УДК 620.17

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ КВАРЦЕВЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ МАТРИЦ

В. С. КОЛМОГОРОВ, А. В. БАБАЙЦЕВ, Л. Н. РАБИНСКИЙ
Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

В работе исследовалось влияние различных мелкодисперсных кварцевых наполнителей на физико-механические свойства эпоксидных матриц. Рассматривались два варианта эпоксидной смолы и четыре варианта наполнителя. Для каждого из вариантов был произведен структурный анализ для определения характерного размера включения и состава наполнителя, а также для определения характера распределения включений по всей площади образца. Для подтверждения характера распределения наполнителя по всему объему образца были произведены томографические исследование сечений образцов. Все рассматриваемые наполнители представляли собой полые и неполые сферы размером порядка 50–100 мкм с покрытием и без. Порошок с полыми сферами из стеклянного боросиликатного материала брался марки ПБС-50 с наличием крупных фракций не более 5 %. Порошок с неполыми сферами также был произведен из стеклянного боросиликатного материала. Указанные выше наполнители покрывались тонким покрытием на основе каучуков СКТН, обладающей значительной эластичностью, упругостью и прочностью, а также высокой гидрофобностью. В качестве эпоксидной смолы рассматривались смола ЭД-20 с отвердителем ТЭТА и смола epoxy 520 с отвердителем 620.

Механические испытания проводились на изгиб с использованием универсальной испытательной машины INSTRON 5980 при комнатной температуре. Испытания показали, что использование полых сфер на механические свойства действует отрицательно, в отличие от неполых сфер. Однако использование полых сфер необходимо для повышения коэффициента теплопроводности подобной структуры. Влияние покрытия на физико-механические свойства для подобных испытаний незначительно вследствие малой толщины покрытия относительно размера фракции наполнителя. Для дальнейшего исследования влияние покрытия в наполнителях на физико-механические свойства эпоксидных матриц следует значительно увеличить толщину покрытия относительно характерного размера включения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-01-00837).

УДК 539.3

СИММЕТРИЧНАЯ ПЛОСКАЯ КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ АБСОЛЮТНО ТВЕРДОГО УДАРНИКА И ВЯЗКОУПРУГОЙ ПОЛУПЛОСКОСТИ

Е. А. КОРОВАЙЦЕВА
НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва

Д. В. ТАРЛАКОВСКИЙ
Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

В декартовой прямоугольной системе координат Ox_1x_3 рассматривается вязкоупругая полуплоскость $x_3 \geq 0$, коэффициент Пуассона материала которой не зависит от времени. С ней взаимодействует движущийся вдоль оси Ox_3 ограниченный гладкой выпуклой цилиндрической поверхностью абсолютно твердый ударник. В начальный момент времени $t = 0$ он касается лобовой точкой границы полуплоскости.

Используется следующая система безразмерных величин (при одинаковом начертании они обозначены штрихом, который в последующем изложении опущен):

$$x_k' = \frac{x_k}{L}\ \tau = \frac{c_1 t}{L},\ u_k' = \frac{u_k}{L},\ \sigma_{kl}' = \frac{\sigma_{kl}}{\lambda + 2\mu}\ (k, l = 1, 3),\ M'(\tau) = \frac{4L}{3\rho c_1^3} M(t),\ \ m' = \frac{m}{\rho L^2},$$

$$R_3' = \frac{R_3}{(\lambda+2\mu)L};\; R_e' = \frac{R_e}{(\lambda+2\mu)L};\; \eta = \frac{c_1}{c_2} = \frac{1}{\gamma};\; c_1^2 = \frac{\lambda+2\mu}{\rho},\; c_2^2 = \frac{\mu}{\rho};\;\; \kappa = 1-2\gamma^2;\; \beta^2 = 1-\gamma^2,$$

где L – некоторый характерный линейный размер; u_k – координаты вектора перемещений; σ_{kl} – напряжения; $M(t)$ – ядро релаксации; m – погонная масса ударника; ρ – плотность материала полуплоскости; R_3 и R_e – контактная и внешняя силы; c_1 и c_2 – скорости распространения волн расширения-сжатия и сдвига в упругой среде соответственно; $\lambda,\ \mu$ – упругие постоянные Ламе.

Безразмерные уравнения движения полуплоскости имеют вид

$$D(\tau)\left(\beta^2\frac{\partial\theta}{\partial x_1} + \gamma^2\Delta u_1\right) = \ddot{u}_1;\qquad D(\tau)\left(\beta^2\frac{\partial\theta}{\partial x_3} + \gamma^2\Delta u_3\right) = \ddot{u}_3,$$

где $D(\tau) = \delta(\tau) - M(\tau)$; $\theta = \dfrac{\partial u_1}{\partial x_1} + \dfrac{\partial u_3}{\partial x_3}$; $\Delta = \dfrac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \dfrac{\partial^2}{\partial x_3^2}$.

Здесь $\delta(\tau)$ – дельта-функция Дирака; звездочка соответствует свертке по времени τ.

Соотношения для напряжений имеют вид

$$\sigma_{kl} = D(\tau) * T_{kl}(u_1, u_3);$$

$$T_{11}(u_1,u_3) = \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \kappa\frac{\partial u_3}{\partial x_3},\; T_{22}(u_1,u_3) = \kappa\theta,\; T_{33}(u_1,u_3) = \frac{\partial u_3}{\partial x_3} + \kappa\frac{\partial u_1}{\partial x_1};$$

$$T_{12}(u_1,u_3) = T_{23}(u_1,u_3) = 0,\; T_{13}(u_1,u_3) = \gamma^2\left(\frac{\partial u_3}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_3}\right).$$

В начальный момент времени среда находится в покое:

$$u_1\big|_{\tau=0} = u_3\big|_{\tau=0} = \dot{u}_1\big|_{\tau=0} = \dot{u}_3\big|_{\tau=0} = 0.$$

Граничная поверхность ударника в начальный момент времени $\tau = 0$ задается уравнениями

$$x_3 + l = f(x_1);\;\; f(-x_1) = f(x_1);\;\; f'(x_1) < 0\ (x_1 > 0);\;\; f'(0) = 0;\; f''(x_1) < 0,$$

где l – расстояние между центром масс и лобовой точкой.

Движение ударника описывается следующей начальной задачей:

$$m\ddot{u}_{c3} = R_e + R_3,\; R_3(\tau) = \int_{-b(\tau)}^{b(\tau)} \sigma_{330}(x_1,\tau)dx_1,\; \sigma_{330} = \sigma_{33}\big|_{x_3=0}, \tag{1}$$

$$u_{c3}\big|_{\tau=0} = u_{c30},\quad \dot{u}_{c3}\big|_{\tau=0} = v_0, \tag{2}$$

где u_{c3} – перемещение центра масс ударника; $[-b(\tau), b(\tau)]$ – область контакта. Полагаем, что граница полуплоскости вне области контакта свободная:

$$\sigma_{13}\big|_{x_3=0} = \sigma_{33}\big|_{x_3=0} = 0,\; |x_1| > b(\tau).$$

Взаимодействие ударника и полуплоскости моделируем условием свободного проскальзывания:

$$\sigma_{13}\big|_{x_3=0} = 0,\; u_3\big|_{x_3=0} = w(x_1,\tau);\; w = f(x_1) + u_{c3} - l,\; |x_1| \le b(\tau), \tag{3}$$

где $w(x_1,\tau)$ – перемещение вдоль оси Ox_3 поверхности ударника.

Кроме того, требуем, чтобы компоненты напряженно-деформированного состояния полупространства были ограничены.

Для сверхзвукового этапа контактного взаимодействия на некотором интервале $\tau \le \tau_*$ справедливо неравенство $\dot{b}(\tau) \ge 1\ (\tau \le \tau_*)$. В этом случае возмущения не выходят за границу области контакта, т. е. граничное условие (3) можно записать в несмешанном виде [$H(x_1)$ – функция Хевисайда]:

$$\sigma_{13}\big|_{x_3=0} = 0,\; u_3\big|_{x_3=0} = u_{30}(x_1,\tau);\; u_{30} = w(x_1,\tau)H\left[b(\tau) - |x_1|\right];\; x_1 \in \mathbb{R},$$

а радиус области контакта определяется из условия равенства нулю нормального перемещения, которое согласно (3) приводит к равенству

$$b(\tau) = f^{-1}\left[l - u_{c3}(\tau)\right]. \qquad (4)$$

При этом контактная сила в (1) выражается через преобразование Фурье нормальных напряжений (индекс « F » обозначает изображение; q – параметр преобразования):

$$R_3(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_{330}(x_1,\tau)dx_1 = \lim_{q\to 0}\int_{-\infty}^{\infty} \sigma_{330}(x_1,\tau)e^{iqx_1}dx_1 = \sigma_{330}^F(0,\tau).$$

Нормальное напряжение на границе полуплоскости определяется интегральным соотношением с последующим определением соответствующей функции Грина. Выражение для результирующей силы имеет вид

$$R_3(\tau) = -\chi(\tau)\int_{-\infty}^{\infty} \dot{u}_{30}(x_1,\tau)dx_1 = -2\chi(\tau)\left[b(\tau)\dot{u}_{c3}(\tau)\right], \qquad (5)$$

где $\chi(\tau)$ – функция, определяемая свойствами вязкости материала полуплоскости.

Таким образом, на сверхзвуковом этапе взаимодействия определение перемещения центра масс ударника сводится к решению вытекающей из (1) и (5) начальной задачи для интегро-дифференциального уравнения при начальных условиях (2).

Для дозвукового этапа контактного взаимодействия нормальные перемещения границы вязкоупругой полуплоскости и контактные напряжения связывает интегральное уравнение вида (дополнительная звездочка соответствует свертке по координате x_1):

$$w(x_1,\tau) = G(x_1,\tau)\sigma_{330}(x_1,\tau), \qquad (6)$$

где функция Грина $G(x_1,\tau)$ для вязкоупругой полуплоскости определяется с использованием теоремы об обобщенной свертке.

Следовательно, на дозвуковом этапе взаимодействия замкнутая система разрешающих уравнений определяется соотношениями (1), (3), (4), (6) при начальных условиях (2).

Приведены решения полученных систем уравнений для сверхзвукового и дозвукового этапов контактного взаимодействия, проанализировано влияние свойств вязкости материала полуплоскости на характеристики взаимодействия.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 16-38-60074 мол_а_дк, 17-08-01146а).

УДК 656.13

ОСОБЕННОСТИ КРЕПЛЕНИЯ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ АВТОТРАНСПОРТОМ

И. Е. КРАКОВА, А. О. ШИМАНОВСКИЙ, О. И. ЯКУБОВИЧ
Белорусский государственный университет транспорта г. Гомель

В настоящее время наблюдается массовое применение автотранспортных средств для перевозки грузов и пассажиров как во внутреннем, так и в международном сообщениях. Грузы, предъявляемые к перевозке автомобильным транспортом, обладают различными свойствами, определяющими технические условия перевозок. От правильности крепления грузов в кузове автомобиля зависит целостность груза в процессе транспортировки и безопасность самой перевозки. Следует отметить, что по статистике два из трех опрокидываний автомобилей с грузом на дороге можно было бы предотвратить, если бы крепление самого груза было выполнено должным образом.

В Беларуси перевозка грузов осуществляется в соответствии с Правилами крепления грузов на автомобильном транспорте, разработанными исходя из того, что перевозимый груз жесткий. В реальности значительное количество транспортируемых объектов обладает высокой деформативностью. К таким грузам относятся, в частности, сэндвич-панели, широко применяемые в строительстве. Они представляют собой трехслойную конструкцию, включающую в себя две обшивки из металлических профилированных листов, между которыми располагается средний слой из минера-