

УДК 678.4.66:621.81

Логінова А.А., аспірант
(Государственное ВУЗ «НГУ»),
Дырда В.И., д-р техн. наук, профессор
(ИГТМ НАН Украины)

ТЕРМИЧЕСКОЕ СТАРЕНИЕ МАССИВНЫХ РЕЗИНОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГОРНЫХ МАШИН В НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Логінова А.О., аспірант
(Державний ВНЗ «НГУ»),
Дирда В.І., д-р техн. наук, професор
(ІГТМ НАН України)

ТЕРМІЧНЕ СТАРІННЯ МАСИВНИХ ГУМОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ГІРНИЧИХ МАШИН У НАПРУЖЕНОМУ СТАНІ

Loginova A.A., Doctoral Student
(State HEI “NMU”),
Dyrda V.I., D. Sc. (Tech.), Professor
(IGTM NAS of Ukraine)

THERMAL AGING OF STRESSED MASSIVE RUBBER ELEMENTS IN MINING MACHINES

Аннотация. Проанализирован процесс термического старения массивных резиновых элементов горных машин в напряжённом состоянии. Описано влияние на характеристики резины различных сред и условий эксплуатации (напряжение, температура, агрессивное влияния внешней среды). Выявлены закономерности и получены зависимости определяющие термическое старение резины в условиях статического нагружения. На основании полученных зависимостей сделан вывод о том, что термическое воздействие на резиновые элементы в условиях статического нагружения приводит к уменьшению их жесткостных параметров и уменьшению коэффициента диссипации энергии. Это, в свою очередь, приведет к изменению амплитудно-частотных характеристик машин.

Также были получены экспериментальные данные, показывающие, что щелочная среда при комнатной температуре линейно уменьшает жёсткость виброизоляторов, что связано с набуханием образцов. При 100°C и действии щелочной среды жёсткость образцов линейно возрастает, что связано с преобладанием влияния термодеструкции на жесткостные параметры образцов.

Полученные результаты рассматриваются в приложении к динамике конвейера KB1T-0.15 с виброизоляторами типа ВР-201 и инерционным приводом. В результате расчётов видно, что за счет термического старения статически напряженных виброизоляторов при постоянных частоте колебаний и силе инерции за 1250 часов наблюдения амплитуда уменьшилась с 3 мм до 2,6 мм.

Ключевые слова: термическое старение резины, влияние агрессивной среды на резиновый элементы, окислительные реакции в резине,

Под старением резин обычно понимают процесс изменения их свойств во времени под действием эксплуатационных факторов – напряжения, температу-

ры и агрессивного влияния внешней среды. В резиновых изделиях малой толщины при незначительных температурах старение происходит вследствие термоокислительных процессов; в массивных резиновых деталях при высоких температурах преобладают термические реакции. В реальных условиях эксплуатации могут протекать оба типа реакций одновременно. Старение приводит к уменьшению работоспособности резиновых изделий, особенно силовых деталей (шин, защитных футеровок, сит, виброизоляторов и т.д.), поэтому его изучением занимаются представители самых различных отраслей науки. Достаточно назвать таких исследователей как Регель В.Р., Бартенев Г.М., Зуев Ю.С., Кузьминский А.С., Зеленев Ю.В., Эммануэль Н.М. и т.д.; исследования этих и многих других учёных представлены в обширной литературе; часть их цитируется ниже [1-14].

Результаты этих исследований изложим в виде кратких эмпирических обобщений.

1. В резиновых изделиях при длительном нагружении изменяются физико-механические характеристики: модуль сдвига монотонно возрастает, коэффициент диссипации обычно уменьшается.

2. Основной причиной старения резин, по мнению многих авторов [1-12], являются окислительные процессы, вызываемые действием кислорода воздуха; механические напряжения, свет, радиация, теплота, внешняя агрессивная среда способствуют активации этого процесса.

3. Окислительные реакции в резине (особенно в массивных силовых изделиях) вызывают действие двух процессов, конкурирующих между собой: деструкции и структурирования. Доля участия преобладающего процесса и определяет свойства изделия.

4. По мнению авторов [5], усталостная выносливость резин существенно зависит от содержания кислорода воздуха. При этом окислительное дефектообразование в полимерных цепях происходит преимущественно в процессе нагружения образцов. Однако, как было отмечено при многочисленных экспериментальных исследованиях, эффект влияния среды снижается с повышением температуры, величины деформации и напряжения. Так, процесс старения резин на основе НК и СКИ-3 (двухсторонние лопатки, время старения 72 ч, температура 100°C) в условиях циклического деформирования при небольших деформациях растяжения (20-30 %) протекает с меньшей интенсивностью, чем старение резин в недеформированном состоянии. Авторы считают, что причиной такого эффекта может быть влияние динамического деформирования на скорость протекающих в резине химических реакций. Такая же закономерность была отмечена и в работе [6] при сравнении интенсивности старения стандартных резиновых образцов при статических и динамических напряжениях. В целом кислород воздуха отрицательно влияет на выносливость резин; при этом дефекты на поверхности резиновых образцов образуются раньше, чем в объёме материала, и разрастаются с большей скоростью.

5. Существенное влияние на усталостную долговечность резиновых изделий (особенно тонкостенных) оказывает озон. По мнению авторов [7, 8], под влия-

нием озона происходит химический разрыв двойных связей в молекулах, что вызывает озонное растрескивание трещины, которая испытывает статические или динамические нагрузки. Авторы [8] изучили два механизма разрастания трещин в резиновых образцах: озонное растрескивание, вызванное влиянием озона в местах концентрации напряжений, и механо-окислительное разрушение резины, обусловленное полем напряжений. Влияние концентрации напряжений на развитие озонных трещин оценивалось энергией раздира: при высоких энергиях раздира, что характерно для защищённых резин, происходит механо-окислительное разрушение резин, обусловленное, с одной стороны, механическим раздиранием разреза, а с другой стороны – окислением кислорода воздуха. Авторы отметили, что на усталостную долговечность резины существенно влияет величина деформации образца (авторы исследовали, в основном, деформации многократного растяжения образцов); при этом, по их мнению, основным фактором разрушения резины является механо-окислительный рост трещин. Отмечается также, что для защиты резиновых изделий от озонового растрескивания можно использовать восковое покрытие и уменьшение концентрации напряжений, что достигается правильной конструкцией изделий.

6. Механические напряжения ускоряют развитие окислительных процессов. Согласно термофлуктуационной теории прочности разрушение резины определяется разрывами межатомных перенапряжённых связей тепловыми флуктуациями. В этом случае долговечность резины τ описывается уравнением С.Н. Журкова

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\right),$$

где τ_0 – собственная частота колебаний атомов в цепи, равная 10^{12} с; U_0 – энергия активации распада химических связей в полимерной цепи; γ – коэффициент перенапряжения; σ – напряжение; T – температура; R – постоянная Больцмана.

Аналогичное уравнение для определения долговечности резины предложил Г.М. Бартенев [12]

$$\tau = B\sigma^{-m} \exp\left(\frac{V}{RT}\right),$$

где V – энергия активации вязкого течения каучука, на основе которого изготовлена резина; B , m – эмпирические константы.

Из этого уравнения следует, что напряжения не влияют на энергию активации резины; вместе с тем они влияют на энтропию системы, в результате чего изменяется величина B , которая, согласно кинетической теории прочности, имеет энтропийную природу.

7. Уже в ранних работах [2] по старению эластомеров в напряжённом состоянии отмечалось, что окисление резиновых изделий, контактирующих с воздухом, в основном, протекает на поверхности. Авторы [11] исследовали влияние напряжений на старение резиновых колец круглого сечения, используемых

в качестве уплотнений. В обычных эксплуатационных условиях такие уплотнители воздуха высокого давления испытывают частично напряжения объёмного сжатия. Авторы отмечают, что в области контакта резина – металл с увеличением напряжений степень окисления резины уменьшается; в области свободного контура, где растягивающие напряжения малы, степень окисления остаётся практически постоянной.

8. На усталостные и гистерезисные свойства резин большое влияние оказывает предварительное тепловое старение, обусловленное, например, повышенной температурой при хранении изделий в складских помещениях [9]. В работе [4] были проведены исследования по влиянию предварительного теплового старения при утомлении образцов при комнатной температуре в режиме асимметричного цикла на машине МРС-2. Отмечается, что предварительное тепловое старение ненагруженных образцов при температуре 100°C в течение 360 ч увеличивает прочность при растяжении, но уменьшает циклическую долговечность.

9. Известно [2, 6, 7, 10], что агрессивные среды типа бензина, различных масел, воды с повышенной рН и т.д. существенно влияют на усталостную выносливость резин. В работе [3] исследовалось влияние бензина и ацетона на структуру поверхностного слоя и усталостную долговечность модельных образцов из СКИ-3 (ширина 20 мм, толщина 45-65 мкм, длина рабочей части 50 мм). Методом инфракрасной спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) было установлено, что после выдержки образцов в бензине (в течение 3 и 24 ч при температуре 20°C) их долговечность снижалась, а образцов, обработанных ацетоном, – практически не изменялась. Ухудшение усталостных свойств образцов из СКИ-3 авторы связывают с изменением структуры поверхностного слоя при набухании в бензине и ростом числа микродефектов в результате механической деструкции резины под действием напряжений растяжения.

10. По старению резин под действием агрессивной среды (кислоты, щелочи) имеется обширная литература (см. [11, 12, 14]), касающаяся в основном исследований стандартных резиновых образцов; массивные изделия практически не рассматривались. Результаты этих исследований в виде кратких обобщений:

- совокупность физико-химических изменений в резине под влиянием агрессивных сред определяют как хемодеструкцию: одно из основных отличий старения резин является их набухание:

- следствием набухания является: увеличение объёма резины, массы образцов, изменение всех физико-механических характеристик; набухание является обратимым процессом, после удаления агрессивной среды свойства резины восстанавливаются;

- для тонких резиновых образцов (двухсторонние стандартные лопатки) одновременное действие механических напряжений и агрессивной среды приводит к разрушению образцов [11, 14]; для массивных изделий подобные исследования в доступной литературе отсутствуют;

- известно, что набухание существенно влияет на процесс старения резин; так, для резин на основе натурального каучука было отмечено, что константы скорости деструкции набухших вулканизатов в 3-4 раза выше, чем не набухших [11, 14].

Из приведенного обзора можно сделать следующие выводы:

- по мнению большинства исследователей, понятие старения включает в себя все механические, химические и электрические явления, которые приводят к необратимому изменению свойств резины. При этом механические и химические процессы могут взаимно влиять друг на друга и разделить их влияние на конечный результат весьма проблематично;

- большинство исследований процессов старения проводились на стандартных резиновых образцах (тонкие двухсторонние лопатки) с использованием ускоренных методов испытаний за счёт повышения температуры до 60-120°C;

- отсутствуют сведения о совместном влиянии повышенных температур и механических напряжений на процесс старения массивных силовых резиновых и резинометаллических изделий, особенно в условиях эксплуатации горных и горно-металлургических предприятий.

С этой целью в настоящей работе проводились исследования по двум направлениям:

1. Изучение процессов старения массивных силовых резиновых изделий при совместном действии повышенных температур и статических напряжений.

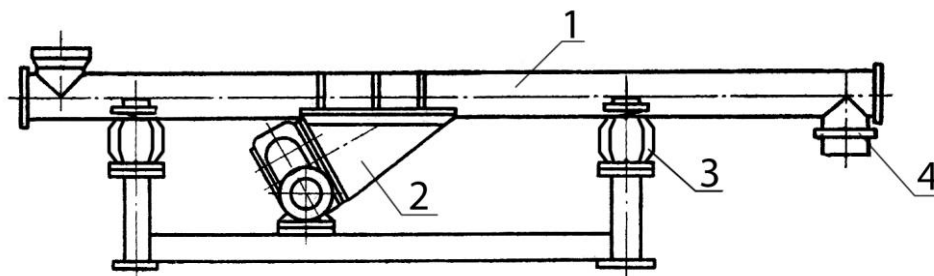
2. Изучение влияния активной внешней среды (озон, пыль, высокая концентрация рН) на массивные резиновые изделия в условиях эксплуатации вибрационных машин (грохотов, конвейеров и т.д.) на горных и горно-металлургических предприятиях.

Влияние внешней активной среды на старение резин в условиях горных и горнорудных предприятий. При эксплуатации машин и оборудования с резиновыми элементами в условиях таких предприятий резина может испытывать влияние повышенных и пониженных температур и действие активных агентов типа масел, кислот, щелочей и озона воздуха. В [1] рассматривалась механика разрушения резиновых элементов с учётом влияния активной среды: отмечалось, что массивные элементы удовлетворительно противостоят действию озона, солнечной радиации, пыли и сажи благодаря именно своему большому объёму. При этом повреждённый верхний слой резины, озонные трещины и «твёрдая корочка» (толщина 0,2-0,5 мм, состоит из твёрдых частиц пыли и сажи, при длительных циклических нагрузках сохраняется) практически не влияет на механические характеристики резин, но в определённых условиях могут способствовать разрушению изделия. Более существенное влияние на резину оказывают температурное поле и щелочи.

Рассмотрим влияние именно этих активных агентов на старение резиновых элементов вибрационных машин (грохотов, виброконвейеров, дробилок, сушилок и др.) в условиях эксплуатации обогатительных фабрик горно-металлургических предприятий. В процессе транспортирования и переработки минерального сырья резиновые элементы таких машин испытывают статиче-

ское поджатие от массы колеблющихся частей и динамическое нагружение с амплитудой от 1 до 12 мм и частотой 750-1500 об/мин. Так, вибрационный однотрубный конвейер типа КВ1Т-0,15 предназначен для герметичной транспортировки сыпучих, кусковых, пылящих, токсичных, агрессивных и абразивных материалов с температурой не выше 100°C (рис. 1); вибрационная конвективная сушилка СВК-1.0/4.0 предназначена для сушки материалов при температуре до 200°C; режим работы этих машин: амплитуда колебаний 1-4 мм; частота – 12,5 Гц. В качестве упругих звеньев используются виброизоляторы типа ВР-201; внешняя активная среда: температура виброизоляторов 70-90°C (совместно с температурой от диссипативного саморазогрева) и щелочная среда с рН = 10-25 г/л.

Рассмотрим влияние этих активных агентов отдельно.



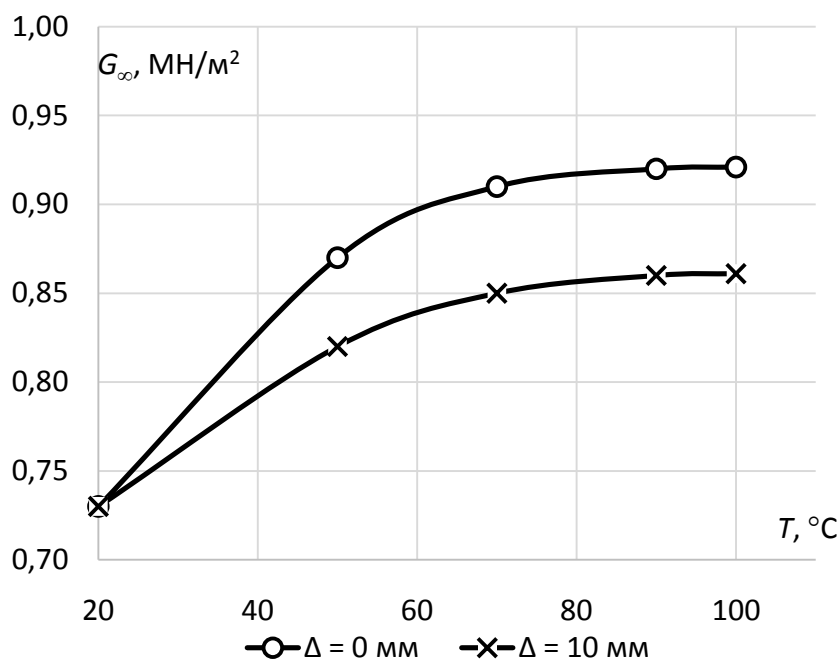
1 – рабочий орган; 2 – инерционный вибратор; 3 – резиновый элемент типа ВР-201;
4 – резиновый герметизатор

Рисунок 1 – Конвейер вибрационный однотрубный

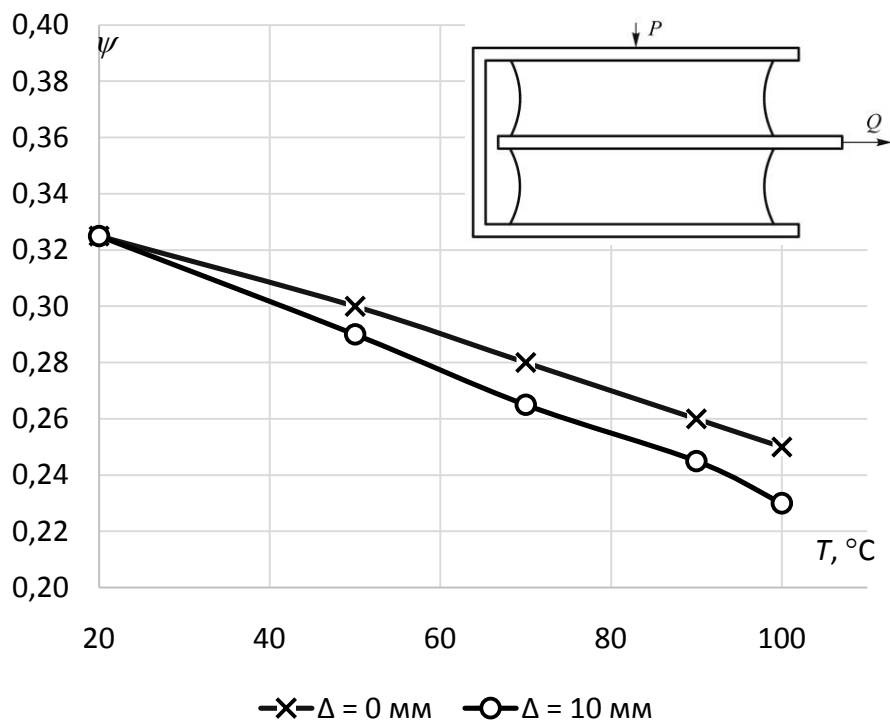
Влияние повышенных температур на старение резин в напряжённом состоянии. В качестве модельных образцов были выбраны резиноталлические элементы типа БРМ101 из резины марки А (на основе СКИ-3, 45 масс.ч. технического углерода). В качестве информативных параметров выбирались: условно-равновесный модуль сдвига G_{∞} , определяемый по кривой релаксации, и коэффициент диссипации энергии ψ , определяемый по динамической петле гистерезиса. Элементы БРМ101 попарно зажимались в струбцины с поджатием 0,5 и 10 мм, что соответствовало эксплуатационным условиям в таких вибромашинах, как виброконвейеры типа КВ1Т и КВ2Т, и вибропитателях типа ПВГ и ВПР. Температуры испытаний устанавливались согласно ГОСТ 9.707-86: так, для резины на основе СКИ-3 температуры были равны: 50, 70, 90 и 100°C. По этому же стандарту устанавливалось также приемлемое время испытаний – 1250 ч. Испытаниям для каждой температуры подлежали три пары элементов, жесткость на сдвиг которых отличалась не более чем на 5%. Физико-механические параметры образцов G_{∞} и ψ определялись дважды: в исходном состоянии при температуре +20°C и через 1250 ч; промежуточные испытания через 500 ч проводились выборочно.

После испытаний образцов при температуре +20°C и статическом поджатии $\Delta = 0$ образцы помещались в термокамеру и выдерживались при заданной температуре с погрешностью $\pm 1^\circ\text{C}$. После окончания испытаний образцы охлажда-

лись до $+20^{\circ}\text{C}$ и подвергались испытаниям согласно методике [1]. Результаты испытаний, обработанные на компьютере с использованием критерия Стьюдента с доверительной вероятностью 0,92, показаны на рис. 2 – рис. 4.

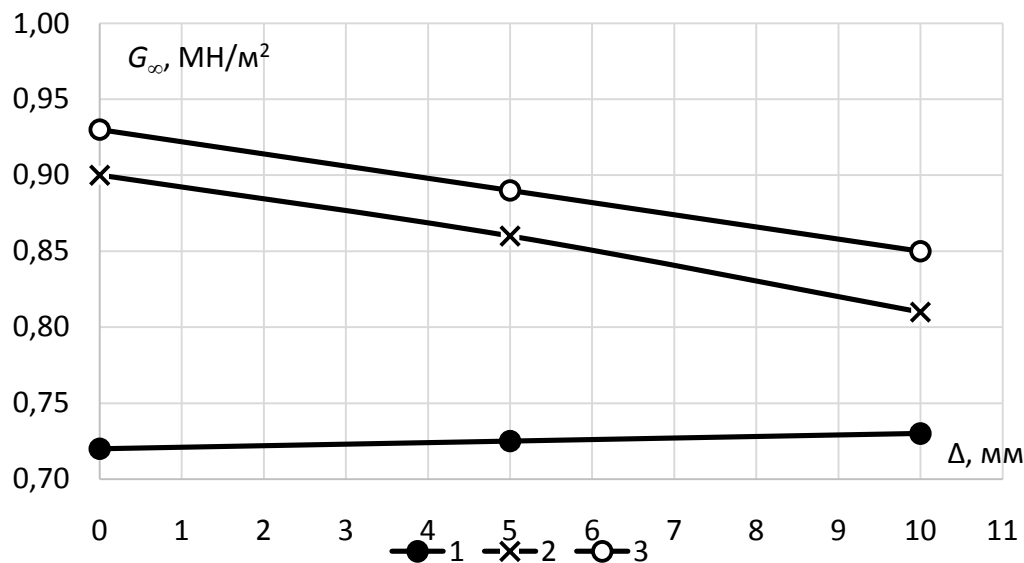


а



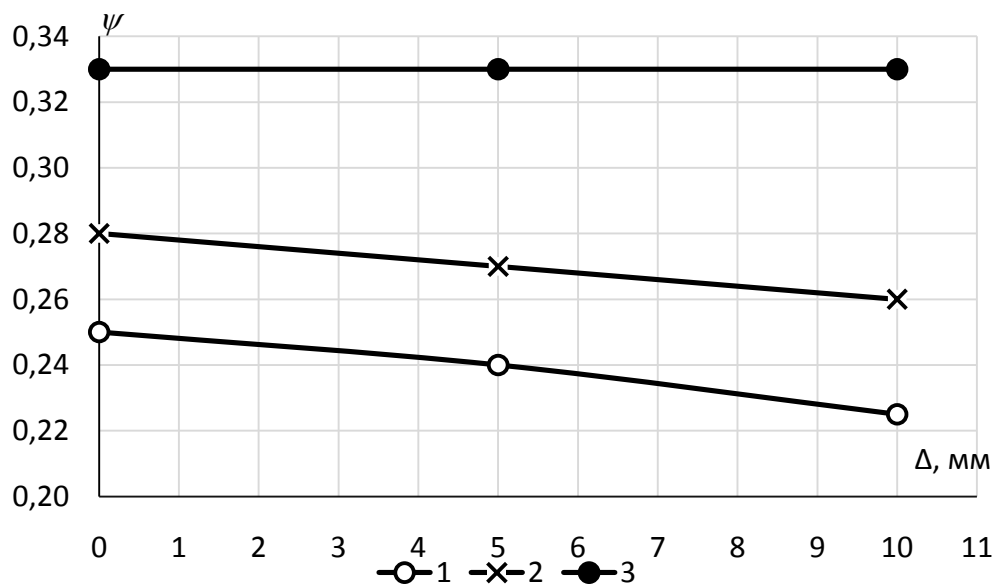
б

Рисунок 2 – Температурные зависимости условно-равновесного модуля сдвига G_{∞} (а) и коэффициента поглощения резины ψ (б) при различных степенях статического сжатия силой P (Q – сила сдвига)



1 – $t = 0$, $T = 20^{\circ}\text{C}$; 2 – $t = 1250$ ч, $T = 70^{\circ}\text{C}$; 3 – $t = 1250$ ч, $T = 100^{\circ}\text{C}$

Рисунок 3 – Зависимость модуля G_{∞} от степени предварительного сжатия резиновых образцов



1 – $t = 0$, $T = 20^{\circ}\text{C}$; 2 – $t = 1250$ ч, $T = 70^{\circ}\text{C}$; 3 – $t = 1250$ ч, $T = 100^{\circ}\text{C}$

Рисунок 4 – Зависимость коэффициента диссипации энергии ψ от степени предварительного сжатия резиновых образцов

Как видно, условно-равновесный модуль сдвига резины с ростом температуры увеличивается по экспоненциальному закону, а коэффициент диссипации линейно уменьшается. Поджатие образцов статической силой уменьшает величину и скорость старения резины (рис. 2). Функциональные зависимости $G_{\infty}(T)$ и $\psi(T)$ могут быть приняты в виде

$$\begin{aligned} G_{\infty}(T) &= G_{\infty}^n + (G_{\infty}^k - G_{\infty}^n) \exp(k_G T); \\ \psi(T) &= \psi^n - k_{\psi} T, \end{aligned} \quad (1)$$

где G_{∞}^n и ψ^n – начальные значения величин; G_{∞}^k – конечное значение; k_G и k_{ψ} – константы скорости.

В исходном состоянии образцов ($t = 0$; $T = 20^{\circ}\text{C}$) модуль сдвига G_{∞} практически не зависит от напряжённого состояния резинового массива, т.е. от статического поджатия (рис. 3, кривая 1). При термическом старении при $T = 100^{\circ}\text{C}$ в течение 1250 ч условно-равновесный модуль с увеличением напряжённого состояния резины уменьшается (рис. 3, кривые 2 и 3); при этом скорость изменения G_{∞} определяется, в основном, величиной температуры старения. Для коэффициента диссипации энергии получены аналогичные изменения с ростом температуры и величины статического сжатия (рис. 4).

Старение резины под действием агрессивной среды. Как отмечалось выше в качестве агрессивной внешней среды была выбрана щелочная среда ($\text{pH} = 25\text{г/л}$), в качестве исследуемых образцов – резиновые виброизоляторы типа ВР201 (резина марки А, на основе СКИ-3, 45 масс.ч. технического углерода). В качестве информативного параметра выбиралась статическая жёсткость, определяемая при сжатии образцов.

Температуры испытаний устанавливались согласно ГОСТ 9.707-86 и были равны 20°C и 100°C ; по этому стандарту устанавливалось время испытаний 2900 ч. Испытаниям для каждой температуры подлежали три пары образцов, жёсткость на сжатие которых отличалась не более чем на 3 %. Статическая жёсткость определялась через каждые 500 ч.

После испытаний партии образцов при комнатной температуре ($+20^{\circ}\text{C}$) образцы помещались в термокамеру (погрешность изменения температуры $\pm 1^{\circ}\text{C}$) и выдерживались в щелочной среде при температуре 100°C ; контрольная партия образцов выдерживалась в щелочной среде при температуре 20°C . Результаты испытаний показаны на рис. 5.

Как видно, щелочная среда при комнатной температуре линейно уменьшает жёсткость виброизоляторов, что связано с набуханием образцов. При 100°C и действии щелочной среды жёсткость образцов линейно возрастает, что связано с преобладанием влияния термодеструкции на жесткостные параметры образцов.

Влияние старения резины на динамические характеристики вибрационных машин. Как было отмечено выше, термическое старение резины в напряжённом состоянии приводит к уменьшению жесткостных параметров и уменьшению коэффициента диссипации энергии. Это, в свою очередь, во время эксплуатации машин с резиновыми элементами приведёт к изменению их амплитудно-частотных характеристик.

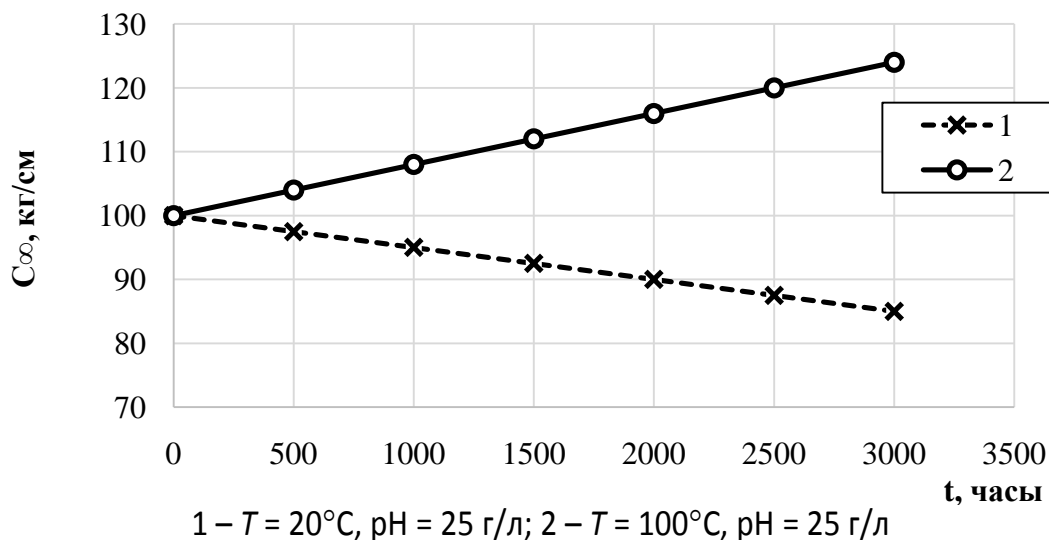


Рисунок 5 - Изменение статической жёсткости C_{∞} во времени от действия агрессивной внешней среды

Рассмотрим динамику конвейера KB1T-0.15 с виброизоляторами типа ВР-201 и инерционным приводом (рис. 1) при длительной эксплуатации в условиях горно-металлургических предприятий. Конвейер предназначен для герметичной транспортировки минерального сырья с температурой до 100°C ; температура виброизоляторов в процессе работы не превышает $75-85^{\circ}\text{C}$. Виброизоляторы испытывают деформации сдвига и статическое сжатие от веса колеблющихся частей.

Обычно такую одномассную систему рассматривают как систему с одной степенью свободы, так как угловые колебания настолько малы, что ими можно пренебречь. В этом случае интегро-дифференциальное уравнение колебаний можно записать в виде

$$\begin{aligned} \ddot{x} + C_t x &= q_1 \sin \omega t; \\ C_t &= C_0 [1 - \chi \mathcal{E}_{\alpha}^*(-\beta)]; \\ \mathcal{E}_{\alpha}^*(-\beta) \varepsilon(t) &= \int_0^t \mathcal{E}_{\alpha}(-\beta, t - \tau) \varepsilon(\tau) d\tau, \end{aligned} \quad (2)$$

где C_t – оператор жёсткости упругой подвески; C_0 – мгновенное значение жёсткости упругой подвески; $\mathcal{E}_{\alpha}(-\beta, t - \tau)$ – экспоненциальная функция Работнова; q_1 – сила инерции, приходящаяся на единицу колеблющейся массы; α, β, λ – реологические параметры резины.

Более подробно уравнение (2) рассмотрено в [1]; там же для амплитуды колебаний получено уравнение

$$a = \frac{q_1}{\sqrt{[\omega_{0u}^2 (1 - \chi A) - \omega^2]^2 + \chi B^2 \omega_{0u}^4}}, \quad (3)$$

где ω_{0u} – частота собственных колебаний идеально упругой системы; A и B – реологические характеристики резины (синус- и косинус-преобразование Фурье дробно-экспоненциальной функции); ω – частота возбуждающей силы.

Рассмотрим конкретный пример. При эксплуатации конвейера KB1T-0.15 (масса колеблющихся частей 305 кг; длина транспортирования 3,3 м; параметры вибрации: амплитуда колебаний – 3 мм, частота – 750 об/мин.) за счёт термического старения статически напряжённых виброизоляторов при постоянных частоте колебаний и силе инерции за 1250 ч наблюдения амплитуда уменьшилась с 3 мм до 2,6 мм. Из практики известно, что в дальнейшем амплитуда колебаний стабилизируется, т.к. жёсткость системы виброизоляции во времени изменяется по экспоненте и через некоторое время, определяемое условиями эксплуатации, также стабилизируется. Вместе с тем такие изменения амплитуды колебаний конвейера, a , следовательно, и его производительности, следует учитывать, т.к. обычно конвейер эксплуатируется в технологических линиях.

Выводы.

Впервые исследован процесс термического старения массивных силовых резиновых изделий при совместном действии повышенных температур и статических напряжений. Показано, что:

- при длительном термическом старении с ростом температуры условно-равновесный модуль сдвига увеличивается по экспоненциальному закону; коэффициент диссипации линейно уменьшается;

- впервые для массивных резиновых изделий показано, что с увеличением напряжённого состояния (при деформациях сжатия) степень термодеструкции резины с ростом температуры уменьшается, что выражается в уменьшении скорости изменения информативных величин G_∞ и ψ ;

- впервые для массивных резиновых изделий показано, что совместное влияние температуры и внешней активной среды в виде щелочи линейно изменяет жесткостные параметры; при этом влияние термодеструкции преобладает над влиянием набухания резины;

- в реальных вибрационных машинах термическое старение в сочетании со статическим напряжением резиновых элементов при длительной эксплуатации приводит к изменению амплитудно-частотной характеристики; при постоянных частоте и возмущающей силе – к уменьшению амплитуды колебаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прикладная механика упруго-наследственных сред: В 4-х томах / А.Ф. Булат, В.И. Дырда, В.Г. Карнаухов [и др.]. – Киев: Наукова думка, 2011-2014.
2. Старение резин в напряженном состоянии / А.А. Соколовский, Э.Ф. Вайнштейн, Е.М. Ухова, А.С. Кузьминский // Производство резинотехнических и асбестотехнических изделий. – М., 1988. – Вып. 10. – С. 85.
3. Дырда, В.И. Влияние некоторых растворителей на структуру поверхностного слоя и усталостную выносливость амортизационной резины из СКИ-3 / В.И. Дырда, Т.П. Постникова // Каучук и ре-

зина. – 1977. – № 8. – С. 31-32.

4. Хотимский, М.Н. О влиянии предварительного теплового старения резин на их усталостные и гистерезисные свойства при гармоническом нагружении / М.Н. Хотимский // Каучук и резина. – 1975. – № 5. – С. 39-42.

5. Хромов, М.К. О влиянии кислорода воздуха на усталостную выносливость резин / М.К. Хромов, К.Н. Лазарева // Каучук и резина. – 1977. – № 5. – С. 36-38.

6. Кузьминский, А.С. Старение и стабилизация полимеров / А.С. Кузьминский. – М.: Химия, 1966. – 321 с.

7. Диллон, И.Х. Усталость высокополимеров / И.Х. Диллон. – М.: Госхимиздат, 1957. – 156 с.

8. Lake, G.I. Ozone attack and fatigue life of rubber / G.I. Lake, P.B. Lindley // Use Rubber Engineering. – London, 1967. – Pp. 72-80.

9. Изменение свойств резин в процессе длительного хранения в натуральных условиях / В.Г. Ребизова, М.С. Добросклонская, А.С. Косенкова // Производство резинотехнических и асбестотехнических изделий. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1974. – С. 29.

10. Эммануэль, Н.М. Химическая физика старения и стабилизации полимеров / Н.М. Эммануэль, А.М. Бучаченко. – М.: Наука, 1982. – 359 с.

11. Зуев, Ю.С. Стойкость эластомеров в эксплуатационных условиях / Ю.С. Зуев, Т.Г. Дегтева. – М.: Химия, 1986. – 264 с.

12. Бартнев, Г.М. Прочность и разрушение высокоэластичных материалов / Г.М. Бартнев, Ю.С. Зуев. – М.: Химия, 1964. – 427 с.

13. ГОСТ 9.713-86. Метод прогнозирования изменения свойств при термическом старении; Введен 01.01.1988. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 56 с.

14. Кузьминский, А.С. Химические превращения эластомеров / А.С. Кузьминский, В.В. Седов. – М.: Химия, 1989. – 192 с.

REFERENCES

1. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., Karnauhov, V.G., Zvyagilskiy, E.L. and Kobets, A.S. (2011-2014), *Prikladnaya mekhanika uprugo-nasledstvennykh sred: V 4-h tomakh* [Applied Mechanics of elastic-hereditary media], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.

2. Sokolovskiy, A.A., Vaynshteyn, E.F., Uhova, E.M. and Kuzminskiy, A.S. (1988), “The aging of rubbers under stress”, *Proizvodstvo rezinotekhnicheskikh i asbestotekhnicheskikh izdeliy*, vol. 10, p. 85.

3. Dyrda, V.I. and Postnikova, T.P. (1977), “Influence of some solvent on the surface layer of the structure and the fatigue endurance amortization of rubber SKI 3”, *Kauchuk i rezina*, vol. 8, pp. 31-32.

4. Hotimskiy, M.N. (1975), “The effect of pre-heat aging of rubbers on their fatigue and hysteresis properties at harmonic loading”, *Kauchuk i rezina*, vol. 5, pp. 39-42.

5. Hromov, M.K. and Lazareva, K.N. (1977), “The effect of atmospheric oxygen on the fatigue endurance of rubbers”, *Kauchuk i rezina*, vol. 5, pp. 36-38.

6. Kuzminskiy, A.S. (1966), *Starenie i stabilizatsiya polimerov* [Ageing and stabilization of polymers], Himiya, Moscow, USSR.

7. Dillon, I.H. (1957), *Ustalost vysokopolimerov* [Tired of high polymers], Goshimizdat, Moscow, USSR.

8. Lake, G.I. and Lindley, P.B. (1967), “Ozone attack and fatigue life of rubber”, *Use Rubber Engineering*, London, pp. 72-80.

9. Rebizova, V.G., Dobrosklonskaya, M.S. and Kosenkova, A.S. (1974), “Change the properties of the rubber in the process of long-term storage in natural conditions”, *Proizvodstvo rezinotekhnicheskikh i asbestotekhnicheskikh izdeliy*, p. 29.

10. Emmanuel, N.M. and Buchachenko, A.M. (1982), *Himicheskaya fizika stareniya i stabilizatsii polimerov* [Chemical physics of aging and stabilization of polymers], Nauka, Moscow, USSR.

11. Zuev, Yu.S. and Degteva, T.G. (1986), *Stoykost elastomerov v ekspluatatsionnykh usloviyakh* [Resistance of elastomers in operating conditions], Himiya, Moscow, USSR.

12. Bartnev, G.M. and Zuev, Yu.S. (1964), *Prochnost i razrushenie vysokoelastichnykh materialov* [The strength and the destruction of elastomeric materials], Himiya, Moscow, USSR.

13. GOST 9.713 86. *Metod prognozirovaniya izmeneniya svoystv pri termicheskom starenii* [GOST 9.713 86 Method of predicting changes in the thermal properties of aging] (1988), Izdatelstvo standartov, Moscow, USSR.

14. Kuzminskiy, A.S. (1989), *Himicheskie prevrashcheniya elastomerov* [Chemical transformation of elastomers], Himiya, Moscow, Russia.

Об авторах

Логонова Анастасия Александровна, аспирант, Государственное ВУЗ «Национальный горный университет» (ГБУЗ «НГУ»), Днепр, Украина, LoginovaA@nmu.org.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), Днепр, Украина, vita.igtm@gmail.com

About the authors

Loginova Anastasiia Aleksandrovna, Doctoral Student, State Higher Educational Institution “National Mining University” (SHEI “NMU”), Dnepr, Ukraine, LoginovaA@nmu.org.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 Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, vita.igtm@gmail.com

Анотація. Проаналізовано процес термічного старіння масивних гумових елементів гірничих машин у напруженому стані. Описано вплив на характеристики гуми різних середовищ і умов експлуатації (напруга, температура, агресивні впливи зовнішнього середовища). Виявлено закономірності та отримані залежності, що визначають термічне старіння гуми в умовах статичного навантаження. На підставі отриманих залежностей зроблено висновок про те, що термічний вплив на гумові елементи в умовах статичного навантаження призводить до зменшення їх жорсткісних параметрів і зменшенню коефіцієнта дисипації енергії. Це, у свою чергу, призведе до зміни амплітудно-частотних характеристик машин.

Також були отримані експериментальні дані, які показують, що лужне середовище при кімнатній температурі лінійно зменшує твердість віброізоляторів, що пов'язане з набряканням зразків. При 100 0С и дії лужного середовища твердість зразків лінійно зростає, що пов'язане з перевагою впливу термодеструкції на жорсткісні параметри зразків.

Отримані результати розглядаються відносно динаміки конвеєра КВІТ- 0.15 з віброізоляторами типу ВР- 201 та з інерційним приводом. У результаті розрахунків видно, що за рахунок термічного старіння статично напружених віброізоляторів при постійних частоті коливань і силі інерції за 1250 годин спостереження амплітуда зменшилася з 3 до 2,6 мм.

Ключові слова: термічне старіння гуми, вплив агресивного середовища на гумовий елементи, окисні реакції в гумі.

Abstract. A process of thermal aging of the stressed massive rubber elements in mining machines is analyzed. An effect of different environments and operating conditions (pressure, temperature, aggressive influence of the environment) on the rubber characteristics is described. Regularities and dependences which define thermal aging of the rubber under static stress are explained. Basing on these dependencies, it is concluded that the thermal effect on the rubber elements in conditions of static stress leads to degradation of the rubber stiffness and decrement of the energy dissipation. This, in its turn, changes amplitude-frequency characteristics of the machines.

The theoretical results are considered for applying in dynamics of the conveyor KVIT 0.15 with vibration isolators of the BP 201 type and inertial drive. The calculations show that, due to thermal aging of statically-stressed vibration isolators at constant oscillation frequency and force of inertia, the amplitude has decreased from 3 mm to 2.6 mm for 1.250 hours of observation.

Keywords: thermal aging of rubber, impact of aggressive environment on the rubber elements, oxidation reactions in the rubber.

Статья поступила в редакцию 20.09.2016

Рекомендовано к публикации д-ром технических наук Васильевым Л.М.