

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА УРОВЕНЬ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ ПОСЛЕ РОТАЦИОННОЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ

Е. Л. КУЗНЕЦОВА

Филиал АО «ОДК» «НИИД», г. Москва, Российская Федерация

Т. Т. ФОЗИЛОВ

Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Филиал АО «ОДК» «НИИД», г. Москва, Российская Федерация

После любых технологических операций в металле возникают внутренние остаточные напряжения и деформации, которые находятся в состоянии равновесия без участия нагрузки извне. Большинство из них остаются в металле после техпроцесса и потому названы остаточными. Абсолютно любой вид обработки может привести к совершенно разным значениям напряжений как по направлению, так и по своей природе происхождения. Как правило, эти напряжения являются фазовыми, термическими или происходят от неоднородной пластической деформации [1].

С учетом того, что уровень заданных эксплуатационных свойств авиационных материалов постоянно возрастает, борьба с подобным явлением является одним из главных приоритетов, а отработка методов их релаксации, удаления и предупреждения – одна из важнейших задач.

В сварке трением значения остаточных деформаций имеют комбинированный характер, поскольку, несмотря на то, что данный метод считается одним из «холодных» (т. к. процесс протекает без образования жидкой фазы), сварка жаропрочных материалов типа сплавов серий ВВ, ВЖ и ЭП происходит в области температур выше 1250 °С, это превышает температуры закалки за несколько секунд и является термоударом. Ввиду этого характер напряжений является термическим, а поскольку при этой температуре пройдена точка полиморфных фазовых превращений с растворением или образованием упрочняющих интерметаллидных соединений, то здесь имеют место фазовая составляющая и неоднородная пластическая деформация как причины их возникновения [2].

Комбинация такого рода предусматривает разнонаправленность этих напряжений и деформаций, они являются и осевыми, и кольцевыми, продольными и поперечными. Значения достигают порядка 85–90 % от пределов текучести материала.

В ходе мероприятий по борьбе с этим явлением был выделен как самый рациональный, метод – высокотемпературный отжиг. Эксперимент показал снижение уровня остаточных напряжений порядка 30–40 % в среднем. Помимо этого, изменилась микроструктура сварного соединения ввиду релаксации механического воздействия за счет давления проковки при сварке. Она вернулась в исходное состояние и стала однородной как с зоной термомеханического влияния, так и основным материалом.

Согласно вышеописанному результаты эксперимента показали удовлетворительный уровень свойств, испытания на длительную прочность и малоцикловую усталость выявили повторяемость результата и закономерности для отработки режимов сварки и дальнейшей термической обработки.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 23-19-00680.

Список литературы

1 Применение пантографической конструкции, полученной методом SLM-печати и исследование влияния постобработки с нанесением демпфирующих покрытий / А. А. Зайцев [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2023. – № 4. – С. 83–89.

СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ПЯТИСЛОЙНОЙ КРУГОВОЙ ПЛАСТИНЫ, ШАРНИРНО ОПЕРТОЙ ПО КОНТУРУ

Е. А. ЛАЧУГИНА

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В последнее время в различных отраслях промышленности, включая строительство и машиностроение, широко используются слоистые элементы конструкций, в том числе и пятислойные пла-

стины. Поэтому разработка механико-математической модели собственных колебаний круговой пятислойной несимметричной по толщине пластины является актуальной.

Методы расчета и постановки краевых задач для слоистых элементов конструкций рассмотрены в [1–5]. Колебания неоднородных пластин и оболочек при периодических и нестационарных нагрузках исследовались в публикациях [6–8]. Статьи [9–14] посвящены квазистатическому деформированию трехслойных пластин. Постановка задачи о колебаниях пятислойной круговой пластины разрабатывалась в [15–18].

Здесь рассмотрена несимметричная по толщине упругая круговая пятислойная пластина с двумя легкими заполнителями. Вывод уравнений движения проведен в цилиндрической системе координат r, φ, z , которая связана со срединной плоскостью центрального слоя. В тонких несущих слоях справедливы гипотезы Кирхгофа, в заполнителях выполняется гипотеза Тимошенко и не учитывается работа касательных напряжений.

На контуре пластины предполагается наличие жесткой диафрагмы, препятствующей относительному сдвигу слоев ($\psi_1 = \psi_2 = 0$ при $r = r_0$). Рассматривается осесимметричная задача, поэтому тангенциальные перемещения в слоях отсутствуют, а искомые прогиб пластины w и относительные сдвиги в заполнителях ψ_1, ψ_2 не зависят от координаты φ .

Система уравнения движения получена при помощи вариационного принципа Лагранжа и принципа Даламбера:

$$\begin{aligned} L_2(a_1 u - a_2 w_{,r} + a_3 \psi_1 - a_4 \psi_2) &= 0, \\ L_2(a_3 u - a_5 w_{,r} + a_6 \psi_1) &= 0, \\ L_2(-a_4 u - a_7 w_{,r} + a_8 \psi_2) &= 0, \\ L_3(a_2 u - a_9 w_{,r} + a_{10} \psi_1 + a_{11} \psi_2) - M_0 \dot{w} &= -q, \end{aligned}$$

где $M_0 \ddot{w}$ – поперечные инерционные силы, $M_0 = (\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2 + \rho_3 h_3 + \rho_4 h_4 + \rho_5 h_5) r_0^2$; a_i – коэффициенты [14]; L_2, L_3 – линейные дифференциальные операторы

$$L_2(g) \equiv \left(\frac{1}{r} (rg)_{,r} \right)_{,r} \equiv g_{,rr} + \frac{g_{,r}}{r} - \frac{g}{r^2}, \quad L_3(g) \equiv \frac{1}{r} (rL_2(g))_{,r} \equiv g_{,rrr} + \frac{2g_{,rr}}{r} - \frac{g_{,r}}{r^2} + \frac{g}{r^3}.$$

Начальные условия движения принимаются однородными, на контуре должны выполняться условия для шарнирного опирания пластины

$$u = \psi_1 = \psi_2 = w = M_r = 0 \text{ при } r = r_0.$$

Трансцендентное уравнение для вычисления собственных чисел β_n ($n = 0, 1, 2, \dots$) следует из граничных условий. При шарнирном опирании контура пластины имеем

$$J_0(\beta r_0) \left[a_{12} \left(\beta I_0(\beta r_0) - \frac{I_1(\beta r_0)}{r_0} \right) + \frac{a_{13}}{r_0} I_1(\beta r_0) \right] + I_0(\beta r_0) \left[a_{12} \left(\beta J_0(\beta r_0) - \frac{J_1(\beta r_0)}{r_0} \right) + \frac{a_{13}}{r_0} J_1(\beta r_0) \right] = 0.$$

Частоты собственных колебаний ω_n связаны с собственными числами следующими соотношениями:

$$\omega_n^2 = \frac{\beta_n^4}{M^4} = \frac{\beta_n^4}{M_0 D}, \quad M^4 = M_0 D, \quad D = \frac{a_6 a_8 b_4}{b_4 b_7 - b_5 b_6}.$$

Перемещения в рассматриваемой пластине предполагается определять методом разложения в ряд по системе собственных ортонормированных функций.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект T24M-004).

Список литературы

- 1 Горшков, А. Г. Механика слоистых вязкоупругопластических элементов конструкций / А. Г. Горшков, Э. И. Старовойтов, А. В. Яровая. – М. : Физматлит, 2005. – 576 с. – EDN RXGSLJ.
- 2 Журавков, М. А. Математические модели механики твердого тела / М. А. Журавков, Э. И. Старовойтов. – Минск : БГУ, 2021. – 535 с.
- 3 Zhuravkov, M. A. Mechanics of Solid Deformable Body / M. A. Zhuravkov, Lyu Yongtao, E. I. Starovoitov. – Singapore : Springer, 2022. – 317 p.

4 Абдусаттаров, А. Деформирование и повреждаемость упругопластических элементов конструкций при циклических нагрузках / А. Абдусаттаров, Э. И. Старовойтов, Н. Б. Рузиева. – Ташкент : IDEAL PRESS, 2023. – 381 с.

5 Деформирование трехслойных пластин при термосиловых нагрузках / Э. И. Старовойтов [и др.]. – Гомель : БелГУТ, 2024. – 395 с.

6 Fedotenkov, G. V. Identification of non-stationary load upon Timoshenko beam / G. V. Fedotenkov, D. V. Tarlakovsky, Y. A. Vahterova // Lobachevskii journal of mathematics. – 2019. – Vol. 40, no 4. – P. 439–447.

7 Старовойтов, Э. И. Исследование спектра частот трехслойной цилиндрической оболочки с упругим наполнителем / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 162–169.

8 Леоненко, Д. В. Резонансные колебания упругих круговых трехслойных пластин, скрепленных с основанием Пастернака / Д. В. Леоненко // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2018. – № 4. – С. 98–104.

9 Старовойтов, Э. И. Изгиб упругой круговой трехслойной пластины на основании Пастернака / Э. И. Старовойтов, А. Г. Козел // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2018. – Т. 24, № 3. – С. 392–406.

10 Козел, А. Г. Решение задачи об изгибе упругопластической круговой пластины на основании Пастернака / А. Г. Козел // Теоретическая и прикладная механика. – 2019. – № 34. – С. 165–171.

11 Захарчук, Ю. В. Упругое деформирование круговых трехслойных пластин со сжимаемым наполнителем осесимметричными нагрузками / Ю. В. Захарчук // Теоретическая и прикладная механика. – 2022. – С. 34–41.

12 Нестерович, А. В. Радиальное и тангенциальное неосесимметричное нагружение круговой трехслойной пластины / А. В. Нестерович // Механика. Исследования и инновации. – Гомель : БелГУТ, 2020. – Вып. 13. – С. 116–121.

13 Deformation of a Step Composite Beam in a Temperature Field / É. I. Starovoitov [et al.] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2015. – Vol. 88, no 4. – P. 1023–1029.

14 Старовойтов, Э. И. Деформирование трехслойного стержня в температурном поле / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2013. – № 1 (22). – С. 31–35.

15 Лачугина, Е. А. Поперечные колебания пятислойной упругой круговой пластины с жесткими наполнителями / Е. А. Лачугина // Механика. Исследования и инновации. – 2022. – Вып. 15. – С. 212–219.

16 Лачугина, Е. А. Свободные колебания пятислойной круговой пластины с легкими наполнителями / Е. А. Лачугина // Механика. Исследования и инновации. – Гомель : БелГУТ, 2023. – Вып. 16. – С. 111–116. – EDN RCCKPM.

17 Лачугина, Е. А. Частоты собственных колебаний пятислойной круговой пластины / Е. А. Лачугина // Теоретическая и прикладная механика : междунар. науч.-техн. сб. – Минск : БНТУ, 2023. – Вып. 38. – С. 227–233.

18 Лачугина, Е. А. Собственные колебания пятислойной несимметричной по толщине пластины / Е. А. Лачугина // Механика, Сейсмостойкость, Машиностроение : сб. докладов Междунар. науч. конф., посвящ. 90-летию академика АН РУз Т. Р. Рашидова, 27–29 мая 2024 г. – Т. II. – Ташкент, 2024. – С. 426–433.

УДК 539.3

СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ СЭНДВИЧ-СТЕРЖНЯ

Д. В. ЛЕОНЕНКО

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Трехслойные конструкции широко применяются в различных отраслях промышленности. Расчету слоистых элементов посвящены многие работы. Так, в статье [1] рассмотрены свободные колебания трехслойной цилиндрической оболочки, а в статье [2] исследуются нелинейные колебания сэндвич-пластины. В работе [3] анализируется поведение стержня при действии температуры. В статьях [4, 5] исследуются свободные колебания стержней при наличии внутреннего или внешнего сопротивления. Работа [6] посвящена исследованию характеристик свободных колебаний сэндвич-балок с мягким наполнителем. Влияние отношения толщины наполнителя к толщине несущих слоев на собственные частоты многослойных балок было проанализировано в [7]. В работе [8] учитывались осевые, изгибные и сдвиговые деформации во всех слоях при расчетах собственных частот и форм колебаний сэндвич-балок. Здесь рассматриваются свободные колебания симметричного по толщине трехслойного стержня с несжимаемым наполнителем.

Для изотропных несущих слоев приняты гипотезы Бернулли. Для пакета справедлива гипотеза ломанной линии. На границах контакта используются условия непрерывности перемещений. Материалы несущих слоев несжимаемы в поперечном направлении, деформации малые. В качестве неизвестных принимаем прогиб $w(x, t)$ и сдвиг в наполнителе $\psi(x, t)$.

С помощью принципа Гамильтона получим систему движения в частных производных. В дальнейшем будут исследованы поперечные колебания упругого стержня, поэтому оставляем только члены, учитывающие инерцию движения в слоях вдоль вертикальной оси:

$$b_1 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - b_2 \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - b_4 \psi = 0, \quad b_2 \frac{\partial^3 \psi}{\partial x^3} - b_3 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = m_1 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2},$$