

гипотезы, основанные на методе степенных рядов. В общем случае перемещения точки i -го слоя описываются следующими кинематическими зависимостями:

$$u_{\alpha}^i(x_1, x_2, x_3, t) = u_{\alpha} + \sum_{j=1}^{i-1} \sum_{k=1}^{K_{\alpha}^j} h_j^k u_{\alpha k}^j + \sum_{k=1}^{K_{\alpha}^i} (x_3 - \delta_{i-1})^k u_{\alpha k}^i ;$$

$$h_j^k = (h_j)^k, \quad \delta_i = \sum_{j=1}^i h_j, \quad \delta_{i-1} \leq x_3 \leq \delta_i, \quad i = \overline{1, I},$$

где h_j – толщина j -го слоя; u_{α}^i ($\alpha = \overline{1, 3}$) – перемещения точки i -го слоя в направлении оси Ox_{α} ; $u_{\alpha}, u_{\alpha k}^i$ – коэффициенты разложений перемещений в степенные ряды, которые являются функциями аргументов x_1, x_2, t ; K_{α}^i – максимальные степени поперечной координаты для плоскостных ($\alpha = 1, 2$) и поперечных ($\alpha = 3$) перемещений точек i -го слоя, которые выбираются в зависимости от необходимой точности.

Изменяя количество удерживаемых членов в рядах, можно получить разные по точности двумерные аппроксимации НДС. Частным случаем этой модели многослойной среды являются гипотезы теории Э. И. Григолюка, П. П. Чулкова, а также гипотезы уточненной теории первого порядка, учитывающей обжатие каждого слоя.

Уравнения движения и граничные условия получены с помощью вариационного принципа. Эти уравнения дополняются уравнением движения индентора и условием совместности деформаций. Контактное смятие учитывается по Герцу. Для решения уравнений используются аналитико-численные методы.

Проведено численное исследование НДС остекления и композитной обшивки при ударе твердым телом. Результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными, что подтверждает работоспособность предложенной методики.

Разработанный метод может быть полезен при оценке прочности многослойных элементов конструкций железнодорожных транспортных средств при лобовых столкновениях с различными твердыми телами и позволяет подобрать рациональные их композиции, а также существенно сократить количество стеновых испытаний.

Список литературы

- 1 Нестационарные колебания многослойных пластин и оболочек и их оптимизация / А. Н. Шупиков [и др.] – Харьков : Изд-во Харьковского нац. экономического ун-та, 2004. – 252 с.
- 2 **Сметанкина, Н. В.** Нестационарное деформирование, термоупругость и оптимизация многослойных пластин и цилиндрических оболочек. – Харьков : Мисьдрук, 2011. – 376 с.
- 3 **Ugrimov, S. V.** Layered orthotropic plates. Generalized theory / S. V Ugrimov, A. N. Shupikov // Composite structures. – 2015. – Vol. 129, is. 1. – P. 224–235.

УДК 539.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОУПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ

Д. А. ЧЕРНОУС

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Введение. Нанопористые покрытия на основе анодированного оксида алюминия (АОА) широко используются в настоящее время для изготовления сенсоров микро электромеханических систем, а также в качестве матричных носителей различных наноструктурированных функциональных наполнителей. При импрегнировании подобных покрытий антифрикционным полимером образуется металлополимерная система, состоящая из подложки и связанного с ней композитного слоя. Материал данного слоя является одноосно-волоконно-армированным композитом, в котором сплошные полимерные волокна ориентированы перпендикулярно поверхности покрытия. Известен ряд научных публикаций, посвященных расчетно-теоретическому определению

эффективных механических характеристик такого композитного слоя. Непосредственное экспериментальное определение этих характеристик затруднено относительно малой толщиной слоя и его жесткой связью с подложкой. В известных публикациях приведены результаты измерения параметров, характеризующих деформирование покрытия при контактном воздействии. Однако данные параметры не позволяют полностью описать механические свойства рассматриваемого существенно анизотропного объекта. Кроме того, до настоящего времени исследовались только упругие характеристики импрегнированного анодного покрытия. Вместе с тем наличие полимерного наполнителя не позволяет при описании деформирования композита пренебречь процессами ползучести и релаксации. В связи с вышесказанным целью настоящего исследования является разработка расчетно-экспериментальной методики определения эффективных вязкоупругих характеристик импрегнированного полимером наноструктурированного покрытия на основе анодного оксида алюминия.

Материалы и методы исследования. В качестве основы исследуемой металлополимерной системы будем использовать анодное покрытие, изготовленное на основе АОА в лаборатории Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (г. Минск). В представленном образце подложка толщиной 2 мм образована кремнием. Материал подложки будем рассматривать как однородный изотропный линейно-упругий. Покрытие толщиной 30 мкм образовано оксидом алюминия, перфорированным сквозными цилиндрическими порами диаметром около 12 нм при пористости 54 %. Импрегнирование покрытия антифрикционным полимером (политетрафторэтиленом ПТФЭ) осуществлялось на разработанной в Институте механики металлополимерных систем им. В. А. Белого (ИММС НАН Беларуси, г. Гомель) установке для плазмохимической обработки. Обработка покрытия проводилась в течение 1 часа до достижения максимального уровня заполнения пор полимером с последующим механическим удалением тонкого поверхностного слоя ПТФЭ.

Одним из наиболее распространенных экспериментальных методов исследования вязкоупругих свойств материалов является динамический механический анализ (ДМА). В рамках настоящего исследования для реализации данного метода использован модуль динамического механического/термомеханического анализа DMA 8000 Perkin Elmer. Испытания проводились в лаборатории ИММС НАН Беларуси. Образец в форме стержня длиной 5 см, шириной 5 мм и высотой 2,03 мм (покрытие + подложка) подвергался трехточечному изгибу с частотой 10 Гц с амплитудой 0,01 мм в диапазоне температур от 0 до 100 °С. Прибор DMA 8000 Perkin Elmer позволяет в автоматическом режиме регистрировать температурную зависимость абсолютного значения модуля Юнга E_a и тангенса угла механических потерь $\text{tg}\beta$ для материала образца. Эти величины являются условными характеристиками двухслойной конструкции, состоящей из подложки, образованной однородным изотропным линейно-упругим материалом, и покрытия, образованного трансверсально изотропным термовязкоупругим композитом. При расчетно-теоретическом описании деформирования данной конструкции пренебрегли сдвиговыми деформациями и напряжениями. Это допущение позволило установить относительно простую математическую зависимость компонент комплексного динамического модуля упругости E_T^* материала покрытия в плоскости изотропии (плоскости самого покрытия) от фиксируемых прибором величин E_a и $\text{tg}\beta$. С другой стороны, температурные зависимости действительной и мнимой компонент модуля E_T^* были определены расчетным путем при заданных характеристиках компонент композита. При этом материал матрицы (оксид алюминия) рассматривался как изотропный линейно-упругий, а материал волокон – как изотропный линейно термовязкоупругий. Значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона оксида алюминия и кремния заимствованы из справочной литературы. Температурные зависимости модуля Юнга и модуля сдвига ПТФЭ при частоте 10 Гц получены на приборе DMA 8000 Perkin Elmer. Для расчета компонент эффективного модуля упругости в плоскости изотропии E_T^* использована трехфазная модель волоконно-армированного композита и упруговязкоупругая аналогия.

Проведено сопоставление температурных зависимостей компонент модуля E_T^* , полученных на основе экспериментальных диаграмм для E_a и $\text{tg}\beta$, с результатами использования модели механики композитных материалов. Максимальное расхождение зависимостей составило 12 % от соответствующего значения, установленного по экспериментальной диаграмме. Данное наблюдение свидетельствует о правомерности использования разработанной методики для определения характеристик покрытия.

Заключение. Предложена и апробирована расчетно-экспериментальная методика определения вязкоупругих характеристик импрегнированного полимером анодного покрытия, основанная на использовании ДМА анализа и позволяющая устанавливать температурные зависимости эффективных динамических модулей покрытия в плоскости изотропии.

УДК 531

РОЛЬ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ В ПОДГОТОВКЕ БУДУЩИХ ИНЖЕНЕРОВ ТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ

А. О. ШИМАНОВСКИЙ, И. Е. КРАКОВА

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Одной из задач, стоящей перед высшей школой, является повышение качества подготовки будущих инженеров. В настоящее время в высшем образовании наблюдаются тенденции, связанные с уменьшением сроков обучения при получении инженерных специальностей. В связи с этим пересматриваются рабочие программы, уменьшается количество часов изучения дисциплин. Изменения коснулись и теоретической механики. Так, например, студенты специальностей «Международные автомобильные перевозки» и «Безопасность дорожного движения» выбирают между ней и прикладной механикой, а для студентов специальности «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент на транспорте» изучение теоретической механики вообще не запланировано. В то же время в учебных планах для названной специальности предполагается изучение дисциплины «Теория и расчет движения транспортных средств», которая должна базироваться на знаниях теоретической механики.

Теоретическая механика как одна из фундаментальных наук, имеет большое значение для понимания и усвоения многих дисциплин механического цикла и формирования инженерного мышления в целом, она развивает логическое мышление и закладывает базу для изучения специальных дисциплин. Наряду с традиционно излагаемыми разделами классической механики учебные программы разных специальностей предполагают изучение материала, необходимого для дальнейшего изучения специальных дисциплин.

Будущим инженерам-механикам для изучения динамики локомотивов и вагонов необходимы знания, получаемые при изучении разделов: кинематика, динамика, аналитическая механика и теория колебаний. Для решения практических задач следует получить опыт составления дифференциальных уравнений движения с помощью уравнений Лагранжа второго рода. Однако опыт последних лет показывает, что усвоение этой темы большинству студентов дается все сложнее, так как они не успевают осмыслить материал за короткое время.

Для будущих инженеров-строителей важное значение имеют положения статики и аналитической механики. Так, при изучении статики студенты учатся определять реакции внешних связей, наложенных на строительные конструкции, впервые знакомятся с расчетами ферм, которыми моделируются перекрытия пролетов мостов и стропильные системы промышленных зданий и других сооружений. Изучение принципа возможных перемещений дает возможность нахождения конкретных реакций внешних и внутренних связей более коротким способом, что на практике позволяет сократить время расчетов.

Знания теоретической механики также нужны будущим специалистам, работа которых связана с организацией перевозок грузов. В частности, для обеспечения безопасности движения имеет большое практическое значение умение разработки схем размещения и расчет средств крепления грузов на подвижном составе, которое не всегда можно осуществить, используя типовые подходы.

При подготовке инженеров-электриков изучение теоретической механики требуется для расчетов работы средств автоматики. Кроме того, для микропроцессорных и микроэлектронных систем автоматики и телемеханики транспортных систем актуальной проблемой является виброзащита оборудования.

Выполненный анализ показывает, что уменьшение времени, отводимого на изучение курса теоретической механики, приводит к необходимости обучения студентов лишь ключевым понятиям курса и «вымывает» из учебных программ именно те вопросы, которые формируют у студентов представление о функционировании сложных систем, с которыми им придется встретиться на практике.