

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  $\gamma$ -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  $\text{Si}_3\text{N}_4$  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/см<sup>3</sup>;
- 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.