

Для снижения массы камеры и повышения рабочих характеристик ЭРД был предложен композиционный материал на основе кремнийорганической полимерной матрицы с наполнителем из порошка нитрида кремния, полученного в СВС процессе и тканого материала на основе кварцевого волокна.

Исходный полимер получали частичным согидролизом тетраметоксисилана, метилтриметоксисилана, винилтриметилксилана и γ -аминопропилтриметоксисилана [3]. Кремнийорганическая смола использовалась в виде 55 % мас. раствора в ацетонитриле, с средневязкостной молекулярной массой 2700–3500 г/моль. В качестве армирующего наполнителя использовали материал марки ТС-8/3-К производства НПО «Стеклопластик».

По данным ДСК/ТГА, теплостойкость полученного композиционного материала, наполненного Si_3N_4 60 % мас., составила 400 °С. В зависимости от доли нитрида кремния, потеря массы пропорционально снижается. В процессе пиролиза при 800 °С, образуется аморфная оксинитридная фаза, это связано с гидролизом наполнителя нитрида кремния и выделением аммиака, что было экспериментально установлено. Несмотря на потерю гибкости, свойственную эластомерам, камера из данного материала, в составе ЭРД, сохранила рабочие характеристики на испытательном стенде.

Полученный композиционный материал, характеризуется следующими свойствами:

- твердость по Шору –85–90 (шкала D);
- плотность –1,65–1,67 г/см³;
- напряжение на разрыв при растяжении – по основе ткани 1000 кгс;
- напряжение на разрыв при растяжении – по утку 550 кгс;
- объемная усадка после отверждения – 3–4 %;
- температурный коэффициент линейного расширения – $1,0 \dots 1,1 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$;
- электрическая прочность 15–20 кВ/мм;
- тангенс угла диэлектрических потерь – 0,2–0,02.

В рамках проведенной работы установили, что полученный материал характеризуется термостойкостью до 400 °С. В композиции с нитридом кремния термостойкость связующего остается на прежнем уровне, за счет минерального наполнения потери массы пропорционально уменьшаются. Нитрид кремния не влияет на процесс термодеструкции, синергического эффекта между нитридом кремния и связующим, не наблюдается.

Работа выполнена в Московском авиационном институте при финансовой поддержке РФФИ проект № 18-29-18083/18.

Список литературы

- 1 Импульсные плазменные двигатели в системах управления космических аппаратов / Н. Н. Антропов [и др.] // Прикладная физика. – 2002. – № 1. – С. 37.
- 2 **Rabinskiy, L.** Development of technologies for obtaining composite material based on silicone binder for its further use in space electric rocket engines / L. Rabinskiy, S. Sitnikov // Periodico Tche Quimica. – 2018. – Vol. 15, no. 1. – P. 390–395.
- 3 **Погодин, В. А.** Технологические аспекты 3D-печати деталей газоразрядной камеры электроракетного двигателя / В. А. Погодин, Л. Н. Рабинский, С. А. Ситников // СТИН. – 2019. – № 4. – С. 20–21.

УДК 620.192.4

ДЕФОРМИРОВАНИЕ БАЛКИ ПРИ ВНЕЗАПНОМ ИЗМЕНЕНИИ СТРУКТУРЫ УПРУГОГО ОСНОВАНИЯ

А. А. ПОДДУБНЫЙ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В. А. ГОРДОН

Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, Российская Федерация

Построена математическая модель динамического процесса в нагруженной постоянной равномерно распределенной нагрузкой конструктивно-нелинейной системе «балка – двухпараметрическое основание», возникающего в результате внезапного изменения физико-механических свойств основания, приводящего к обнулению его сдвиговой жесткости. Решение статической задачи изгиба шарнирно закрепленной по концам балки опертой на основание Пастернака служит начальным условием задачи о вынужденных колебаниях балки на основании Винклера, возникших после внезапного образования дефекта. Решения статической и динамической задач строятся методом начальных параметров с привлечением векторов состояний сечений балки и матриц влияния начальных параметров на состояние произвольных сечений. При анализе вынужденных колебаний применяется разложение

нагрузки и прогибов исходного статического состояния в ряды по формам собственных колебаний нового состояния.

Одной из важных проблем строительной механики является анализ чувствительности несущих конструкций к структурным перестройкам и повреждениям под нагрузкой при эксплуатации типа внезапно выключающихся связей, частичных разрушений, трещин, расслоений и т. д. Получение такой информации для реальных конструкций требует разработки специальных методов, так как данная проблема не может быть решена универсальным методом. С позиции строительной механики в этих задачах возникает необходимость расчета таких конструкций, как конструктивно нелинейных, изменяющих расчетную схему под нагрузкой. Особо важным является учет внезапности образования дефекта. До возникновения дефекта напряженно-деформированное состояние конструкции определялось статическим воздействием нагрузки и реакции основания. При внезапном образовании повреждения или структурной перестройки моментально снижается общая жесткость несущей системы, нарушается статическое равновесие, и система приходит в движение, в ходе которого перераспределяются и растут деформации и внутренние силовые факторы. Такое динамическое догружение приводит к нарушению штатного функционирования конструкции – отказам, потере несущей способности, прогрессирующему разрушению.

Анализ современного состояния и ключевых направлений исследований в области взаимодействия стержневых и пластинчатых стержневых несущих систем с упругими основаниями, обзоры аналитических и численных подходов к моделированию и расчету статических состояний и динамических процессов в системе (стержень – основание) содержатся во многих работах с обширными списками источников.

Пока инженерные методики расчета напряженно-деформированного состояния нагруженных систем «балка – основание», получивших внезапные повреждения или изменения структуры, малочисленны и несовершенны. Проявление конструктивной нелинейности и их последствия описаны лишь в нескольких работах, в которых рассматриваются полное или частичное внезапное разрушение основания, либо внезапное изменение граничных условий балки на упругом основании [1].

В настоящей работе рассматривается задача – построение математической модели динамического процесса, возникающего в несущей статическую нагрузку балке, опирающейся на двухпараметрическое основание Пастернака при внезапном образовании дефекта основания, заключающегося в утрате по всей длине контакта балки с основанием свойства сдвиговой жесткости, то есть во внезапном обнулении параметра k_2 .

Математическая модель процесса строится путем последовательного решения следующих задач:

1 Определяется статический прогиб и изгибающий момент в балке, опирающейся на упругое основание Пастернака в соответствии с граничными условиями, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой заданной интенсивности. Прогиб используется в дальнейшем как начальное условие динамического процесса (колебаний), возникающего после внезапного образования дефекта основания. Изгибающий момент используется для сравнения статических внутренних усилий в балке с динамическими в ходе колебаний.

2 Определяются частоты и формы собственных изгибных колебаний балки, опирающейся на упругое основание Винклера.

3 Исследуются вынужденные изгибные колебания нагруженной балки на основании Винклера путем разложения нагрузки и статического прогиба, полученного еще на основании Пастернака, по формам собственных колебаний балки на основании Винклера. Таким образом, расчет вынужденных колебаний строится методом модального разложения исходного состояния и нагрузки по модам нового состояния.

Для анализа перемещений и напряжений в балке при взаимодействии ее с упругим основанием во всех задачах используется метод начальных параметров в сочетании с векторно-матричным представлением состояния произвольных сечений балки.

Вывод. Полученные результаты показывают, что при проектировании, расчете, эксплуатации и анализе аварий следует учитывать возможность внезапных (невидимых) структурных перестроек в ответственных конструкциях, моделируемых балками, взаимодействующими с упругими основаниями, и их негативные последствия. Данная методика актуальна для решения существующих задач строительной механики и обязательно будет необходима для расчетов всевозможных модулей при строительстве сейсмостойчивых сооружений.

Список литературы

1 Поддубный, А. А. Методика расчёта критической силы сжатого стержня, погруженного в упругое основание / А. А. Поддубный, В. А. Гордон // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2019. – № 1(38). – С. 49–52.