DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-3-72-77

*Дерюшев В.В., доктор технических наук, профессор,
Зайцева М.М., кандидат технических наук, доцент,
Евсеев Д.З., кандидат технических наук, доцент,
Косенко Е.Е. *, кандидат технических наук, доцент,
Донской государственный технический университет, Россия*
*Ответственный автор E-mail: kosenco@yandex.ru

КОНЦЕНТРАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ И КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ НАГРЕВЕ

Аннотация: значительные по величине термические напряжения, возникающие в тонкостенных нагруженных растягивающими напряжениями металлических материалах и конструкциях, могут привести либо к их полному разрушению, либо к появлению в них зон нарушения сплошности. Анализируются уравнения для расчета температурных напряжений в плоских тонкостенных конструкциях при их локализованном тепловом нагреве, вызванном воздействием концентрированных потоков энергии. В качестве примера рассмотрена тонкостенная растянутая пластина, подвергающаяся сильному локальному нагреву в круговом пятне. Разработанная модель учитывает изменение упругих характеристик при сильном локальном нагреве и изменение толщины материала в пятне нагрева. В качестве примера приведена эпюра распределения тангенциальных напряжений для растянутой пластины в области кругового пятна нагрева. Таким образом, результаты исследования показывают, что происходит разрыв и концентрация напряжений по контуру пятна нагрева со стороны холодной зоны.

Ключевые слова: пластина, напряженно-деформированное состояние, локальный нагрев, температурные напряжения, концентрация напряжений, бигармоническое уравнение, эпюра тангенциальных напряжений, термоупругость

Введение

Создаваемые при воздействии концентрированных потоков энергии (КПЭ) в материалах и конструкциях значительные по величине термические напряжения могут привести либо к полному разрушению тела, либо к появлению в нем зон нарушения сплошности. Имеющиеся в литературе [1-6] экспериментальные и теоретические оценки разрушения, вызываемого тепловым воздействием КПЭ, носят разрозненный и в основном качественный характер из-за отсутствия надежных данных как о количественных значениях параметров исследуемых процессов, так и о механизмах, вызывающих разрушение. Источники локализованного нагрева могут иметь различную физическую природу, в том числе могут быть вызваны воздействием мощного лазерного излучения [2-9].

Методы и материалы

Для расчета напряженно-деформированного состояния оболочечных конструкций при комплексном воздействии тепловых и механических нагрузок в настоящее время чаще используются численные модели [3, 8]. Однако аналитическое моделирование [10-13] позволяет, прежде всего, выявить закономерности и объяснить нетривиальные особенности механизмов разрушения тонкостенных оболочечных конструкций, адекватных экспериментальным данным [9-11], на основе достаточно простых аналитических соотношений, получаемых из наиболее общих систем уравнений при использовании ряда допущений. Так разрешающая система уравнений геометрически нелинейной теории оболочек может быть записана в виде уравнений типа Кармана для статического случая:

Результаты и обсуждения

Рассмотрим растягиваемую пластину толщиной h . Пусть внутри кругового пятна нагрева с радиусом r_f в момент времени $\tau = \tau_0$ задано начальное осесимметричное распределение температуры $T(r, \tau_0)$. Вследствие осевой симметрии все величины будут определяться расстоянием r от начала полярных координат, расположенных в центре кругового пятна. При сильном локальном нагреве в материале пластины возникают не только термические напряжения, но и значительно изменяются упругие характеристики. Кроме того, в пятне нагрева возможно изменение толщины пластины. В связи с этим рассматриваемую часть пластины, ограниченную окружностью радиуса b , разобьем на нагретую и холодную области.

В пределах пятна нагрева изменение температуры и упругих характеристик аппроксимируем зависимостями:

$$E = E_0 r^{n_2}, \quad T = T(r), \quad h = h_0 r^{n_3} \quad (1)$$

Коэффициент линейного расширения и коэффициент Пуассона при этом можно принять постоянными, так как их значения в меньшей степени зависят от температуры. Тогда закон Гука в полярной системе координат будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \frac{E(T)}{1-\nu^2} [\varepsilon_r + \nu \varepsilon_f - (1+\nu) \alpha_T T(r)], \\ \sigma_{ff} &= \frac{E(T)}{1-\nu^2} [\varepsilon_f + \nu \varepsilon_r - (1+\nu) \alpha_T T(r)], \\ \tau_{rf} &= \frac{E(T)}{1+\nu} \varepsilon_{rf}. \end{aligned}$$

Так как в области нагрева наряду с температурой может меняться и толщина [10], уравнение равновесия можно записать в виде:

$$\frac{d(r h \sigma_{rr})}{dr} - h \sigma_{ff} = 0.$$

Подставляя в него выражения для σ_r и σ_{ff} и используя выражения $\varepsilon_r = du/dr$; $\varepsilon_f = u/r$, для компонент деформации (здесь u – радиальные перемещения) приведем уравнение равновесия к виду:

$$r^2 \left(\frac{d^2 u}{dr^2} \right) + r \left(\frac{du}{dr} \right) - u + \left[\left(\frac{r}{h} \right) \frac{dh}{dr} + \left(\frac{r}{E} \right) \frac{dE}{dr} \right] \left[r \frac{du}{dr} + \nu u - r(1+\nu) \alpha_T T(r) \right] = r^2 (1+\nu) \alpha_T \frac{dT}{dr}. \quad (2)$$

Если величины h , E заданы как функции от r в виде (11) и $T = T_0 - T_k r^{n_3}$, то это уравнение представляет собой дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами относительно одной переменной u :

$$r^2 \left(\frac{d^2 u}{dr^2} \right) + r(1+n_1+n_2) \left(\frac{du}{dr} \right) + [\nu(n_1+n_2) - 1]u = F_2 r + F_1 r^{n_3+1}, \quad (3)$$

$$\text{здесь } F_1 = 1(1+\nu) \alpha_T (n_1 + n_2 + n_3) T_k; \quad F_2 = (1+\nu) \alpha_T (n_1 + n_2) T_0.$$

Общее решение однородного уравнения для (13) имеет вид:

$$u_0 = A r^\alpha + B r^\beta,$$

где α и β – корни квадратного уравнения $x^2 + (n_1 + n_2)x + (n_1 + n_2)\nu - 1 = 0$;

A и B – произвольные постоянные, определяемые из граничных условий.

Частное решение неоднородного уравнения (13) ищем в виде

$$u_1 = r^\alpha \int c_1(r) dr + r^\beta \int c_2(r) dr,$$

где c_1 , c_2 – неизвестные производные, определяемые по формулам

$$c_1(r) = \frac{F_1 r^{n_3+1} + F_2 r^{1-\alpha}}{r^2 (\alpha - \beta)}; \quad c_2(r) = \frac{F_1 r^{n_3+1} + F_2 r^{1-\beta}}{r^2 (\beta - \alpha)}.$$

Подставляя эти выражения в формулу для u_1 , после интегрирования получим

$$u_1 = \frac{F_1 r^{n_3+1} + F_2 r}{(n_3 + \beta + 1)(n_3 - \alpha + 1)} + \frac{F_2 r}{(1 - \alpha)(1 - \beta)}.$$

Таким образом, общее решение неоднородного дифференциального уравнения (13) будет иметь вид:

$$u(r) = u_0 + u_1 = A r^\alpha + B r^\beta + M_1 r^{n_3+1} + M_2 r,$$

Здесь

$$M_1 = \frac{F_1}{[(n_3 - \beta + 1)(n_3 - \alpha + 1)]}; \quad M_2 = \frac{F_2}{[(1 - \alpha)(1 - \beta)]}.$$

Компоненты вектора деформаций вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{du}{dr} = A \alpha r^{\alpha-1} + B \beta r^{\beta-1} + M_1 (n_3 + 1) r^{n_3} + M_2; \\ \varepsilon_f &= \frac{u}{r} = A r^{\alpha-1} + B r^{\beta-1} + M_1 r^{n_3} + M_2. \end{aligned}$$

Напряжения σ_r и σ_{ff} определяются по приведенным выше зависимостям, которые после подстановки выражений для ε_r и ε_{ff} примут вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= \frac{E_0 r^{n_2}}{1-v^2} [Ar^{\alpha-1}(\alpha+v) + Br^{\beta-1}(\beta+v) + M_1 r^{n_2}(n_2+1+v) + M_2(1+v) - (1+v)\alpha_T(T_0 + T_k r^{n_2})] \\ \sigma_{ff} &= \frac{E_0 r^{n_2}}{1-v^2} [Ar^{\alpha-1}(\alpha v + 1) + Br^{\beta-1}(\beta v + 1) + M_1 r^{n_2}(v n_2 + 1 + v) + M_2(1+v) - (1+v)\alpha_T(T_0 + T_k r^{n_2})].\end{aligned}\quad (4)$$

Постоянные T_0 , T_k и показатели степени n_1 , n_2 находятся из условий на границах рассматриваемых областей. Если на внутреннем контуре кольцевой области $r = a_1$, $T = T_r$, $E = E_0$, $h = h_0$, а на наружном контуре $r = a_2$, $T = T_x$, $E = E_x$, $h = h_x$, причем $a_2 > a_1$, тогда

$$\begin{aligned}n_1 &= \frac{\ln(\frac{h_x}{h_r})}{\ln(\frac{a_2}{a_1})}; & n_2 &= \frac{\ln(\frac{E_x}{E_0})}{\ln(\frac{a_2}{a_1})} \\ T_k &= \frac{T_r - T_x}{a_2^{n_2} - a_1^{n_2}}; & T_0 &= \frac{T_r a_2^{n_2} - T_x a_1^{n_2}}{a_2^{n_2} - a_1^{n_2}},\end{aligned}$$

здесь n_2 – показатель степени, определяемый распределением поля температур по координате r , $a_1 = 0$ для кругового пятна нагрева.

Если принять в (11) $n_1 = n_2 = 0$, то уравнение (12) можно представить в следующем виде:

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} d \left(\frac{ru}{dr} \right) \right] = (1+v)\alpha_T \frac{dT}{dr}.$$

Его интегрирование дает:

$$u(r) = \frac{A_1}{r} + B_1 r + (1+v)\alpha_T \frac{1}{r} \int_0^r T(r) r dr.$$

Напряжения для холодной области определяются выражениями:

$$\sigma_{rr}^x = -\frac{E}{1+v} \cdot \frac{A_2}{r^2}, \quad \sigma_{ff}^x = \frac{E}{1+v} \cdot \frac{A_2}{r^2}.$$

Учитывая граничные условия при $r = 0$, выражения для напряжений в зоне нагрева запишем в виде:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr}^H &= -\frac{E}{1-v} \left[B_1 - \frac{1-v}{r^2} \alpha_T \int_0^{r_f} T r dr \right]; \\ \sigma_{ff}^H &= -\frac{E}{1-v} \left[B_1 + \frac{1-v}{r^2} \alpha_T \int_0^{r_f} T r dr - (1-v)\alpha_T T \right].\end{aligned}$$

Постоянные A_2 и B_1 определим, используя граничные условия между холодной и нагретой областями при $r = r_f$.

Обозначим $J(r_f) = \int_0^{r_f} T r dr = \frac{U_0}{2\pi c \rho h}$, здесь $U_0 = 2\pi c \rho h \int_0^{r_f} T(r) r dr$. Тогда условие равенства перемещений принимает вид:

$$B_1 r_f + (1+v)\alpha_T \frac{1}{r_f} J(r_f) - \frac{A_2}{r_f}.$$

Из условия $\sigma_{rr}^x(r_f) = \sigma_{rr}^H(r_f)$ получим $B_1 = 0$, и $A_2 = (1+v)\alpha_T J(r_f)$. Подставляя эти выражения в формулы для напряжений, получим:

- для нагретой области

$$\sigma_{rr}^H = -\frac{E\alpha_T}{r^2} \int_0^r T(r) r dr; \quad \sigma_{ff}^H = E\alpha_T \left[\frac{1}{r^2} \int_0^r T(r) r dr - T(r) \right]; \quad (5)$$

- для холодной области

$$\sigma_{rr}^x = -\frac{E\alpha_T}{r^2}J(r_f); \quad \sigma_{ff}^x = \frac{E\alpha_T}{r^2}J(r_f). \quad (6)$$

Если изменяемость температуры в области нагрева небольшая, то максимальные значения растягивающих напряжений σ_{ff}^x не зависят от характера распределения, т.к. определяются задаваемой величиной энергии, поглощенной стенкой, или ее средней температурой

$$\sigma_{ff}^{max} = \frac{E\alpha_T}{2} \cdot \frac{U_0}{\pi r_f^2 ch} = \frac{E\alpha_T}{2} T_{cp}. \quad (7)$$

Здесь T_{cp} – средняя в пятне нагрева температура стенки.

Отметим основные особенности поля напряжений в растянутой пластине при локальном тепловом нагреве. Распределение тангенциальных напряжений в рассматриваемой области в одном из случаев нагрева показано на рис. 1.

Рис. 1. Распределение тангенциальных напряжений в области кругового пятна нагрева
Fig. 1. Distribution of tangential stresses in the region of a circular heating spot

Выводы

Как видно, напряжения σ_{ff} возрастают на границе пятна нагрева в точках на меридиальной линии, проходящей через центр пятна нагрева, и уменьшаются в точках, лежащих на окружной линии. Коэффициент концентрации температурных напряжений определяется как отношение максимальных растягивающих напряжений σ_{ff} , возникающих при локализованном тепловом нагреве к максимальным растягивающим пластину напряжениям σ_0 . Его максимальное расчетное для этого случая значение $k_{кон} = 3,3$ и обусловлено не только локализацией температурного поля, но и изменением механических характеристик материала в области нагрева.

Указанный характер распределения напряжений объясняет разрушение стенки металлических конструкций, по контуру пятна нагрева [8, 9] со стороны холодной зоны, и общую потерю устойчивости при осевом сжатии [10]. При этом стенка конструкции внутри пятен нагрева механически не разрушается, ввиду того, что находится в сжатом состоянии.

Литература

1. Patsyuk A.G. Experimental investigation of the load-carrying capacity of shells with combined static loading and local thermal shock // Strength of Materials. 1989. №20 (12). P. 1602 – 1604.
2. Zhao J., Sun C., Yuan Y. Crack formation on the cylindrical shell damaged by inner pressure and surface laser irradiation // 30th Plasmadynamics and Lasers Conference. 1999. P. 99 – 3548.
3. Rogovenko T., Zaitseva M. Statistical modeling for risk assessment at sudden failures of construction equipment // MATEC Web of Conferences Volume 129, 7 November 2017, International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2017; Sevastopol; Russian Federation; 11 September 2017 to 15 September 2017; DOI: 10.1051/mateconf/201712905014

4. Tang Z., 3D discrete meso-element simulation of failure processes for cylindrical shell subjected to inner pressure and surface laser irradiation // *Explosion and Shock Waves*. 200. №21 (1). P. 1 – 7.
5. Liu F., Wu Z.-S., Wang Y.-H., Chen Y.-S. at al. Estimation of laser beam-parameters based on damage configuration of a cylindrical shell subjected to internal pressure // *Zhongguo Jiguang*. 2007. №34 (6). P. 797 – 803.
6. Wang Y.-H., Liu F., Chen L.-Z., Gutu Huojian Jishu L.-J. Analysis on characteristic temperature on damage of pressurized metal shell irradiated by intense laser beam. 2008. №31 (5). P. 512 – 516.
7. Wang Y.-H., Han F., Liu Y., Wang J.-G. Evaluation of pressurized cylindrical shell damage induced by high energy laser irradiation(II)-Distribution feature of fracture parameters subjected to local thermal loading, Gutu Huojian Jishu // *Journal of Solid Rocket Technology*. 2009. №32 (5). P. 548 – 553.
8. Rogovenko T., Zaitseva M. Statistical modeling for assessment of dipper stick service life // *Materials Science Forum*, 2018931 MSF. P. 417 – 421.
9. Wang Y., Liu F., Zhang X., Ding S. Numerical simulation on similarity of thermal-mechanical effects of thin-walled pressure vessel irradiated by laser // *Advanced Materials Research*. P. 1965 – 1969.
10. Deryushev V.V, Bendyukov V.V., Kostoglotov A.I., Yunak Yu.I. at al. Criterial fracture analysis of cylindrical shell structures loaded by an internal pressure under a localized thermal shock // *Strength of Materials*, 1997. №29 (5). P. 481 – 486.
11. Kostoglotov A.I., Bendyukov V.V., Deryushev V.V., Shevtsova L.A. Investigation of the process of stability loss for smooth thin-walled cylindrical shells under the local action of a radiation pulse // *Strength of Materials*. 2004. №36 (5). P. 489 – 493.
12. Biderman V.L. Mechanics of thin-walled structures, Statics, Moscow, Mechanical Engineering, 1977. 488 p.
13. Rogovenko T., Zaitseva M. Use of statistical simulation in construction planning // *MATEC Web of Conferences*. 2017, May. Volume 106. 23 // *International Science Conference on SMART City, SPbWOSCE 2016; Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Institute of Civil Engineering Saint-Petersburg; Russian Federation; 15 November 2016 to 17 November 2016; DOI: 10.1051/mateconf/201710608011*

References

1. Patsyuk A.G. Experimental investigation of the load-carrying capacity of shells with combined static loading and local thermal shock. *Strength of Materials*. 1989. 20 (12). P. 1602 – 1604.
2. Zhao J., Sun C., Yuan Y. Crack formation on the cylindrical shell damaged by inner pressure and surface laser irradiation. 30th Plasmadynamics and Lasers Conference. 1999. P. 99 – 3548.
3. Rogovenko T., Zaitseva M. Statistical modeling for risk assessment at sudden failures of construction equipment. *MATEC Web of Conferences* Volume 129, 7 November 2017, *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2017; Sevastopol; Russian Federation; 11 September 2017 to 15 September 2017; DOI: 10.1051/mateconf/201712905014*
4. Tang Z., 3D discrete meso-element simulation of failure processes for cylindrical shell subjected to inner pressure and surface laser irradiation. *Explosion and Shock Waves*. 200. 21 (1). P. 1 – 7.
5. Liu F., Wu Z.-S., Wang Y.-H., Chen Y.-S. at al. Estimation of laser beam-parameters based on damage configuration of a cylindrical shell subjected to internal pressure. *Zhongguo Jiguang*. 2007. 34 (6). P. 797 – 803.
6. Wang Y.-H., Liu F., Chen L.-Z., Gutu Huojian Jishu L.-J. Analysis on characteristic temperature on damage of pressurized metal shell irradiated by intense laser beam. 2008. 31 (5). P. 512 – 516.
7. Wang Y.-H., Han F., Liu Y., Wang J.-G. Evaluation of pressurized cylindrical shell damage induced by high energy laser irradiation(II)-Distribution feature of fracture parameters subjected to local thermal loading, Gutu Huojian Jishu. *Journal of Solid Rocket Technology*. 2009. 32 (5). P. 548 – 553.
8. Rogovenko T., Zaitseva M. Statistical modeling for assessment of dipper stick service life. *Materials Science Forum*, 2018931 MSF. P. 417 – 421.
9. Wang Y., Liu F., Zhang X., Ding S. Numerical simulation on similarity of thermal-mechanical effects of thin-walled pressure vessel irradiated by laser. *Advanced Materials Research*. P. 1965 – 1969.
10. Deryushev V.V, Bendyukov V.V., Kostoglotov A.I., Yunak Yu.I. at al. Criterial fracture analysis of cylindrical shell structures loaded by an internal pressure under a localized thermal shock. *Strength of Materials*, 1997. 29 (5). P. 481 – 486.
11. Kostoglotov A.I., Bendyukov V.V., Deryushev V.V., Shevtsova L.A. Investigation of the process of stability loss for smooth thin-walled cylindrical shells under the local action of a radiation pulse. *Strength of Materials*. 2004. 36 (5). P. 489 – 493.

12. Biderman V.L. Mechanics of thin-walled structures, Statics, Moscow, Mechanical Engineering, 1977. 488 p.
13. Rogovenko T., Zaitseva M. Use of statistical simulation in construction planning. MATEC Web of Conferences. 2017, May. 106 (23). International Science Conference on SMART City, SPbWOSCE 2016; Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Institute of Civil Engineering Saint-Petersburg; Russian Federation; 15 November 2016 to 17 November 2016; DOI: 10.1051/mateconf/201710608011

*Deryushev V.V., Doctor of Engineering Sciences (Advanced Doctor), Professor,
Zaitseva M.M., Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor,
Evseev D.Z., Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor,
Kosenko E.E. *, Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor,
Don State Technical University, Russia*

*Corresponding author E-mail: kosenko@yandex.ru

THE CONCENTRATION OF THERMAL STRESSES IN METAL MATERIALS AND CONSTRUCTION UNDER LOCAL HEATING

Abstract: significant thermal stresses arising in thin-walled metal materials and structures loaded with tensile stresses can lead either to their complete destruction or to the appearance of discontinuity zones in them. The equations for calculation of temperature stresses in flat thin-walled structures at their localized thermal heating caused by the action of concentrated energy flows are analyzed. As an example, a thin-walled stretched plate subjected to strong local heating in a circular spot is considered. The developed model takes into account the change of elastic characteristics under strong local heating and the change in the thickness of the material in the heating spot. As an example, the diagram of the distribution of tangential stresses for a stretched plate in the area of a circular heating spot is given. Thus, the results of the study show that there is a rupture and concentration of stresses along the contour of the heating spot from the cold zone.

Keywords: plate, stress-strain state, local heating, temperature stresses, stress concentration, biharmonic equation, tangential stress plot, thermoelasticity

Для цитирования: Дерюшев В.В., Зайцева М.М., Евсеев Д.З., Косенко Е.Е. Концентрация температурных напряжений в металлических материалах и конструкциях при локальном нагреве // Строительные материалы и изделия. 2019. Том 2. №3. С. 72 – 77. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-3-72-77

For citation: Deryushev V.V., Zaitseva M.M., Evseev D.V., Kosenko E.E. The concentration of thermal stresses in metal materials and construction under local heating. Construction Materials and Products. 2019. 2 (3). P. 72 – 77. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-3-72-77

Поступила в редакцию 5 марта 2019 г.

Принята в доработанном виде 17 апреля 2019 г.

Одобрена для публикации 10 июня 2019 г.

Received: March 5, 2019.

Revised: April 17, 2019.

Accepted: June 10, 2019.