволяют сделать следующие выводы.

Для исследованных резиновых деталей значения их жёсткости при сдвиге весьма слабо зависят от величины предварительного поджатия (при деформациях сдвига до 15 %), для значений динамической жёсткости эти зависимости проявляются более сильно, при этом они определяются степенью наполнения резины техническим углеродом. С увеличением поджатия увеличиваются также значения коэффициента диссипации энергии и температуры диссипативного разогрева.

Определение полей температур. На основании экспериментальных данных можно рассматриваемые резиновые элементы с приемлемой для практики точностью условно разделить на две группы. К первой из них относятся элементы, выполненные из средненаполненных (до 30 масс.ч.) техническим углеродом резин; их термомеханическое пове-



1 – динамический модуль сдвига; 2 – статический модуль сдвига

Рисунок 2 – Зависимость модулей сдвига G от степени наполнения резины техническим углеродом

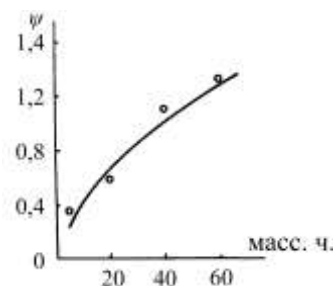
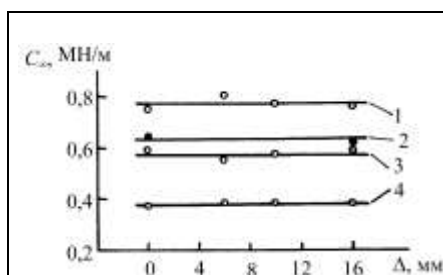
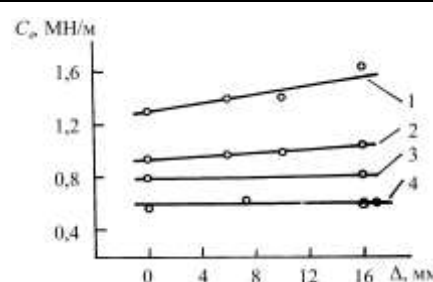


Рисунок 3 – Зависимость технического коэффициента диссипации энергии ψ от степени наполнения резины техническим углеродом



1 – наполнение 50 масс.ч.; 2 – 45 масс.ч.; 3 – 15 масс.ч.; 4 – 5 масс.ч.

Рисунок 4 – Зависимость квазистатической сдвиговой жесткости C_{∞} от величины предварительного поджатия Δ



1 – наполнение 50 масс.ч.; 2 – 45 масс.ч.; 3 – 15 масс.ч.; 4 – 5 масс.ч.

Рисунок 5 – Зависимость динамической сдвиговой жесткости C_{δ} от величины предварительного поджатия Δ

дение вплоть до деформаций сдвига порядка 30 % удовлетворительно описывается решениями соответствующих линейных задач термовязкоупругости.

Ко второй группе относятся элементы, выполненные из средне- и сильнонаполненных (до 75 масс.ч.) техническим углеродом резин.

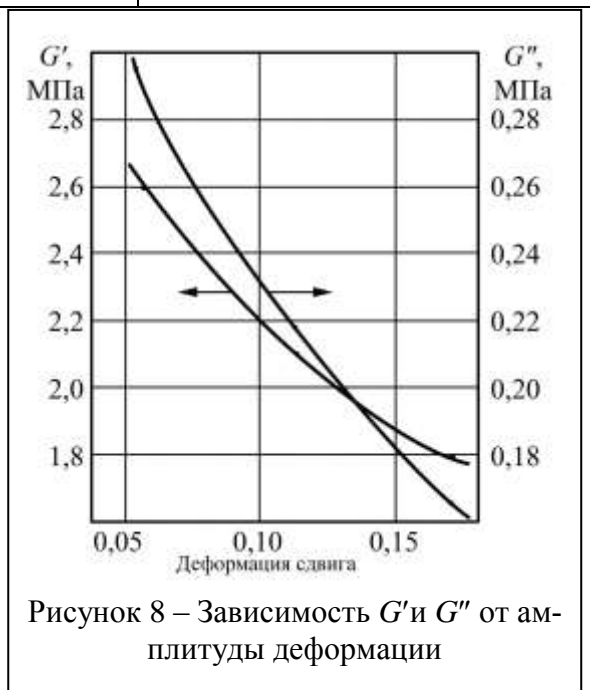
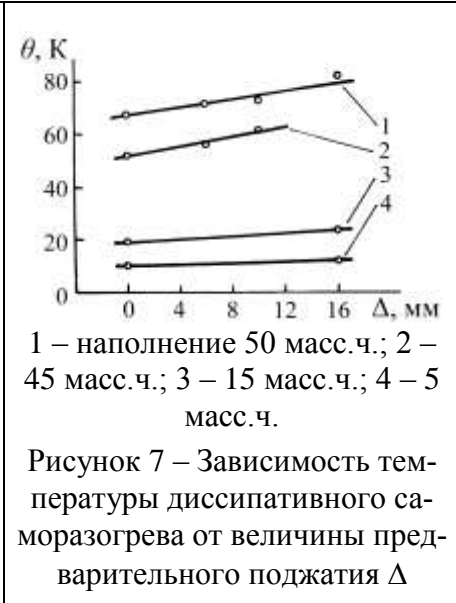
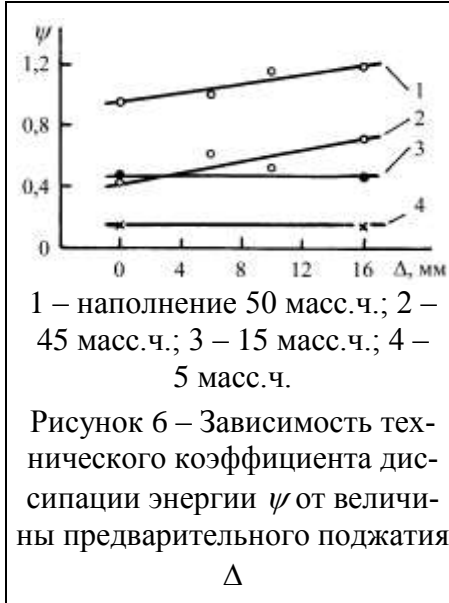
Для них, начиная с относительно малых деформаций, заметно проявляются эффекты, связанные с физической нелинейностью. При описании поведения таких резин необходимо использовать амплитудные зависимости динамического модуля и коэффициента диссипации энергии. На рис. 8 представлены такие зависимости для резиновых элементов, выполненных из резины на основе СКИ-3 с наполнением 75 масс.ч., полученные экспериментально.

Определение влияния направления приложенных деформаций на сдвиговую жёсткость резиновых элементов типа БРМ

Резиновые элементы типа БРМ, используемые в вибрационных машинах, могут подвергаться в них сдвиговым деформациям двух различных видов, получаемых либо параллельным перемещением металлических пластин вдоль большей стороны ℓ (по оси x , см. рис. 1), либо перемещением вдоль меньшей стороны b (по оси z). Назовём сдвиг вдоль стороны ℓ продольным, вдоль стороны b – поперечным; соответственно обозначим: C_ℓ – продольная жёсткость, C_b – поперечная жёсткость.

Ниже приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований с целью определения отношения $\alpha = C_\ell / C_b$.

В инженерной практике для расчёта сдвиговой жёсткости C элементов типа БРМ широко используется простая формула



$$C = GF/H = G\ell b/H, \tag{1}$$

где G – модуль сдвига материала; F – площадь грани элемента, к которой прикладывается нагрузка; H – высота элемента.

Эта формула учитывает зависимость величины жёсткости от типа материала и геометрических размеров элемента, но в предположении однородности напряжённо-деформированного состояния, возникающего в объёме резинового массива под действием внешней нагрузки. При её использовании получаем, что $\alpha = 1$ для любого элемента типа БРМ независимо от соотношения значений ℓ и b .

Формула (1) может быть уточнена путём учёта ужесточающего влияния металлических пластин, привулканизованных к резиновому массиву элемента, обуславливающего значительную неоднородность полей напряжений и деформаций в объёме нагруженного образца. Необходимые функциональные соотношения можно получить на основе решения соответствующих граничных задач теории упругости или вязкоупругости.

В работах [1-3] на основании решения плоских задач теории упругости для призматических тел, соответствующих по форме и видам приложенной нагрузки элементам типа БРМ, с использованием точных методов расчёта сделан вывод о необходимости введения поправочного коэффициента в формулу (1):

$$C = G\beta F/H, \quad (2)$$

где β – поправочный коэффициент.

В общем случае коэффициент β при деформациях сдвига (плоская деформация) определяется выражением

$$\beta = \frac{H/\ell}{\frac{H}{\ell} - \frac{1-\nu}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x_n}{k_n^2}}; \quad (3)$$

при этом принято, что деформирование элемента происходит вдоль стороны ℓ .

Коэффициенты x_n определяются из бесконечной системы линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} x_n t_n = \sum_{j=1}^{\infty} y_j P_{nj} + \frac{b}{y_0 k_n^2}, \\ y_j s_j = \sum_{n=1}^{\infty} x_n P_{nj}, \end{cases} \quad (4)$$

в которой

$$t_n = -\frac{1}{4k_n} \left(\operatorname{cth} k_n - \frac{k_n}{\operatorname{sh}^2 k_n} \right); \quad s_j = \frac{1}{4H\lambda_j} \left[(3-4\nu) \operatorname{tg} \lambda_j y_0 + \frac{\lambda_j H}{\ell \operatorname{ch} \lambda_j y_0} \right];$$

$$P_{nj} = \frac{\lambda_j^2}{\lambda_j^2 + k_n^2} - \frac{1-\nu}{\lambda_j^2 + k_n^2}, \quad b=1; \quad k_n = \frac{(2n-1)\pi}{2y_0}; \quad \lambda_j = \pi j \quad (n, j=1, 2, \dots).$$

Соотношение (3) показывает, что коэффициент β является сложной функцией размеров прямоугольной призмы и коэффициента Пуассона ν . Тем не менее, наличие эффективных алгоритмов решения бесконечных систем указанного вида (4) позволяет с высокой точностью провести расчёт жесткостных характеристик.

Для случая плоской деформации коэффициент β может быть описан выражением

$$\beta = 1 - 0,234 \frac{H}{\ell}, \quad (5)$$

причём при условии $H/\ell \leq 1$ точность формулы (5) не ниже 1 %. Значение коэффициента 0,234 получено в предположении, что коэффициент Пуассона $\nu = 0,5$.

В работах [2, 3] решена соответствующая трёхмерная граничная задача для параллелепипеда, испытывающего деформацию сдвига, методом разложения полей деформаций в тройной ряд Фурье. Автором получен коэффициент ужесточения, аналогичный коэффициенту β , причём их сравнение показало различие менее 1 % при условии $\ell \geq H$.

Таким образом, расчёты теорий упругости дают следующее выражение для искомой величины

$$\alpha = \frac{C_\ell}{C_b} = \frac{1 - 0,234 \frac{H}{\ell}}{1 - 0,234 \frac{H}{b}}. \quad (6)$$

Для проверки этой формулы были проведены экспериментальные исследования элементов типа БРМ на статическом стенде. Методика проведения испытаний аналогична методике, описанной в [1], и отличается только уменьшенным временем выдержки при ступенчатом нагружении – 10 мин.

В результате эксперимента для каждой пары испытанных элементов получено по две зависимости силы сдвига P от деформации ε : одна для продольного сдвига $P_\ell(\varepsilon)$ и одна для поперечного сдвига $P_b(\varepsilon)$. Эти зависимости практически линейны (нелинейность весьма мала). Поэтому воспользуемся следующими формулами для вычисления C_ℓ и C_b

$$C_\ell = \frac{P_\ell(\varepsilon_1) - P_\ell(\varepsilon_2)}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}; \quad C_b = \frac{P_b(\varepsilon_1) - P_b(\varepsilon_2)}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}.$$

Для определённости выбиралось $\varepsilon_1 = 8$ мм, $\varepsilon_2 = 2$ мм.

В табл. 3 приведены результаты теоретического и экспериментального определения величины α . Как видно, совпадение расчётных и экспериментальных данных удовлетворительное.

Таблица 3 – Результаты испытаний призматических резиновых элементов при деформациях продольного и поперечного сдвига

Тип элемента	H , мм	l , мм	b , мм	α эксп.	α теор.
БРМ101	35	100	60	1,10	1,06
БРМ102	30	200	100	1,04	1,07
БРМ103	50	320	100	1,12	1,09
БРМ103Р	50	320	50	1,29	1,26

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что разница в значениях продольной и поперечной жёсткостей для элементов БРМ101, БРМ102 и БРМ103 не превышает 12 %, а для резинометаллических элементов, близких по соотношению размеров к элементу БРМ103Р может превышать 20 %.

Эти данные следует учитывать при расчёте жесткостных параметров упругой подвески вибрационных машин, в которых в качестве упругих звеньев используются элементы типа БРМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булат, А.Ф. Прикладная механика упругонаследственных сред: В 4-х томах / А.Ф. Булат, В.И. Дырда, Е.Л. Звягильский, А.С. Кобец. – Т. 1. Механика деформирования и разрушения эластомеров. – Киев: Наукова думка, 2011. – 568 с.
2. Справочные коэффициенты жесткости призматических и цилиндрических виброизоляторов при сжатии и сдвиге / Сенченков И.К., Шевченко А.Ю., Мазнецова А.В. // Вопросы динамики и прочности. – Рига: Зинатне, 1988. – Вып. 48. – С. 23-28.
3. Универсальный конструкционно-деформационный параметр и β -метод в механике деформирования резиновых деталей / Дырда В.И., Сенченков И.К., Мазнецова А.В., Твердохлеб Т.Е. // Тр. II Междунар. симп. по механике эластомеров. – Днепропетровск, 23-26 июня 1997. – Днепропетровск: Полиграфист, 1997. – С. 204-234.
4. Marvalova, B. Viscoelastic properties of filled rubber. Experimental observations and material modelling / B. Marvalova // Engineering Mechanics. – 2007. – Vol. 14, No. 1/2. – Pp. 81-89.
5. Gonzalez, M.N. Influence of rubber pre-processing on the rheological behavior of SBS/Crumb rubber-modified bitumen / M.N. Gonzalez, M.H. Wagner // Annual Transactions of the Nordic Rheology Society. – 2009. – Vol. 17.

REFERENCES

1. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., Zvyagilskiy, Ye.L. and Kobets, A.S. (2011), *Prikladnaya mekhanika uprugonasledstvennykh sred. Tom 1. Mehanika deformirovaniia i razrusheniia elastomerov* [Applied mechanics of elastic-hereditary media. Vol. 1. Mechanics of deforming and breaking down of elastomers], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
2. Senchenkov, I.K., Shevchenko, A.Yu. and Maznetsova, A.V. (1988), “Reference stiffness coefficients of prismatic and cylindrical vibration isolators under compression and shear”, *Voprosy dinamiki i prochnosti*, no. 48, pp. 23-28.
3. Dyrda, V.I., Senchenkov, I.K., Maznetsova, A.V. and Tverdokhle, T.Ye. (1997), “Universal construction-deformation parameter and β -method in deformation mechanics of rubber parts”, *Trudy II Mezhdunarodnogo simpoziuma po mekhanike elastomerov* [Proceedings of the Second International Symposium on the mechanics of elastomers], Dnepropetrovsk, Ukraine, June 23-26, pp. 204-234.
4. Marvalova, B. (2007), “Viscoelastic properties of filled rubber. Experimental observations and material modelling”, *Engineering Mechanics*, vol. 14, no. 1/2, pp. 81-89.
5. Gonzalez, M.N. and Wagner, M.H. (2009), “Influence of rubber pre-processing on the rheological behavior of SBS/Crumb rubber-modified bitumen”, *Annual Transactions of the Nordic Rheology Society*,

Об авторах

Сокол Сергей Петрович, канд. техн. наук, старший преподаватель Днепропетровского государственного аграрно-экономического университета (ДГАЭУ), Днепропетровск, Украина, info@dsau.dp.ua

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), Днепропетровск, Украина, vita.igtm@gmail.com

About the authors

Sokol Sergey Petrovich, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Teacher of Dnepropetrovsk State Agrarian and Economic University (DSAEU), Dnepropetrovsk, Ukraine, info@dsau.dp.ua

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), Dnipropetrovsk, Ukraine, vita.igtm@gmail.com

Анотація. Розглядаються деформаційні характеристики елементів типу БГМ (блоки гумометалеви), які широко використовуються в різних машинах (вібраційні живильники, конвеєри, грохоти, дробарки і т.д.) у вигляді пружних ланок і віброізоляторів. У таких елементах в процесі експлуатації машин реалізуються деформації простого зсуву, а також поєднання деформацій стиску та зсуву. Елементи в залежності від призначення можуть виготовлятися з гум з різними ступенями наповнення. У статті розглядаються наступні ефекти, що супроводжують деформацію елементів: вплив підтискання; вплив напрямку прикладених деформацій; вплив ступеня наповнення гум технічним вуглецем. Досліджувалися також параметри дисипативного розігріву при тривалих циклічних навантаженнях та стаціонарне температурне поле.

Ключові слова: елементи зсуву типу БГМ, наповнені гуми, дисипативний розігрів, стаціонарне температурне поле

Abstract. The article presents deformation characteristics of the RMB-type elements (rubber-metallic blocks), which are widely used in various machines (vibrating feeders, conveyors, screens, crushers, etc.) in the form of elastic units and vibration isolators. Simple shear deformations and a combination of compressive deformation and shear deformation occur in these elements during machine operation. Depending on the function, the elements can be made of rubber with different degree of filling. The following effects accompanying deformation of elements are considered in the article: impact of prepressure; influence of the direction of the deformation development; effect of the degree of the rubber filling by carbon. Parameters of dissipative heating at continuous cyclic loading and steady-state temperature field were also in the focus of the study.

Keywords: BRM type shear elements, filled rubber, dissipative heating, stationary temperature field

Статья поступила в редакцию 18.04.2015

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук Г.А. Шевченко