

В.Л. БАСИНЮК, д.т.н., доц., директор научно-технического центра ОИМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь;
В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н., доц., главный научный сотрудник ИММС НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;
Е.И. МАРДОСЕВИЧ, к.т.н., зав. сектором ОИМ НАН Беларуси;
М.П. ЛОБКОВА, научный сотрудник ОИМ НАН Беларуси;
С.С. ПАПИНА, начальник отдела КБТЭМ-СО ГНПО "Планар", Минск, Беларусь

ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

Рассматриваются вопросы организации и проведения ускоренных испытаний полимерных композитов конструкционного назначения в расширенном диапазоне температур и скоростей растяжения или сжатия и воздействия вибраций, позволяющие в процессе одного цикла испытаний сформировать зависимость механических свойств полимерного композита и на основе этого на порядок и более сократить их длительность и трудоемкость при существенном повышении информативности.

Розглядаються питання організації та проведення прискорених випробувань полімерних композитів конструкційного призначення в розширеному діапазоні температур і швидкостей розтягнення або стиснення і впливу вібрацій, що дозволяють в процесі одного циклу випробувань сформувати залежність механічних властивостей полімерного композиту і на основі цього на порядок і більше скоротити їх тривалість і трудомісткість при істотному підвищенні інформативного.

The problems of organization and performing of accelerated tests of engineering composite plastics in the wide temperature interval rate of extension and expression and levels of vibrations are considered. In accordance with proposed technique dependence of plastic mechanical properties from above mentioned factors are performing through the single cycle of testing. Such approach can be reduce duration and labor intensity at essential arising informativity.

Постановка задачи. В зарубежной практике в конструкциях тракторов и автомобилей с каждым годом все более широкое применение находят термопластичные и терморезистивные полимерные композиты. При этом происходит качественный сдвиг от электротехнического и декоративного использования в сторону конструкционных, в том числе достаточно нагруженных элементов конструкции, включая зубчатые передачи. Это взаимосвязано с их высокой коррозионной стойкостью, возможностями обеспечения повышенных прочностных, антифрикционных, износостойких и улучшенных виброакустических свойств. В ряде случаев полимерные композиты могут быть эффективно использованы вместо дорогостоящих цветных металлов. При этом по мере создания высокопрочных композиционных материалов с полимерной матрицей, имеющей различные, повышающие прочностные свойства, наполнители полимерные композиты станут использоваться в таких нагруженных силовых деталях, как зубчатые передачи, карданные валы, рессоры и обода колёс.

Трактора и автомобили эксплуатируются в достаточно широких диапазонах температур, динамических и вибрационных режимов нагружения, ко-

торые комплексно оказывают наиболее существенное влияние на механические свойства полимерных композитов. Вместе с тем испытания, проводимые при их создании с целью определения их механических свойств в наиболее характерном для автотракторной техники расширенном диапазоне температур (пониженных до -60°C и ниже и повышенных до $+90^{\circ}\text{C}$), скоростей растяжения-сжатия и вибронегруженности до настоящего времени остаются наиболее трудоемким и длительным этапом их разработки. Это в основном связано с длительностью достижения заданных тепловых режимов, сложностью комплексного учета влияния приведенных факторов на механические свойства полимерных композитов и рассеиванием результатов испытаний. Все это в совокупности обуславливает необходимость использования для обеспечения достоверности испытаний значительного числа образцов, каждый из которых, как правило, испытывается отдельно.

Вместе с тем, использование современных подходов к планированию и проведению испытаний в ряде случаев позволяет существенно сократить трудоемкость, длительность и себестоимость проведения испытаний.

Краткий литературный обзор. Методики испытаний полимерных материалов представлены в различных источниках научно-технической и нормативной документации [1-8]. К их общему недостатку можно отнести длительность испытаний при необходимости достоверного определения на партии образцов механических характеристик полимерных материалов при пониженных и повышенных температурах в заданном диапазоне скоростей растяжения. Это связано с длительностью процесса охлаждения или нагрева каждого образца. При этом не всегда может быть обеспечена высокая достоверность полученных результатов из-за их значительного рассеивания и относительно сложного представления в удобном для инженерной практике аналитическом виде, позволяющем одновременно комплексно учитывать воздействие таких факторов, как температура, скорость растяжения или сжатия и вибронегруженность.

Основной задачей исследований была разработка способа ускоренных испытаний полимерных композитов конструкционного назначения, позволяющего в результате его реализации получить аналитическую инженерную зависимость, позволяющую комплексно учитывать воздействие таких факторов, как температура, скорость растяжения или сжатия и вибронегруженность.

Методические подходы к проведению ускоренных испытаний. В основу решения поставленной задачи был принят предложенный авторами [9] методический подход для определения в процессе испытаний аналитической зависимости модуля упругости конструкционных сталей от температуры их нагрева или охлаждения. При его реализации с использованием образца из исследуемого материала предварительно определяется модуль упругости путем его упругого деформирования при нормальной температуре, а затем этот же образец нагревают и охлаждают до заданных температур, выдерживают до установления равномерного температурного поля по всему объему материала образца и осуществляют его деформирование в зоне упругой деформации с

одновременным фиксированием величины и усилия сопротивления деформированию. По результатам измерений рассчитываются соответствующие температурам модули упругости и определяется функция влияния температуры на модуль упругости исследуемого материала.

Данный подход был модифицирован с учетом особенностей полимерных материалов и возможностей учета большего числа приведенных выше факторов, включая влияние на модуль упругости этих материалов кроме температуры скорости растяжения или сжатия и вибронегруженности.

В предложенном методе испытаний предварительно при нормальной температуре и регламентированной методикой ГОСТ 11262 скорости растяжения или сжатия определяется относительное удлинение в зоне упругой деформации, прочность исследуемого материала при разрыве или разрушении и среднее значение модуля упругости партии из 12 образцов.

В последующем 6 из этих образцов одновременно охлаждаются до минимальной из рассматриваемого диапазона температур и три из них растягивают с минимальной скоростью растяжения до разрушения, а другую часть охлажденных образцов растягивают с максимальной скоростью растяжения до разрушения. Остальные 6 образцов нагревают до наиболее высокой из рассматриваемого диапазона температур и одну часть из нагретых образцов растягивают с минимальной скоростью растяжения до разрушения, а другую часть нагретых образцов растягивают с максимальной скоростью растяжения до разрушения.

На каждой паре режимов испытаний первый образец растягивают на величину Δl , после чего, не разгружая первый образец, не прерывая процесса растяжения и не изменяя скорости процесса растяжения, одновременно с первым образцом растягивают на величину Δl второй образец, увеличивая до $2\Delta l$ величину растяжения первого образца, затем, не разгружая первый и второй образец, одновременно с ними растягивают на величину Δl третий образец, увеличивая до $2\Delta l$ величину растяжения второго образца и до $3\Delta l$ третьего образца и, не прерывая процесса растяжения, доводят все образцы до разрушения. Величину Δl определяют из соотношения

$$\Delta l_{1,2} = 0,25 \dots 0,3 \cdot \chi_{1,2} \cdot (L + \Delta L), \quad (1)$$

где $\chi_{1,2}$ – безразмерные коэффициенты, учитывающие влияние пониженных или повышенных температур на относительное удлинение при разрыве образца из полимерного материала, величины которых при отсутствии экспериментальных или расчетных данных ориентировочно могут быть приняты равными для пониженных (до $\approx 200\text{K}$) температур $\chi_1 \approx 0,2$, для повышенных температур (до $\approx 400\text{K}$) – $\chi_2 \approx 1,2$; L – длина основного образца в зачетной (рабочей) зоне; ΔL – увеличение длины образца в пределах упругой деформации диаграммы "напряжение-деформация" при его растяжении в процессе предварительных испытаний при нормальной температуре и регламентированной методикой ГОСТ 11262 скорости растяжения.

Величина Δl определяется исходя из возможности обеспечения однове-

ренного растяжения нескольких образцов в зоне их упругой деформации при ступенчатом "подключении" образцов к растяжению.

В процессе растяжения на каждой паре режимов испытаний по изменению расстояния между зажимами непрерывно регистрируют величину деформации образцов и соответствующую ей силу сопротивления растяжению. С учетом полученных данных формируют диаграмму "сила сопротивления растяжению $F-\Delta L_x$ " (ΔL_x – изменение расстояния между зажимами), типовой вид которой показан на рисунке.

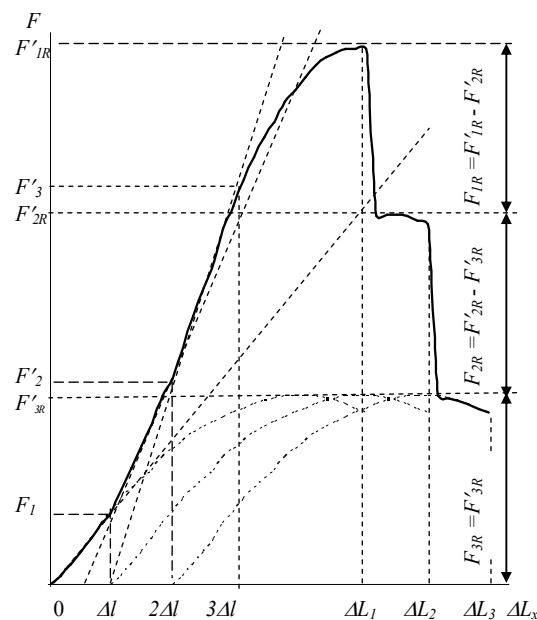


Рисунок – Вид типовой диаграммы "сила сопротивления растяжению $F-\Delta L_x$ "

При достижении величины деформации $\Delta L_x = \Delta l$ первого из растягиваемых на одной паре режимов испытаний ($T_{min}, V_{min}; T_{min}, V_{max}; T_{max}, V_{min}; T_{max}, V_{max}$) напряжения достигают величины $\sigma_1 = F_1 / S_{L_1}$, где F_1 – сила сопротивления растяжению первого полимерного образца при его растяжении на величину Δl (при фиксации значения F_1 на ПЭВМ учитывается усилие сопротивления его предварительному деформированию при выборке люфтов). При этом модуль упругости, определенный на полимерном материале первого образца, равен $E_1 = F_1 \cdot L / (S_1 \cdot \Delta l)$.

При дальнейшем растяжении первого образца в диапазоне $\Delta l \leq \Delta L_x \leq 2\Delta l$ одновременно с ним начинает растягиваться второй дополнительный образец 9б из полимерного материала. При этом суммарная сила сопротивления растяжению

С использованием этой диаграммы определяют усилия сопротивления растяжению в зоне упругой деформации каждого образца и при его разрыве.

При расчете модулей упругости учет разности фиксируемых изменений усилия растяжения при изменении числа одновременно растягиваемых образцов осуществляется следующим образом.

Поскольку сила сопротивления растяжению образцов связана с модулем упругости E соотношением

$$F_j = E \cdot S_{L_j} \cdot \Delta L_j / L, \quad (2)$$

где ΔL_j – увеличение длины j -ого образца при его растяжении; S_{L_j} – площадь сечения его рабочей зоны.

становится равной сумме сил сопротивления растяжению F_1 и F_2 , соответственно, первого и второго образцов

$$F = F_1 + F_2 = \frac{E_1 \cdot S_{L_1} \cdot \Delta L_x}{L} + \frac{E_2 \cdot S_{L_2} \cdot (\Delta L_x - \Delta l)}{L}. \quad (3)$$

При достижении значения растяжения первого полимерного образца величины $2\Delta l$ суммарная сила сопротивления растяжению образцов станет равной

$$F' = 2 \frac{E_1 \cdot S_{L_1} \cdot \Delta l}{L} + \frac{E_2 \cdot S_{L_2} \cdot \Delta l}{L} = 2F_1 + F_2. \quad (4)$$

Таким образом

$$F_2 = F' - 2F_1, \quad (5)$$

и E_2 равно

$$E_2 = F_2 \cdot L / (S_{L_2} \cdot \Delta l). \quad (6)$$

Аналогично при дальнейшем растяжении первого и второго образцов в диапазоне $2\Delta l \leq \Delta L_x \leq 3\Delta l$ одновременно с ними начинает растягиваться третий образец из полимерного материала. При этом суммарная сила сопротивления растяжению при достижении значения величины растяжения первого полимерного образца величины $3\Delta l$, второго полимерного образца величины $2\Delta l$ и третьего полимерного образца величины Δl становится равной

$$F'' = F_1 + F_2 + F_3 = \frac{E_1 \cdot S_{L_1} \cdot \Delta l}{L} + \frac{E_2 \cdot S_{L_2} \cdot (\Delta L_x - \Delta l)}{L} + \frac{E_3 \cdot S_{L_3} \cdot (\Delta L_x - 2\Delta l)}{L}. \quad (7)$$

Отсюда

$$F_3 = F'' - F_1 - F_2, \quad (8)$$

и E_3 равно

$$E_3 = F_3 \cdot L / (S_{L_3} \cdot \Delta l). \quad (9)$$

При определении прочности на разрыв по результатам растяжения образцов учет разности фиксируемых изменений усилия растяжения при изменении в результате деформации числа одновременно растягиваемых образцов осуществляется следующим образом.

Как показал анализ результатов предварительно проведенных исследований при разрыве первого образца при его растяжении на величину ΔL_1 , второго образца при его растяжении на величину, ориентировочно равную $\Delta L_2 - \Delta l$, и третьего образца при его растяжении на величину, ориентировочно равную $\Delta L_3 - 2\Delta l$, возникает скачкообразное изменение сил сопротивления растяжению сначала с F'_{1R} до F'_{2R} , затем с F'_{2R} до F'_{3R} . При этом значения соответствующих сил, характеризующих прочность при разрыве, как это видно из рисунка 1, могут быть определены из зависимостей:

$$F_{3R} = F'_{3R}; \quad (10) \quad F_{2R} = F'_{2R} - F'_{3R}; \quad (11) \quad F_{1R} = F'_{1R} - F'_{2R}. \quad (12)$$

Используя значения определенных из зависимостей (10)–(12) сил определяются соответствующие значения прочностей при разрыве.

При определении влияния виброн нагруженности дополнительно в условиях регламентированного нагружения испытывается аналогичная партия образцов.

Представление результатов исследований. Полученные результаты представляются в виде аналитических зависимостей, комплексно учитывающих влияние на модуль упругости и прочность температуры образцов и скорости растяжения

$$E = k_E \cdot E_0; \quad (13) \quad \sigma_{pp} = k_\sigma \cdot \sigma_{0pp}, \quad (14)$$

где E – значение модуля упругости полимерного материала при текущем значении скорости растяжения и температуре в рассматриваемых диапазонах температур охлаждения или нагрева и скоростей растяжения; E_0 – среднее значение модуля упругости полимерного материала при растяжении дополнительных образцов в области упругой деформации при нормальной температуре и скорости растяжения, регламентированной методикой ГОСТ 11262; σ_{pp} – прочность при разрыве полимерного материала, определенная при текущих значениях скорости растяжения и температуре в рассматриваемом диапазоне температур охлаждения или нагрева и скоростей растяжения; σ_{0pp} – значение прочности при разрыве полимерного материала при нормальной температуре и скорости растяжения, регламентированной методикой ГОСТ 11262; k_E, k_σ – безразмерные коэффициенты, учитывающие влияние температуры и скорости растяжения, соответственно, на модуль упругости и прочность при разрыве полимерного материала, определяемые из соотношений:

$$k_E = 10^{b_{0E}} \cdot \left(\frac{T}{T_c} \right)^{2a / \lg(T_{max} / T_{min})} \cdot \left(\frac{V}{V_c} \right)^{2b / \lg(V_{max} / V_{min})}; \quad (15)$$

$$k_\sigma = 10^{b_{0\sigma}} \cdot \left(\frac{T}{T_c} \right)^{2c / \lg(T_{max} / T_{min})} \cdot \left(\frac{V}{V_c} \right)^{2d / \lg(V_{max} / V_{min})}, \quad (16)$$

где $b_{0E}, b_{0\sigma}, a, b, c, d$ – безразмерные коэффициенты влияния температуры и скорости растяжения на модуль упругости и прочность при разрыве полимерного материала в уравнениях, рассчитываемые по результатам испытаний, которые проводятся с использованием известного метода планирования многофакторных экспериментов; T_c, V_c – среднее геометрическое значение минимальных и максимальных значений, соответственно, температур охлаждения или нагрева и скоростей растяжения; $T_{max}, T_{min}, V_{max}, V_{min}$ – максимальные и минимальные значения, соответственно, температуры нагрева или охлаждения образцов и скорости растяжения; T, V – соответственно, температура образца и скорость его растяжения при проведении испытания ($T_{max}, T_{min}, V_{max}, V_{min}$).

Предварительное определение среднего значения модуля упругости E_0 дополнительных образцов при нормальной температуре и регламентированной методикой ГОСТ 11262 скорости растяжения и модулей упругости этих же образцов при повышенной T_{max} или пониженной T_{min} температурах и минимальной V_{min} или максимальной V_{max} скоростях растяжения позволяет существенно сократить рассеивание результатов и обеспечить достоверное определение модулей упругости на минимизированном числе образцов.

Одновременное охлаждение или нагрев всех испытываемых образцов позволяет существенно уменьшить длительность всего цикла испытаний.

Для представления результатов испытаний дополнительной партии образцов в условиях регламентируемой виброн нагруженности в зависимости (13) и (14) вводятся коэффициенты k_{vE} и $k_{v\sigma}$, учитывающие влияние воздействия вибраций на модуль упругости и прочность при разрыве:

$$E = k_E \cdot k_{vE} E_0; \quad (17) \quad \sigma_{pp} = k_\sigma \cdot k_{v\sigma} \sigma_{0mц}. \quad (18)$$

Заключение. Анализ результатов исследований показал, что использование предлагаемого методического подхода к ускоренным испытаниям полимерных материалов для динамически нагруженных зубчатых передач автотракторной техники, функционирующей в широких диапазонах теплового воздействия и виброн нагруженности, позволяет сократить на порядок и более длительность их проведения при определении комплексного влияния приведенных выше факторов на механические свойства. При этом может быть получена удобная для автоматизированных расчетов и оптимального проектирования зубчатых передач аналитическая зависимость этих свойств от температуры нагрева или охлаждения, скоростей растяжения или сжатия и уровня виброн нагруженности. Использование этой зависимости позволяет существенно сократить сроки внедрения зубчатых передач в конструкции приводных систем автотракторной техники, обеспечив этим конструкциям качественно лучшие виброакустические и эксплуатационные характеристики при обеспечении рационального сочетания технико-экономических и ресурсных параметров.

Список литературы: 1. ГОСТ 14359-69. Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования. – Введен 01.01.1970. – М.: Изд. Стандартов, 1969. – 19с. 2. ГОСТ 11262-80. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. – Введен 01.12.1980. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 22с. 3. ГОСТ 25.601-80. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах. – Введен 01.07.1981. – М.: Изд. Стандартов, 1980. – 8с. 4. ГОСТ 25.602-80. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах. – Введен 01.07.1981. – М.: Изд. Стандартов, 1980. – 13с. 5. ГОСТ 9550-81. Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе. – Введен 01.07.1982. – М.: Изд. Стандартов, 1981. – 9с. 6. ГОСТ 4648-71. Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб. – Введен 01.01.1971. – М.: Изд. Стандартов, 1971. – 17с. 7. Голубков В.С., Пирогов К.М., Смушковиц Б.Л. Испытательные машины в текстильном материаловедении. – М.: "Легпромбытиздат", 1988. – 205с. 8. Патент РФ №2279658, МПК G01N3/08, опубл. 10.07.2006, Бюл.№19. 9. Патент РФ 2169355, МПК G01N3/20, G01N3/20, опубл. 2001г.

Поступила в редакцию 05.04.12

УДК 621. 833

В.А. БЕРЕЖНОЙ, ст. преподаватель каф. ГМКГ НТУ "ХПИ", Харьков;
Н.В. МАТЮШЕНКО, к.т.н., доцент каф. ГМКГ НТУ "ХПИ";
А.В. ФЕДЧЕНКО, к.т.н., доцент каф. ГМКГ НТУ "ХПИ"

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ЭВОЛЬВЕНТНОГО ПРЯМОЗУБОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ

Рассматривается динамическая модель для эвольвентной цилиндрической прямозубой передачи. Из системы дифференциальных уравнений динамической системы получены уравнения для определения амплитудно-частотных характеристик зубчатой передачи.

Розглядається динамічна модель для евольвентної циліндричної прямозубої передачі. З системи диференціальних рівнянь динамічної системи отримані рівняння визначення амплітудно-частотних характеристик зубчастої передачі.

A dynamic model is examined for cylindrical spur gears. From the system of differential equalizations of the dynamic system equalizations of determination of gain-frequency characteristics of gearing are got.

Введение. Современные механизмы с зубчатыми передачами работают при повышенных скоростях и нагрузках, в связи, с чем возрастает их динамическая напряжённость. Цилиндрическое эвольвентное прямозубое зацепление является характерным источником возникновения колебаний, поэтому процессам возбуждения колебаний в механизмах с прямозубыми передачами и посвящается данное теоретическое исследование [1, 2].

Постановка задачи. Цель работы – получить математическую модель динамики одноступенчатой цилиндрической эвольвентной прямозубой передачи на основе уравнений Лагранжа с учетом жесткости зубьев и валов, которая в дальнейшем будет использована для исследования изменения собственных частот системы при воздействии на жесткость зубьев.

Разработка динамической модели для эвольвентных цилиндрических прямозубых передач. В общем виде зубчатая передача представляет собой четырёхмассовую динамическую модель (см. рисунок). Здесь: I_1 – момент инерции *двигателя*; I_4 – момент инерции *исполнительного механизма*; I_u и I_k – моменты инерции *шестерни* и *колеса*; C_1 и C_4 – крутильные жесткости соединительных валов; $c_{ш}^2$ и $c_{к}^2$ – жесткости зубьев шестерни и колеса; C_3 – жесткость зацепления, где $C_3 = c_{ш}^2 + c_{к}^2$.

Геометро-кинематическая модель четырёхмассовой системы определяется четырьмя обобщенными координатами: φ_1, φ_4 – углы поворота *ведущей* и *ведомой* присоединенных масс; $\varphi_{ш}, \varphi_{к}$ – углы поворота *шестерни* и *колеса* соответственно.

Для принятой динамической модели запишем дифференциальные уравнения движения, воспользовавшись уравнением Лагранжа II рода [4]:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} = Q_i, \quad (1)$$