Список литературы

1 **Трофимова, Т. И.** Курс физики : учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – 17-е изд., стер. – М. : Академия, 2008. – 560 с.

2 **Яворский, Б. М.** Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – 3-е изд., испр. – М. : Наука, 1990. – 624 с.

3 **Шиляева, К. П.** Физика. Краткая теория и задачи : пособие / К. П. Шиляева, И. О. Деликатная, Н. А. Ахраменко. – Гомель : БелГУТ, 2021. – 211 с.

УДК 620.174.21

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЕЙ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

А. В. БАБАЙЦЕВ, С. А. ШУМСКАЯ
Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Селективное лазерное спекание (СЛС) является востребованной аддитивной технологией, имеющей большую перспективу в авиационной и космической отраслях благодаря своей способности значительно снижать массу изделий, что порой имеет решающее значение в данных отраслях. Важными направлениями исследований являются разработка эффективных алгоритмов моделирования и оптимизации для металлической 3D-печати, а также методов контроля и компенсации возникающих деформаций.

В работе предложен вариант моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) прямоугольных образцов, выращенных методом СЛС из металлического порошка AlSi10Mg при различных режимах скорости и мощности лазера. В сочетании методов зондирующих отверстий, корреляции цифровых изображений и численного моделирования для решения обратной задачи и идентификации остаточного НДС исследуемых образцов приводится сравнение моделирования с экспериментальными данными. Моделирование проводится в программном комплексе Ansys.

Анализируется плоское напряженное состояние: принимается, что значения НДС в объеме рассматриваемых образцов постоянны во всем рассматриваемом объеме. Однако для полного понимания поведения конструкции необходимо учитывать также толщину, что влияет на деформацию конструкции под воздействием напряжений.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного проекта Министерства науки и высшего образования по теме «Разработка научных основ создания перспективных элементов конструкций с управляемыми свойствами из сплавов на основе титана, его инерметаллидов и композиционных материалов на основе алюминия с градиентной поверхностной и объемной структурой» FSFF-2023-0004.

Список литературы

1 **Бабайцев, А. В.** Исследование влияния параметров СЛС печати алюминиевых изделий на уровень остаточных деформаций / А. В. Бабайцев, С. А. Шумская А. В. Рипецкий // СТИН. – 2024. – № 4. – С. 34–37.

2 **Babaytsev, A. V.** Housings with Internal Cooling Channels Produced by Selective Laser Melting. Russian Engineering Research / A. V. Babaytsev, P. O. Polyakov. – 2023. – No. 43 (7). – P. 873–876.

УДК 539.31

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОДКРЕПЛЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК НА ОСНОВЕ УТОЧНЕННОЙ ТЕОРИИ

В. В. БАЛАБАНОВ, В. В. ФИРСАНОВ
Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Подкрепленная цилиндрическая оболочка рассматривается как система, состоящая из тонкостенной оболочки (обшивки) и жестко соединенного с ней набора поперечных кольцевых ребер.

Оболочка рассматривается как твердое тело, отнесенное к триортогональной криволинейной системе координат α_1, α_2, α_3. Координатные оси α_1, α_2 совпадают с линиями главных кривизн срединной поверхности оболочки, а ось α_3 направлена по наружной нормали к этой поверхности.

Введем триортогональную криволинейную систему координат ξ, θ, z (рисунок 1), для которой справедливы следующие равенства:

$$\alpha_1 = R\xi,\ \alpha_2 = R\theta,\ \alpha_3 = z + R. \tag{1}$$

Система координат ребер совпадает с системой координат обшивки, за исключением того, что ось $Z = z + \lambda_j(h + H_j)$, где h и H – полутолщины обшивки и ребер соответственно, $\lambda_j = 1$, $\lambda_j = -1$ при внешнем и внутреннем расположении ребра соответственно.

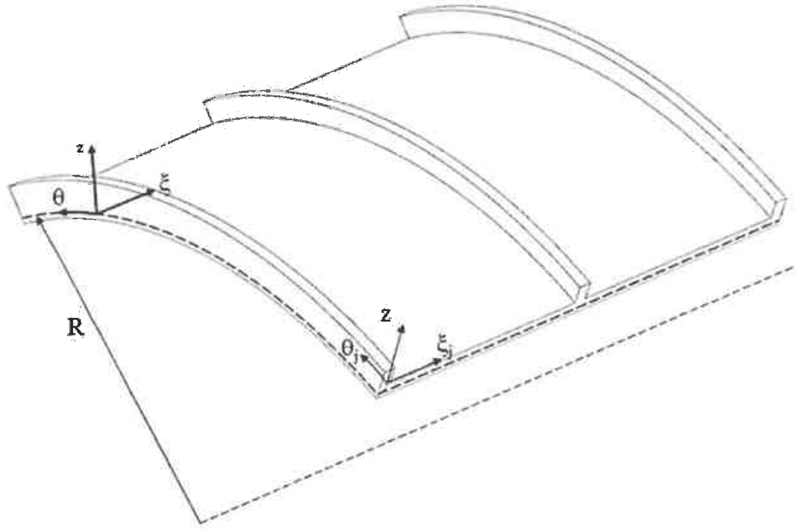

Рисунок 1 – Подкрепленная цилиндрическая оболочка

В соответствии с работами [1, 2] предполагается, что перемещения обшивки u, v, w допускают асимптотические представления вида

$$\begin{gathered} u(\xi,\theta,z) = u_0(\xi,\theta) + u_1(\xi,\theta)z + u_2(\xi,\theta)\frac{z^2}{2} + u_3(\xi,\theta)\frac{z^3}{3!}, \\ v(\xi,\theta,z) = v_0(\xi,\theta) + v_1(\xi,\theta)z + v_2(\xi,\theta)\frac{z^2}{2} + v_3(\xi,\theta)\frac{z^3}{3!}, \\ w(\xi,\theta,z) = w_0(\xi,\theta) + w_1(\xi,\theta)z + w_2(\xi,\theta)\frac{z^2}{2}. \end{gathered} \tag{2}$$

Перемещения кольцевых ребер определяются следующими выражениями:

$$v^j(\theta_j, Z) = v_0^j(\theta_j) + v_1^j(\theta_j)Z, \quad w^j(\theta_j, Z) = w_0^j(\theta_j), \quad j = 1 \ldots N. \tag{3}$$

Взаимодействие цилиндрической оболочки с кольцевыми ребрами схематизируется линейным контактом. Влияние ребер на обшивку рассматривается через две компоненты перемещений по кольцевому и поперечному направлениям, перемещения по направлению ξ равны нулю.

На поверхности контакта между обшивкой и ребрами компоненты перемещений одинаковы, поэтому выполняются условия сочленения обшивки и ребер, которые принимают следующий вид:

$$v^j(\theta_j, Z)\Big|_{Z=\lambda_j H} = v(\theta, z)\Big|_{z=\lambda_j h}, \quad w^j(\theta_j, Z)\Big|_{Z=\lambda_j H} = w(\theta, z)\Big|_{z=\lambda_j h}, \quad j = 1 \ldots N. \tag{4}$$

Уравнения трехмерной теории упругости используются для определения НДС обшивки и ребер. На основе вариационного принципа Лагранжа определяются дифференциальные уравнения равновесия и естественные граничные условия подкрепленной цилиндрической оболочки [1, 3].

Таким образом, на основании вариационного принципа Лагранжа и уравнений (2)–(4) дифференциальные уравнения равновесия тонкостенной цилиндрической оболочки, подкрепленной кольцевыми ребрами, определяются следующими выражениями:

$$
\begin{gathered}
\sum_{n=0}^{3}(K^{k1n}+K_{11}^{k1n}\frac{\partial^2}{\partial\xi^2}+K_{22}^{k1n}\frac{\partial^2}{\partial\theta^2})u_n+\sum_{n=0}^{3}K_{12}^{k2n}\frac{\partial^2}{\partial\xi\partial\theta}v_n+\sum_{n=0}^{2}K_{1}^{k3n}\frac{\partial}{\partial\xi}w_n=K^{kq^+}q_{13}^{+}-K^{kq^-}q_{13}^{-},\\
\sum_{n=0}^{3}K_{12}^{l1n}\frac{\partial^2}{\partial\xi\partial\theta}u_n+\sum_{n=0}^{3}(K^{l2n}+K_{11}^{l2n}\frac{\partial^2}{\partial\xi^2}+K_{22}^{l2n}\frac{\partial^2}{\partial\theta^2})v_n+\sum_{n=0}^{2}K_{2}^{l3n}\frac{\partial}{\partial\theta}w_n+\\
+\sum_{j=1}^{N}\delta(\xi-\xi_j)\left[\sum_{n=0}^{3}(K^{lj2n}+K_{22}^{lj2n}\frac{\partial^2}{\partial\theta^2})v_n+\sum_{n=0}^{2}K_{2}^{lj3n}\frac{\partial}{\partial\theta}w_n+(K^{lj2}+K_{22}^{lj2}\frac{\partial^2}{\partial\theta^2})v_1^j\right]=K^{kq^+}q_{23}^{+}-K^{kq^-}q_{23}^{-},\\
\sum_{n=0}^{3}K_{1}^{s1n}\frac{\partial}{\partial\xi}u_n+\sum_{n=0}^{3}K_{2}^{s2n}\frac{\partial}{\partial\theta}v_n+\sum_{n=0}^{2}(K^{s3n}+K_{11}^{s3n}\frac{\partial^2}{\partial\xi^2}+K_{22}^{s3n}\frac{\partial^2}{\partial\theta^2})w_n+\\
+\sum_{j=1}^{N}\delta(\xi-\xi_j)\left[\sum_{n=0}^{3}K_{2}^{sj2n}\frac{\partial}{\partial\theta}v_n+\sum_{n=0}^{2}(K^{sj3n}+K_{22}^{sj3n}\frac{\partial^2}{\partial\theta^2})w_n+K_{2}^{sj2}\frac{\partial}{\partial\theta}v_1^j\right]=K^{kq^+}q_{33}^{+}-K^{kq^-}q_{33}^{-},\\
\sum_{n=0}^{3}(K^{12j2n}+K_{22}^{12j2n}\frac{\partial^2}{\partial\theta^2})v_n+\sum_{n=0}^{2}K_{2}^{12j3n}\frac{\partial}{\partial\theta}w_n+(K^{12j2}+K_{22}^{12j2}\frac{\partial^2}{\partial\theta^2})v_1^j=0,
\end{gathered}
\tag{5}
$$

где $k=1\ldots4$; $l=5\ldots8$; $s=9\ldots11$; $j=1\ldots N$; K – переменные величины, зависящие от геометрических параметров, материала оболочки и кольцевых ребер; q – нагрузки, действующие на оболочку.

Построенная система дифференциальных уравнений (5) и соответствующие ей граничные условия приводятся к системе обыкновенных дифференциальных уравнений методом разложения искомых перемещений и нагрузок в тригонометрические ряды Фурье по окружной переменной θ. Решение дифференциальных уравнений определяется с помощью операционного метода, основанного на преобразовании Лапласа. В результате на основе уточненной теории можно повысить показатели весового совершенства проектируемого объекта.

Список литературы

1 **Васильев, В. В.** К проблеме построения неклассической теории пластин / В. В. Васильев, С. А. Лурье // Изв. АН. МТТ. – 1990. – № 2. – С. 158–167.

2 **Фирсанов, В. В.** Энергетически согласованный подход к исследованию упругих оболочек произвольной геометрии / В. В. Фирсанов, Чан Нгок Доан // Вестник МАИ. – 2011. – Т. 18. – № 1. – С. 194–207.

3 **Амбарцумян, С. А.** Теория анизотропных оболочек / С. А. Амбарцумян. – М. : Физматгиз, 1961. – 384 с.

УДК 21-039-419:620.22-419:537.868

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СВЧ-НАГРЕВА МНОГОСЛОЙНОГО КОМПОЗИТА

М. А. БАРУЛИНА,
Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук (ИПТМУ РАН), г. Саратов,
Пермский государственный национальный исследовательский университет, Российская Федерация

Д. В. КОНДРАТОВ
Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.,
Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук (ИПТМУ РАН), г. Саратов,
Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Российская Федерация

Н. В. БЕКРЕНЕВ
Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Российская Федерация

И. В. ЗЛОБИНА
Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.,
НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация

Полимерные композиционные материалы армированные волокнами, широко применяются в настоящее время в различных отраслях науки и техники [1–4]. Активное использование полимер-