

ется постепенное снижение уровня напряжений в нижней панели. При этом напряжения не превышают предел прочности минеральной ваты при высоте штабеля, равной девяти панелям. Это соответствует заявленному производителем значению высоты транспортного пакета 1,5 м.

В соответствии с нормами расчета крепления грузов на автотранспорте следует принимать во внимание дополнительные вертикальные динамические нагрузки, которые равны силе тяжести груза. Анализ результатов конечноэлементного моделирования деформирования нижней панели нижнего яруса груза показал, что в таком случае при силах натяжения крепежных ремней, обеспечивающих неподвижность жесткого груза аналогичных размеров, в случае укладки по высоте десяти и более панелей в минеральной вате возникают напряжения, превышающие ее предел прочности. Следовательно, наблюдается разрушение минеральной ваты, что подтвердилось в известном нам случае перевозки сэндвич-панелей. В свою очередь появление трещин в минеральной вате и ее расслоение становится причиной снижения жесткости конструкции и приводит, в том числе, к пластическим деформациям металлических поверхностей панелей, что наблюдалось на практике. Полученные результаты объясняют, почему при доставке груза из 14 и 13 сэндвич-панелей, расположенных друг над другом, произошло их разрушение.

Таким образом, результаты расчетов параметров движения рассматриваемой системы и определения напряженно-деформированного состояния нижней панели показали, что при разработке схем крепления грузов следует учитывать их деформативность. При перевозке грузов на большие расстояния наличие неровностей дорожного покрытия и входов в повороты может приводить к смещению груза, опрокидыванию и его повреждению.

Обеспечить надежное крепление груза и его целостность можно, если перевозка сэндвич-панелей будет осуществляться с использованием жесткой упаковки, не допускающей влияния верхних ярусов груза на нижние.

УДК 539.3

### **РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ТЕРМОУСТОЙЧИВОСТИ ТОНКОСТЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛОМ ВОЗДЕЙСТВИИ, ВОЗНИКАЮЩЕМ В ПРОЦЕССЕ СОЗДАНИЯ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ**

*А. С. КУРБАТОВ, А. А. ОРЕХОВ, Л. Н. РАБИНСКИЙ*  
*Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация*

Рассматривается задача термоустойчивости тонкостенной конструкции при нестационарном тепловом воздействии в несвязной постановке. Построена конечно-элементная модель пластины, на одну из сторон которой действует нестационарный тепловой поток, моделирующий движение лазерного луча. Получены численные решения динамической задачи теплопроводности и квазистатической задачи потери устойчивости в различные моменты времени. Проведена параметризация и получены зависимости критической мощности потока от толщины пластины.

УДК 621.7

### **ПОСТРОЕНИЕ ТЕСТОВЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ РАСТУЩИХ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ В ПРОЦЕССЕ ПОСЛОЙНОГО ЛАЗЕРНОГО СИНТЕЗА**

*А. С. КУРБАТОВ, А. А. ОРЕХОВ, Ю. О. СОЛЯЕВ, С. И. ЖАВОРОНОК*  
*Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация*

Моделирование технологического процесса послойного лазерного синтеза изделий представляет собой сложную задачу, при решении которой должны рассматриваться процессы теплопередачи, фазовых превращений и плавления, а также учитываться эффекты остаточных напряжений и деформации, усадки, анизотропии свойств получаемых материалов и т. д. Сложность моделей и большое количество неизвестных параметров, которые должны определяться экспериментально, делают постановку задачи плохо обусловленной при рассмотрении процессов синтеза реальных изделий сложной формы.

В настоящем докладе предложено для предварительной верификации результатов моделирования использовать упрощенные тестовые задачи, которые могут быть легко воспроизведены и исследованы экспериментально на образцах простой формы. В частности, рассмотрен ряд модельных задач о синтезе изделий в виде тонких пластин и тонкостенных цилиндрических оболочек. В качестве тестового условия, которое может быть установлено на основе расчетов и одновременно проверено экспериментально, предложено использовать условие потери устойчивости рассматриваемых образцов при неравномерном нагреве, который реализуется в процессе синтеза. На основе аналитических и численных конечно-элементных расчетов показано, что предложенная тестовая проверка может быть реализована экспериментально для типовых режимов синтеза изделий из стали и алюминия. Выполнение такой проверки может позволить сделать вывод о достоверности применяемых методов моделирования и о правильности выбранных параметров моделей.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (ФЦП «Исследования и разработки», соглашение № 14.577.21.0280, RFMEFI57717X0280).

УДК 539.4

## НАГРУЖЕНИЕ ТРЕХСЛОЙНЫХ КРУГОВЫХ ПЛАСТИН ДИНАМИЧЕСКИМИ ПАРАБОЛИЧЕСКИМИ НАГРУЗКАМИ

Д. В. ЛЕОНЕНКО

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Широкое применение в интенсивно развивающихся отраслях строительства и промышленности (авиа-, ракетостроение, транспортное машиностроение, реакторное оборудование) находят слоистые композитные элементы конструкций.

Здесь рассматриваются малые осесимметричные поперечные колебания несимметричной по толщине упругой трехслойной пластинки круговой формы, возбужденные параболическими нагрузками, имеющими локальный характер.

Постановка задачи и ее решение проводятся в цилиндрической системе координат  $r, \varphi, z$ . Заполнитель считаем легким, т. е. пренебрегаем его работой в тангенциальном направлении. Внешняя вертикальная нагрузка не зависит от координаты  $\varphi$ :  $q = q(r, t)$ . На контуре пластинки предполагается наличие жесткой диафрагмы, препятствующей относительному сдвигу слоев. В дальнейшем перемещения  $w(r, t)$ ,  $\psi(r, t)$ ,  $u(r, t)$  считаем искомыми.

При описании вынужденных колебаний рассматриваемой пластинки внешняя нагрузка  $q(r, t)$  и искомый прогиб  $w(r, t)$  представляются в виде следующих разложений в ряд по системе собственных ортонормированных функций  $v_n \equiv v(\beta_n, r)$ :

$$q(r, t) = M \sum_{n=0}^{\infty} v_n q_n(t), \quad w(r, t) = \sum_{n=0}^{\infty} v_n T_n(t), \quad v_n \equiv \frac{1}{d_n} \left[ J_0(\beta_n r) - \frac{J_0(\beta_n r_0)}{I_0(\beta_n r_0)} I_0(\beta_n r) \right].$$

Здесь

$$q_n(t) = \frac{1}{M} \int_0^{r_0} q(r, t) v_n r dr, \quad \int_0^{r_0} v_m v_n r dr = \begin{cases} 1, & m = n \\ 0, & m \neq n \end{cases}. \quad (1)$$

Рассмотрим несколько случаев локального внешнего осесимметричного силового воздействия на пластинку.

**1 Параболическая нагрузка, направленная выпуклостью вверх,** действует на круговую часть поверхности пластины, ограниченную окружностью  $r = b$ . Тогда ее можно записать так:

$$q(r, t) = q_0(t) H_0(b-r) \left( 1 - \left( \frac{r}{b} \right)^2 \right). \quad (2)$$

Подставляя (2) в формулу (1) параметров разложения нагрузки в ряд, получаем следующее выражение:

$$q_n(t) = \frac{2q_0(t)}{M_0 d_n \beta_n^2} \left[ J_2(\beta_n b) - \frac{J_0(\beta_n r_0)}{I_0(\beta_n r_0)} I_2(\beta_n b) \right].$$