

## Экспериментальное исследование вязкоупругих свойств резинокордных композитов с учетом процесса их самонагрева

А. А. Ларин<sup>а,1</sup>, Ю. А. Вязовиченко<sup>а,2</sup>, Е. Барканов<sup>б,3</sup>, М. Ицков<sup>в,4</sup>

<sup>а</sup> Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, Украина

<sup>б</sup> Рижский технический университет, Латвия, Рига

<sup>в</sup> Рейнско-Вестфальская высшая техническая школа, Аахен, Германия

<sup>1</sup> alexeya.larin@gmail.com

<sup>2</sup> viazovychenko.julia@gmail.com,

<sup>3</sup> barkanov@latnet.lv

<sup>4</sup> itskov@km.rwth-aachen.de

*Экспериментально исследованы диссипативные характеристики резинокордных композитов под действием циклической нагрузки с учетом особенностей их самонагрева. Натурные эксперименты проводили на плоских образцах вдоль волокон армирования на одноосное растяжение однонаправленных резинокордных композитов. По результатам испытаний определены кривые деформирования образцов, которые в условиях циклического нагружения формировали петли гистерезиса. Испытания образцов на растяжение проводили при длительном циклическом нагружении на экспериментальной установке INSTRON ElectroPuls E3000 Test System. Экспериментально установлен и изучен процесс существенного самонагрева образцов при их длительном циклическом деформировании. С использованием бесконтактных методов измерения исследовано изменение температуры образцов во времени. Получены закономерности нестационарного их нагрева, а также зависимости температуры стабилизации теплового состояния от условий нагружения. Установлено, что площадь петли гистерезиса, которая формируется при деформировании образцов в стабилизированном по температуре состоянии, нелинейно зависит от амплитуды деформаций. Определены качественные и количественные зависимости модуля потерь, а также коэффициентов диссипации и времен релаксации от частоты нагружения, амплитуды деформаций и температуры, установившейся в результате самонагрева материала. Построены аппроксимационные зависимости модуля потерь композита от частоты нагружения и температуры самонагрева на основе обобщенной трехпараметрической линейной модели Зинера и экспоненциальной зависимости начального модуля упругости от температуры.*

**Ключевые слова:** резинокорды, вязкоупругость, циклическое деформирование, диссипация энергии, самонагревание, модуль потерь, петли гистерезиса, экспериментальные исследования.

**Введение и постановка задачи.** В настоящее время композиционные материалы, состоящие из эластомерной матрицы и разнообразного кордного усиления, например металлического, текстильного, стеклянного, находят широкое применение в современной технике, строительстве, приборах и аппаратах. Так, в транспортном машиностроении слоистые резиновые композиты и резинокорды используются при изготовлении автомобильных и авиационных шин [1], различных демпферов колебаний, прокладок и соединительных шлангов [2]. Указанные материалы входят в состав конструкций в виде отдельных слоев для поддержания формы или усиления и защиты от внешнего повреждения. Кроме того, с целью гашения колебаний резиновые демпферы колебаний подкладывают под опоры мостовых конструкций, железнодорожные рельсы, а также используют в качестве различных прокладок между

детальми машин. Резинокордные композиты также применяются при изготовлении подвесов для валов, работающих в условиях интенсивных колебательных процессов [3]. Таким образом, прочностные и демпфирующие свойства эластомерных композитов значительно влияют на надежность конструкций и машин, их функциональные показатели и безопасность эксплуатации.

Одна из особенностей рассматриваемого вида материала – проявление вязкоупругих свойств, которое сопровождается диссипативными процессами [4]. С одной стороны, это определяет эффективность гашения колебаний и уменьшения шума [5–7]. Однако, с другой стороны, все вышеуказанные элементы конструкций воспринимают преимущественно переменное (циклическое) и/или нестационарное нагружение, что приводит к накоплению усталостных повреждений, а в сочетании с вязкоупругим поведением материала – их самонагреванию. Это явление существенно влияет на функциональные характеристики элементов конструкции. При умеренном нагреве происходит смягчение эластомера, а при его значительном уровне может возобновиться процесс вулканизации, что вызовет охрупчивание материала.

Самонагревание существенно ускоряет процессы старения [8, 9] и деградации [10] указанных материалов, что необходимо учитывать при изучении показателей надежности конструкций [11, 12]. С изменением температуры снижаются характеристики прочности, ускоряется протекание усталостных процессов и, как следствие, уменьшается общий ресурс исследуемой детали или конструкции в целом [13, 14]. Отметим, что протекание процессов самонагревания также имеет определенные особенности. Гетерогенность внутренней структуры композита и сложное напряженно-деформированное состояние (НДС) приводят к неоднородному распределению тепла по элементу конструкции, что, в свою очередь, вызывает дополнительное его термонапряженное состояние. Кроме того, изменение механических свойств из-за нагрева материала может привести к перераспределению характеристик НДС в эксплуатации, изменить места концентрации напряжений и опасные зоны конструкции, которые сформируются, в том числе в результате неоднородного изменения характеристик прочности.

Известны исследования, посвященные изучению процессов самонагревания в резиноподобных материалах [15, 16]. Так, в [17] предложен подход к теоретическому моделированию процесса нагрева автомобильных шин при стационарном деформировании. Авторы ограничиваются исследованием нагрева, вызванного гистерезисными потерями, на линейных моделях исключительно для резиновых слоев без учета влияния кордного усиления. В [18] теоретически и экспериментально исследован нестационарный нагрев резиновых образцов в условиях больших деформаций. При этом применяются нелинейные модели, которые достаточно качественно описывают вязкоупругое поведение материалов при деформациях  $> 100\%$ , но из-за сложности они достаточно трудоемки в вычислительном плане, что ограничивает их использование для решения практических задач. Кроме того, авторы не исследовали влияние изменения амплитуды деформации и частоты нагружения на поведение образцов, а рассмотренные режимы нагружения не приводят к существенному нагреву, который встречается в реальной эксплуатации элементов резинокордных конструкций.

Для важного на практике диапазона деформаций  $0...20\%$ , но при относительно высоких частотах нагружения ( $> 5$  Гц) традиционно применяются линейные подходы к описанию вязкоупругости резинокордных композитов. Так, в [19, 20] при рассмотрении теоретических основ применения процедур гомогенизации к определению эффективных вязкоупругих характеристик ортотропного композиционного материала используется обобщенная модель Максвелла. Экспериментально показано, что такая модель для приведенного в этих работах диапазона частот циклического нагружения с достаточной точностью описывает процесс рассеивания энергии в материале. Однако вопросам зависимости характеристик вязкоупругости от амплитуды деформации, а

также влияния температуры на упругость и время релаксации материала должного внимания не уделяется.

Следует отметить, что для практических задач динамического деформирования резинокордных композитов при частотах циклического нагружения 5...20 Гц может иметь место существенное самонагревание. Поэтому при детальной оценке зависимости их упругих и вязкоупругих характеристик от амплитуды деформации и частоты нагружения необходимо выделить температурную составляющую. С одной стороны, такая процедура подразумевает проведение динамических экспериментов, которые будут сопровождаться одновременным процессом самонагревания образцов, а с другой – дополнительных квазистатических при разных амплитудах деформации в условиях внешнего поддержания фиксированной температуры образца.

Таким образом, исследование вязкоупругих свойств и особенностей гистерезисных потерь резиноподобных композитов, усиленных кордом, так же как и процесса их самонагревания, является актуальной задачей, которая требует дальнейшего развития, что и обусловило цель данной работы – экспериментальное определение диссипативных характеристик резинокордных композитов под действием циклической нагрузки с учетом особенностей их самонагревания, что возможно при решении следующих задач:

экспериментальные исследования по оценке вязкоупругих характеристик композиционного материала, который состоит из резиновой матрицы и имеет однонаправленный текстильный корд;

анализ особенностей процесса самонагревания образцов из выбранного композита при циклическом деформировании;

определение закономерностей формирования площади петли гистерезиса в зависимости от амплитуды деформации и частоты нагружения с учетом температуры, установившейся в результате самонагревания материала.

**Методика проведения экспериментальных исследований.** Для проведения экспериментов в соответствии с постановкой задачи были выбраны образцы из резинокордного однонаправленного композита, армированного текстильным кордом (рис. 1,а). Образцы были изготовлены из материала, который входит в состав пневматических шин, путем вырезки в направлении усиления (рис. 1,б). Геометрия и размеры образцов соответствовали стандарту ISO 527-2-1B для механических испытаний данных материалов: общая длина 150 мм, рабочей части 60 мм, ширина в месте крепления 20 мм, в рабочей части 10 мм, фактическая толщина  $4,8 \pm 0,1$  мм. Плотность укладки кордной нити диаметром 0,63 мм равна  $113 \pm 6$  нитей на 100 мм.

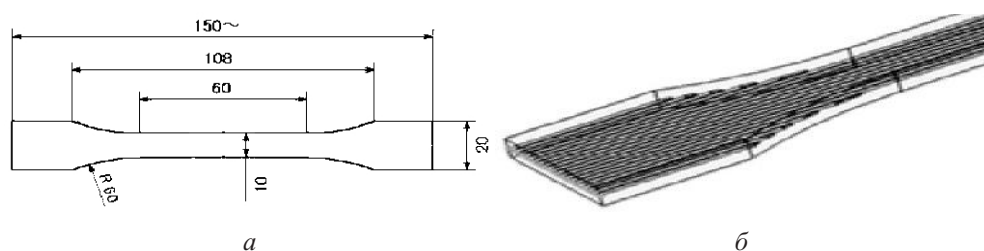


Рис. 1. Геометрические размеры образца (а) и схема армирования материала (б).

Испытания образцов на растяжение проводились при длительном циклическом нагружении на экспериментальной установке INSTRON ElectroPuls E3000 Test System (рис. 2). Образец фиксировался в установке с помощью пневматических захватов.

Одна из особенностей резиноподобных материалов состоит в том, что при их повторном нагружении наблюдается эффект Малинса [21–23], который связан с

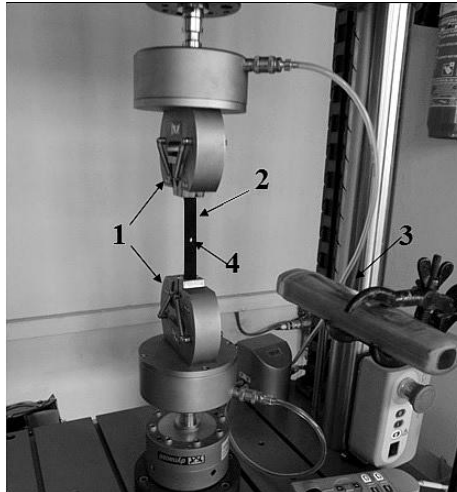


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки INSTRON ElectroPuls E3000 Test System: 1 – захваты; 2 – образец; 3 – лазерный термометр, закрепленный на штативе; 4 – точка измерения температуры.

процессами приработки материала. Новый материал, который нагружался впервые, приобретал остаточные необратимые деформации. В настоящей работе этот эффект не рассматривался, и все свойства материала определялись в стабилизированном состоянии. С целью уменьшения эффекта Малинса образцы подвергались предварительному повторному медленному нагружению с фиксированной амплитудой деформаций 10% и частотой 0,5 Гц (50 цикл).

Эксперименты в жестком цикле нагружения проводились в два этапа. На первом этапе образцы медленно растягивались до деформации  $\varepsilon_0$ , которая являлась средней в дальнейших циклах нагружения, со скоростью 10%/мин. Затем они подвергались циклическому нагружению с фиксированной амплитудой и частотой относительно среднего значения  $\varepsilon_0$ .

Амплитуда деформаций  $\hat{\varepsilon}$  принималась равной 2, 4, 6%, а частота нагружений  $\omega$  изменялась в диапазоне 5...15 Гц с шагом 2,5 Гц.

Схема нагружения образца показана на рис. 3. Результаты испытаний автоматически записывались каждые 0,1 с в виде кривой деформирования для каждого цикла нагружения.

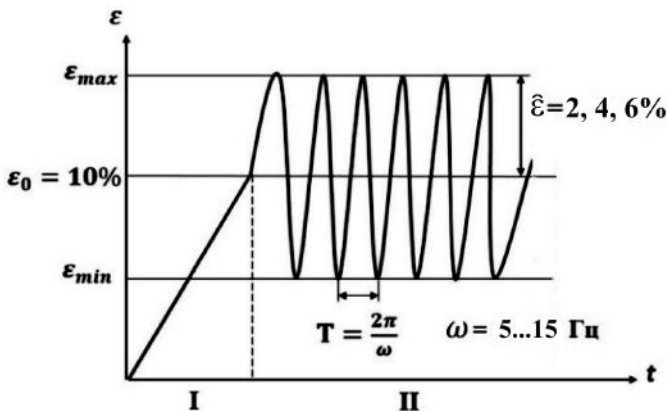


Рис. 3. Схема нагружения образцов (I, II – этапы нагружения).

Диапазон варьирования амплитуд деформаций выбирался исходя из возможных предельных уровней нагружения, которые были определены при испытании образцов на разрыв (рис. 4). Согласно полученным данным нити корда начинают разрываться при деформациях 18...20%. Поэтому предварительная нагрузка и максимальная амплитуда деформации выбирались таким образом, чтобы существовал определенный запас до первого возможного повреждения текстильного корда.



Рис. 4. Кривые деформирования трех образцов при испытании на разрыв со скоростью нагружения 100%/мин.

**Результаты экспериментальных исследований.** По результатам проведенных испытаний были определены кривые деформирования образцов, которые в условиях циклического нагружения формировали петли гистерезиса. Следует отметить, что в процессе каждого испытания со временем наблюдалось их некоторое изменение. В частности, уменьшались наклон петли гистерезиса и ее площадь.

На рис. 5 показано изменение формы и площади петли гистерезиса композитного материала при его циклическом нагружении в направлении кордного усиления. Эти данные объясняются увеличением длины образца и его самонагреванием. Длина образца обусловлена остаточным эффектом Малинса, который невозможно исключить полностью. Кроме того, материал демонстрирует проявление обратной ползучести из-за удлинения образца со временем при фиксированном уровне нагружения. Самонагревание подтверждается экспериментально. Измерение температуры рабочей поверхности образца проводилось каждые 0,5 мин с помощью лазерного термометра марки SNR (рис. 2).

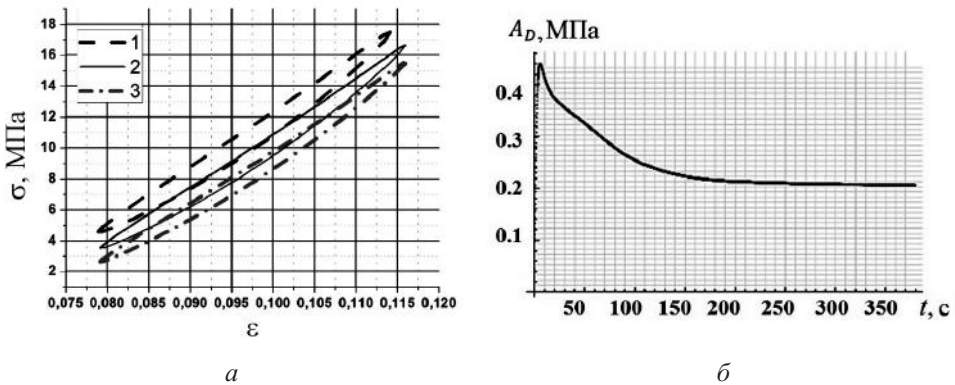


Рис. 5. Изменение во времени формы (а) и площади (б) петли гистерезиса резинокордного композита при циклическом деформировании с  $\hat{\varepsilon} = 2\%$  и  $\omega = 7,5$  Гц: 1, 2, 3 – форма петли гистерезиса на 60-, 300- и 3500-м циклах деформирования соответственно.

Временные зависимости нагрева образцов при различных частотах нагружения  $\omega$  и амплитудах деформаций  $\hat{\varepsilon}$  приведены на рис. 6. Их анализ показывает, что при малых частотах и амплитудах деформаций процесс нагрева образцов происходит постепенно, в то время как с ростом этих характеристик скорость повышения температуры увеличивается.

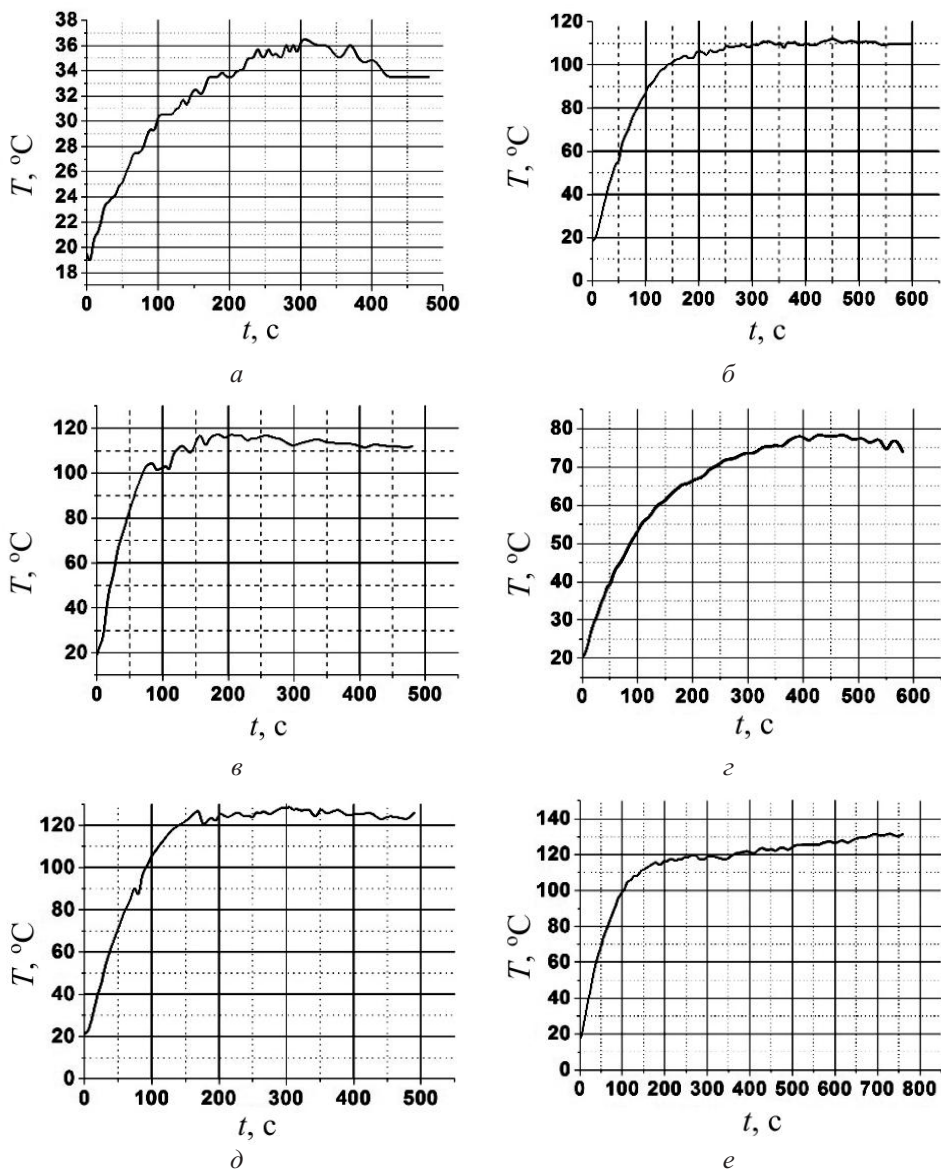


Рис. 6. Временные зависимости нагрева образцов при  $\omega = 7,5$  Гц и  $\hat{\varepsilon} = 2$  (а), 4 (б), 6% (в), а также при  $\hat{\varepsilon} = 4\%$  и  $\omega = 5$  (г), 10 (д), 12,5 Гц (е).

Скорость нагрева до стабилизированного состояния при увеличении амплитуды деформации в интервале 2...6% повышается в шесть раз, а с ростом частоты нагружения с 5 до 15 Гц – в пять раз. Это хорошо видно из приведенных на рис. 7 зависимостей температуры нагрева от частоты нагружения при различных амплитудах деформации.

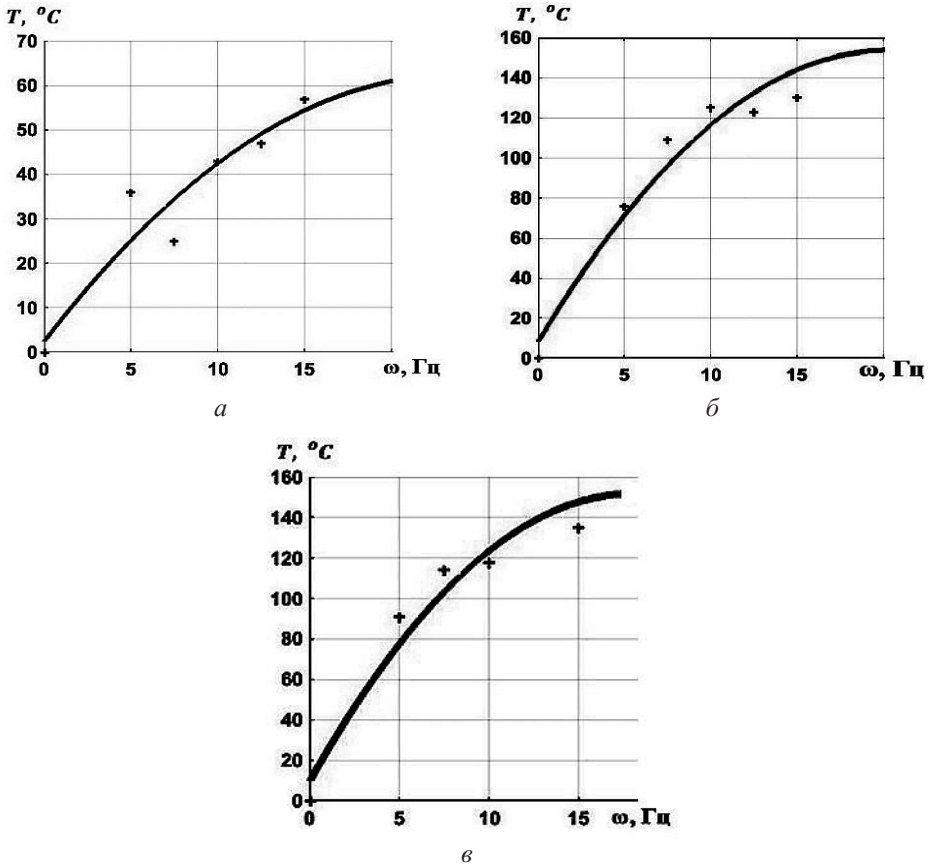


Рис. 7. Зависимость температуры нагрева образцов от частоты нагружения: а –  $\hat{\varepsilon} = 2\%$ ; б –  $\hat{\varepsilon} = 4\%$ ; в –  $\hat{\varepsilon} = 6\%$ .

На рис. 8 представлены кривые, которые получены для материала в стабилизированном состоянии, соответствующем прекращению процесса нагрева и стабилизации температуры. Экспериментальные кривые деформирования отражают результаты нагружения с амплитудами деформаций 2, 4, 6% при минимальной 5 Гц и максимальной 15 Гц частотах нагружения (рис. 8). Видно, что при малых амплитудах деформаций материал проявляет почти линейное поведение, и петля гистерезиса имеет вид эллипса (рис. 8,а,е). С ростом амплитуды деформаций наблюдается искривление петли гистерезиса (рис. 8,б,е). В данном случае нельзя ограничиться линейной моделью поведения материала, необходимо использовать другие, более сложные нелинейные модели [24].

**Теоретическое обоснование экспериментальных результатов.** Для рассматриваемой задачи были построены аппроксимационные кривые изменения площади петель гистерезиса в зависимости от частоты нагружения с учетом температуры фактического самонагрева материала. В работах [5, 6, 25] представлены модели, описывающие поведение различных материалов на основе известных физических закономерностей вязкоупругости. В данном случае предлагается ограничиться использованием обобщенной линейной трехпараметрической модели вязкоупругости Зинера, которая применяется независимо для каждого уровня амплитуды деформаций (рис. 9). Эта модель отражает последовательное соединение упругого и вязкого элементов, которые параллельно соединены с еще одним упругим элементом.

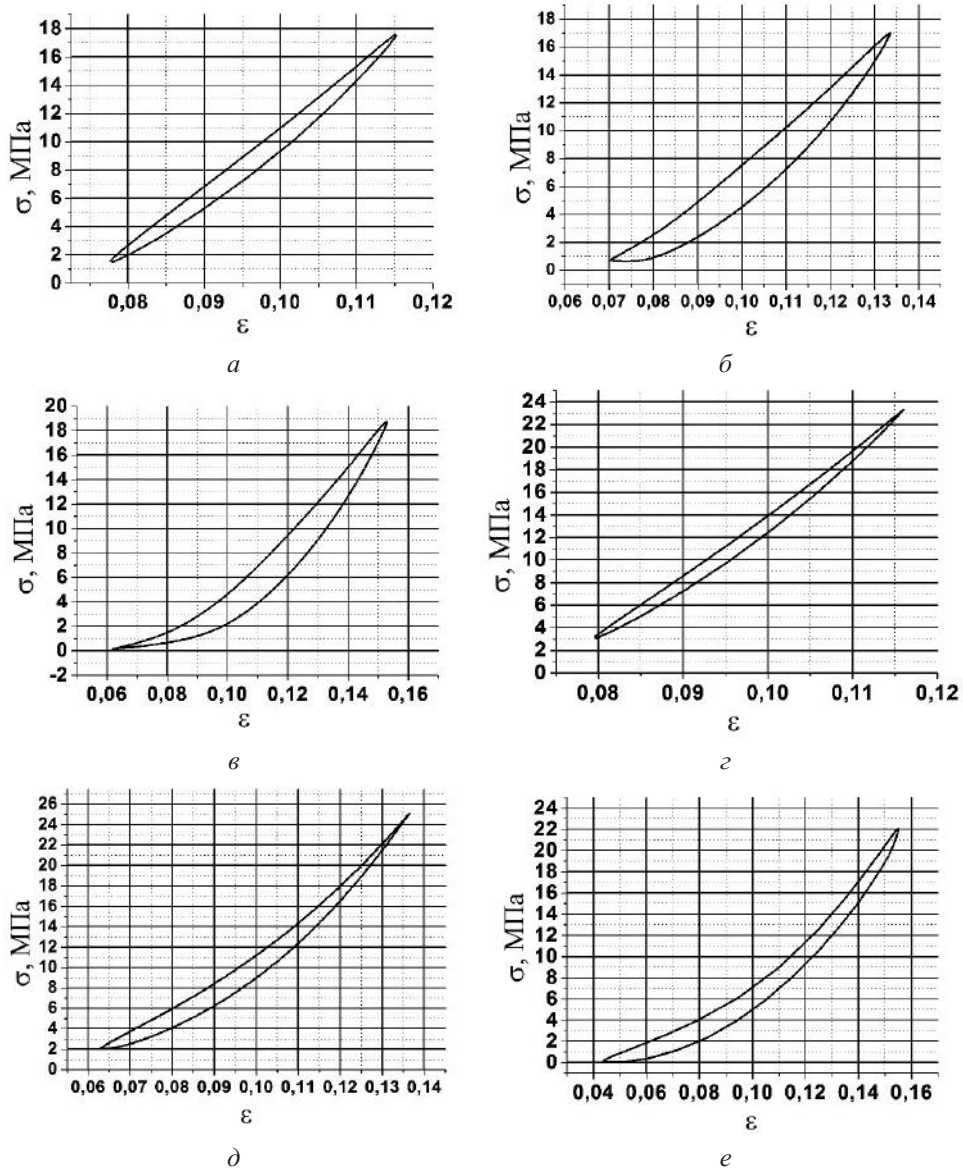


Рис. 8. Кривые деформирования образцов при  $\omega = 5$  (а-в) и 15 Гц (г-е): а, г –  $\hat{\epsilon} = 2\%$ ; б, д –  $\hat{\epsilon} = 4\%$ ; в, е –  $\hat{\epsilon} = 6\%$ .

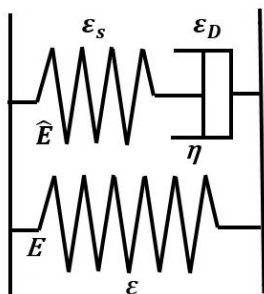


Рис. 9. Обобщенная линейная трехпараметрическая модель вязкоупругости (модель Зинера).



При деформировании материала, который имеет такую физическую структуру (рис. 9), возникают напряжения различной природы: упругая  $\sigma_e$  и вязкая  $\sigma_v$  составляющие:

$$\sigma_e = E\varepsilon, \quad \sigma_v = \eta\dot{\varepsilon}. \quad (1)$$

С учетом того, что при последовательном соединении элементов в них возникают одинаковые напряжения, а при параллельном – одинаковые деформации, будет иметь место равенство [25]:

$$\dot{\sigma} + \frac{\widehat{E}}{\eta}\sigma = \frac{E\widehat{E}}{\eta}\varepsilon + (E + \widehat{E})\dot{\varepsilon}, \quad (2)$$

где  $\eta$  – коэффициент диссипации;  $E$  – модуль упругости на бесконечности, т.е. соответствует стабилизированному в смысле вязкости состоянию;  $(E + \widehat{E})$  – сумма, которая определяет начальный модуль упругости.

Для рассматриваемого случая жесткого цикла нагружения деформация подчиняется гармоническому закону

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \widehat{\varepsilon} \sin \omega t. \quad (3)$$

Решение уравнения (2) для определения напряжений при изменении деформаций по закону (3) будет также подчиняться гармоническому закону, который рационально представить в виде

$$\sigma(t) = E\varepsilon_0 + \widehat{\varepsilon}\{G_1(\omega)\sin \omega t + G_2(\omega)\cos \omega t\}, \quad (4)$$

где  $G_1(\omega)$  – жесткостной модуль, или модуль накопления;  $G_2(\omega)$  – диссипативный модуль, или модуль потерь.

Подставив соотношения (3) и (4) в (2), определим модули накопления и потерь в явной форме как частотно-зависимые функции:

$$G_1(\omega) = E + \widehat{E} \frac{(\omega t_0)^2}{1 + (\omega t_0)^2}; \quad (5)$$

$$G_2(\omega) = \widehat{E} \frac{\omega t_0}{1 + (\omega t_0)^2}, \quad (6)$$

где  $t_0$  – время релаксации,  $t_0 = \eta/\widehat{E}$ .

Экспериментально установлено, что при длительном циклическом нагружении образцы существенно самонагреваются. Известно, что характеристики упругости материала зависят от температуры. Для учета этого эффекта предлагается использовать экспоненциальную зависимость начального модуля упругости  $\widehat{E}$  от температуры:

$$\widehat{E} = E_0 e^{m(T_1 - T)}, \quad (7)$$

где  $E_0$ ,  $m$  – коэффициенты, определяемые экспериментально;  $T_1$  – начальная температура.

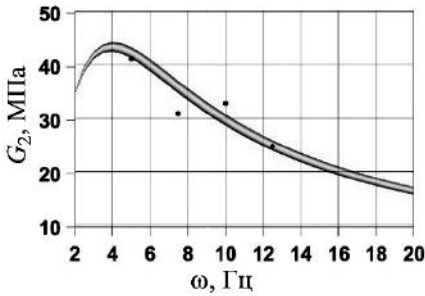
Механическая энергия (работа), рассеиваемая в течение одного цикла деформирования, зависит от площади петли гистерезиса, которая определяется следующим интегралом за период цикла:

$$A_D = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \sigma(t) \dot{\varepsilon}(t) dt = \hat{\varepsilon}^2 \omega \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} [G_1(\omega) \sin \omega t + G_2(\omega) \cos \omega t] \cos \omega t dt \quad (8)$$

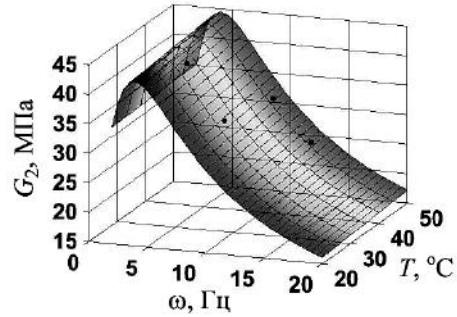
и имеет аналитическое решение:

$$A_D = \pi \hat{\varepsilon}^2 G_2(\omega). \quad (9)$$

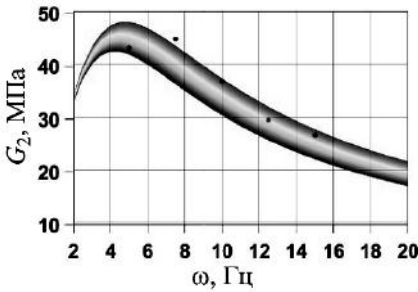
Использование формулы (8) позволяет экспериментально определить модуль потерь  $G_2$  для материала в стабилизированном состоянии и при фиксированных условиях нагружения, т.е. при заданной частоте и амплитуде деформации за цикл.



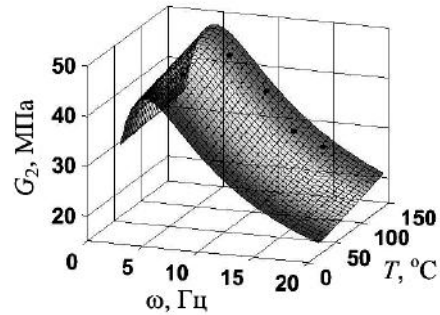
а



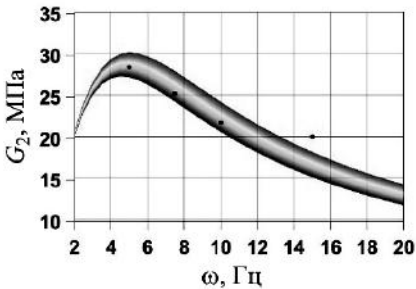
б



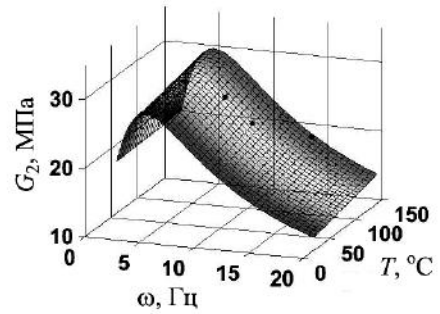
в



г



д



е

Рис. 10. Аппроксимационная зависимость модуля потерь от частоты и температуры при амплитудах деформаций, равных 2 (а, б), 4 (в, г) и 6% (д, е).

Рис. 10 демонстрирует аппроксимационную зависимость модуля потерь  $G_2$  от частоты и температуры, построенную на основе экспериментальных данных по формулам (6), (7). Видно, что предложенные аппроксимационные зависимости достаточно хорошо описывают результаты экспериментальных исследований. Следует отметить, что использование моделей Максвелла и Зинера без учета температуры самонагрева приводит к погрешности аппроксимации 11...17% в зависимости от частоты нагружения и амплитуды деформации. В то же время учет температуры самонагрева позволяет уменьшить погрешность до 5% и таким образом расширить использование указанных моделей. Это дает возможность построить эффективные численные процедуры для оценки динамического вязкоупругого деформирования резинокордного композита.

Анализ результатов аппроксимации показывает, что наиболее существенно диссипативные свойства материала проявляются при частотах нагружения 3...6 Гц. Имеет место небольшая амплитудная зависимость. Так, с увеличением амплитуды деформаций с 2 до 6% максимум рассеиваемой энергии смещается с 4 к 5 Гц.

В таблице приведены коэффициенты аппроксимации, которые получены отдельно для различных амплитуд деформаций, что свидетельствует о существенной зависимости модуля потерь от амплитуды деформации.

**Коэффициенты аппроксимации**

$\hat{\varepsilon}$ , %	$E_0$ , МПа	$m$ , °C <sup>-1</sup>	$\eta$ , МПа·с	$t_0$ , с	$T_1$ , °C
2	86	-0,0012	22	0,26	23
4	85	-0,0010	20	0,24	23
6	55	-0,0008	12	0,21	23

Начальный модуль упругости практически не изменяется в пределах 2...4% амплитуды деформации данного материала, но с ее увеличением до 6% он понижается на 35%. Аналогичное поведение наблюдается для коэффициента диссипации материала, который уменьшается на 40% при тех же условиях. Время релаксации при этом сокращается менее значительно: увеличение на каждые 2% амплитуды деформации приводит к снижению времени релаксации на 10%.

## Выводы

1. Представлены экспериментальные результаты определения вязкоупругих (диссипативных) характеристик и особенностей процесса самонагрева образцов из резинокордного композита в направлении его армирования на одноосное растяжение с циклическим деформированием при разных амплитудах деформации и частотах нагружения.

2. Получены петли гистерезиса для различных частот нагружения и амплитуд деформаций. Установлено, что петля гистерезиса со временем нагружения изменяется количественно и качественно, что обусловлено увеличением длины образца и его самонагреванием.

3. Экспериментально исследовано изменение температуры образца во времени. Получены закономерности нестационарного нагрева образцов, которые демонстрируют участки интенсивного повышения температуры и ее стабилизацию. Показано, что скорость нагрева образцов до стабилизированного состояния с изменением амплитуды деформации в интервале 2...6% повышается в шесть раз, а с увеличением частоты нагружения от 5 до 15 Гц – в пять раз.

4. Установлено, что площадь петель гистерезиса, которая формируется при деформировании образцов в стабилизированном по температуре состоянии, нелинейно зависит от амплитуды деформаций. При малой амплитуде деформации петли гистерезиса имеют вид эллипса, с ее увеличением они существенно искривляются.

5. С использованием обобщенной линейной модели вязкоупругости Зинера построены аппроксимационные зависимости модуля потерь от частоты нагружения и температуры с учетом экспоненциальной зависимости начального модуля упругости от температуры.

## Резюме

Експериментально вивчено дисипативні характеристики гумокордних композитів під дією циклічного навантаження з урахуванням особливостей їх самонагрівання. Натурні експерименти проводили на плоских зразках уздовж волокон армування на одноосьовий розтяг односпрямованих гумокордних композитів. За результатами випробувань визначено криві деформування зразків, які в умовах циклічного навантаження формували петлі гістерезису. Випробування зразків на розтяг проводили при тривалому циклічному навантаженні на експериментальній установці INSTRON ElectroPuls E3000 Test System. Експериментально встановлено і вивчено процес суттєвого самонагрівання зразків при їх тривалому циклічному деформуванні. Із використанням безконтактних методів досліджено зміну температури зразка в часі. Отримано закономірності нестационарного їх нагрівання та залежності температури стабілізації теплового стану від умов навантаження. Показано, що площа петель гістерезису, яка формується при деформації зразків у стабілізованому по температурі стані, нелінійно залежить від амплітуди деформацій. Визначено якісні і кількісні залежності модуля втрат та коефіцієнтів дисипації і часу релаксації від частоти навантаження, амплітуди деформацій і температури, яка встановлюється в результаті самонагрівання матеріалу. Побудовано апроксимаційні залежності модуля втрат композита від частоти навантаження і температури самонагрівання на основі узагальненої трипараметричної лінійної моделі Зінера й експоненціальної залежності початкового модуля пружності від температури.

1. Kondé A. K., Rosu L., Lebon F., et. al. Thermomechanical analysis of an aircraft tire in cornering using coupled ale and lagrangian formulations. *Cent. Eur. J. Eng.* 2013. **3**, No. 2. P. 191–205.
2. Gonçalves De Lima A., Rade D., Lacerda H., et. al. Influence of the combined dynamic and static strains on the self-heating phenomenon in viscoelastic dampers. 22nd International Congress on Mechanical Engineering – COBEM 2013 (November 3–7, 2013, Ribeirao Preto, Brazil). P. 9739–9747.
3. Hguyen D. A., Dang J., Okui Y., et. al. An improved rheology model for the description of the rate-dependent cyclic behavior of high damping rubber bearings. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 2015. **77**. P. 416–431.
4. Koutsawa Y., W. L. Azoti, Belouettar S., et. al. Loss behavior of viscoelastic sandwich structures: A statistical-continuum multi-scale approach. *Compos. Struct.* 2012. **94**, No. 4. P. 1391–1397.
5. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. Киев: Наук. думка, 1971. 375 с.
6. Писаренко Г. С. Рассеяние энергии при механических колебаниях. Киев: Изд-во АН УССР, 1962. 436 с.

7. Зиньковский А. П., Токарь И. Г., Круц В. А., Круглий Я. Д. Влияние рассеяния энергии в материале на колебания лопаток с неоднородностями. *Авиаци. косм. техника и технология*. 2012. № 9 (96). С. 132–137.
8. Woo C. S., Choi S. S., Lee S. B., and Kim H. S. Useful lifetime prediction of rubber components using accelerated testing. *IEEE T. Reliab.* 2010. **59**, No. 1. P. 11–17.
9. Lejeunes S., Eyheramendy D., Boukamel A. A., et. al. A constitutive multiphysics modeling for nearly incompressible dissipative materials: application to thermo-chemo-mechanical aging of rubbers. *Mech. Time-Depend. Mater.* 2018. **22**, No. 1. P. 51–66.
10. Larin O. and Vodka O. A probability approach to the estimation of the process of accumulation of the high-cycle fatigue damage considering the natural aging of a material. *Int. J. Damage Mech.* 2015. **24**, No. 2. P. 294–310.
11. Larin O. O. Probabilistic model of fatigue damage accumulation in rubberlike materials. *Strength Mater.* 2015. **47**, No. 6. P. 849–858.
12. Larin O. O., Trubayev O. I., and Vodka O. O. The fatigue life-time propagation of the connection elements of long-term operated hydro turbines considering material degradation. *Vestnik PNIPU. Mekhanika*. 2014. No. 1. P. 167–193.
13. Seichter S., Koch T., Archodoulaki V.-M., et. al. Investigation of different influences on the fatigue behaviour of industrial rubbers. *Polym. Test.* 2017. **59**. P. 99–106.
14. Cardone D. and Gesualdi G. Experimental evaluation of the mechanical behavior of elastomeric materials for seismic applications at different air temperatures. *Int. J. Mech. Sci.* 2012. **64**, No. 1. P. 127–143.
15. Luo W., Hu X., Wang C., and Li Q. Frequency- and strain-amplitude-dependent dynamical mechanical properties and hysteresis loss of CB-filled vulcanized natural rubber. *Int. J. Mech. Sci.* 2010. **52**, No. 2. P. 168–174.
16. Ovalle Rodas C., Zaïri F., Naït-Abdelaziz M. A., and Charrier P. Thermo-visco-hyperelastic model for the heat build-up during low-cycle fatigue of filled rubbers: Formulation, implementation and experimental verification. *Int. J. Plasticity*. 2014. **79**. P. 217–236.
17. Cho J. R., Lee H. W., Jeong W. B., et. al. Numerical estimation of rolling resistance and temperature distribution of 3-D periodic patterned tire. *Int. J. Solids Struct.* 2013. **50**, No. 1. P. 86–96.
18. Ghoreishy M. H. R., Firouzbakht M., and Naderi G. Parameter determination and experimental verification of Bergström–Boyce hysteresis model for rubber compounds reinforced by carbon black blends. *Mater. Design*. 2014. **53**. P. 457–465.
19. Шешенин С. В., Чистяков П. В., Закалюкина И. М. Применение модели вязкоупругости Максвелла для резинокордного композита. *Науковедение*. 2017. **9**, № 4. С. 21–35.
20. Шешенин С. В., Чистяков П. В., Вакулюк В. В. Исследование вязкоупругих свойств брекерной резины. Упругость и неупругость (Матер. междунар. науч. симп. по проблемам механики деформируемых тел, посвященного 105-летию со дня рождения А. А. Ильюшина, 20–21 января, 2016 г., Москва). М.: Изд-во Моск. ун-та, 2016. С. 430–435.
21. Diani J., Fayolle B., and Gilormini P. A review on the Mullins effect. *Eur. Polym. J.* 2009. **45**, No. 3. P. 601–612.
22. Khiêm V. N., Dargazany R., and Itskov M. Constitutive modeling of cyclic stress softening in filled elastomers. *PAMM - Proc. Appl. Math. Mech.* 2013. **13**, No. 1. P. 143–144.

23. Itskov M., Ehret A., Kazakeviciūtė-Makovska R., and Weinhold G. W. A thermodynamically consistent phenomenological model of the anisotropic Mullins effect. *ZAMM - Z. Angew. Math. Me.* 2010. **90**, No. 5. P. 370–386.
24. Матвеев В. В., Богинич О. Е. Влияние неупругого сопротивления на вибродиагностические параметры наличия закрывающейся трещины в упругом теле при супергармоническом резонансе. *Пробл. прочности.* 2014. № 4. С. 21–35.
25. Haupt P. *Continuum Mechanics and Theory of Materials.* Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. 643 с.

Поступила 09. 11. 2017