УДК 62-977

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ НА ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Артемьева Е.А., Денисов Ю.В.

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» Екатеринбург, e-mail: artemievammi@gmai.com

Рассматривается решение осесимметричной задачи термоупругости и анализируется возможность жесткого и мягкого разрушения, когда на внутренней и внешней поверхностях области происходит теплообмен со средой по закону Ньютона. Рассматриваемые задачи имеют важное практическое значение, так как позволяют оценить термопрочность многих деталей металлургического оборудования, работающих при повышенных температурах. Для длинного полого цилиндра при осесимметричном температурном поле определены поля температур и напряжений, вычислен коэффициент, характеризующий согласно объединенной прочности Давиденкова–Фридмана и характер разрушения – хрупкое или вязкое разрушение. Выполнен системный анализ влияния коэффициентов теплоотдачи, геометрических размеров, способов закрепления торцов цилиндра на величину температурных напряжений и характер разрушения.

Ключевые слова: термоупругость, термопрочность, теплоотдача, сопротивление отрыву и срезу

THE ANALYSIS OF INFLUENCE OF TEMPERATURE FIELDS ON NATURE OF DESTRUCTION OF DETAILS

Artemeva E.A., Denisov Y.V.

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N Yeltsin, Ekateinburg, e-mail: artemievammi@gmail.com

The solution of an axisymmetric problem of thermoelasticity is considered and possibility of rigid and soft destruction when on internal and external surfaces of area there is a heat exchange with environment under Newton's law is analyzed. Considered tasks have important practical value as allow to estimate thermodurability of many details of the metallurgical equipment working at increased temperatures. For the long hollow cylinder at an axisymmetric temperature field fields of temperatures and tension are defined, the coefficient characterizing, according to Davidenkov-Friedman's integrated durability and nature of destruction – fragile or viscous destruction is calculated. The system analysis of influence of coefficients of a thermolysis, the geometrical sizes, ways of fixing of end faces of the cylinder at a size of temperature tension and nature of destruction is made.

Keywords: thermoelasticity, thermodurability, thermolysis, resistance to a separation and cut

В работе приводится продолжение исследований, выполненных в [1]. Рассматривается решение осесимметричной задачи термоупругости, когда на внутренней и внешней поверхностях области происходит теплообмен со средой по закону Ньютона, а также анализируется влияние температурного поля на характер разрушения – жесткое разрушение путем отрыва или мягкое разрушение путем среза.

При оценке термопрочности деталей машин в условиях стационарного и циклического нагружений сравнительно мало проанализировано влияние коэффициентов теплопередачи и скорости нагрева на величину напряжений и деформаций, а также характер разрушения деталей. Для решения данной проблемы используется классическое изложение вопросов теплопередачи [2, 3], определения температурных напряжений при различных типах граничных условий для температуры [4, 5], а также разрушения материала и деталей при температурных воздействиях [6]. Представляет также интерес решение новых конкретных задач при граничных условиях третьего рода для температуры, позволяющих оценить влияние скорости нагрева на характер разрушения деталей, системный анализ влияния параметров нагружения на напряженное состояние деталей, что и рассматривается в данной статье.

Данные исследования имеют важное прикладное значение для определения термопрочности таких деталей, как валки прокатных станов, ролики машин непрерывного литья, другие детали металлургического оборудования, работающие при повышенных температурах.

Анализ на примере длинного цилиндра

Анализ стационарного нагружения выполнен на примере длинного цилиндра при осесимметричном температурном поле. При этом R_1, R_2 – внутренний и внешний радиусы цилиндра; p_1, p_2 – давление на внутренней и внешней поверхностях; $T(r)$ – стационарное температурное поле. Следуя [7], получим распределение напряжений в цилиндре:

$$\sigma_{rr} = \frac{\alpha \cdot E}{1-\nu} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \left(\frac{r^2 - R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \int_{R_1}^{R_2} Trdr - \int_{R_1}^{r} Trdr \right) + \frac{R_1^2 \cdot R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \frac{p_2 - p_1}{r^2}; \quad (1)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = \frac{\alpha \cdot E}{1-\nu} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \left(\frac{r^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \int_{R_1}^{R_2} Trdr + \int_{R_1}^{r} Trdr - Tr^2 \right) - \frac{R_1^2 \cdot R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \frac{p_2 - p_1}{r^2} + \frac{R_1^2 \cdot p_1 - R_2^2 \cdot p_2}{R_2^2 - R_1^2}; \quad (2)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{\alpha \cdot E}{1-\nu} \cdot \left(\frac{2 \cdot \nu}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \int_{R_1}^{R_2} Trdr - T \right) - 2\nu \frac{R_2^2 \cdot p_2 - R_1^2 \cdot p_1}{R_2^2 - R_1^2}, \quad (\varepsilon_{zz} = 0); \quad (3)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{\alpha \cdot E}{1-\nu} \cdot \left(\frac{2 \cdot \nu}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \int_{R_1}^{R_2} Trdr - T \right), \quad (F_{zz} = 0), \quad (4)$$

где α – коэффициент линейного расширения; E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона. Формула (3) соответствует плоскому деформированному состоянию, а (4) – случаю равенства нулю осевого усилия, причем при $p_1 = p_2 = 0$ и $\sigma_{zz} = \sigma_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi}$.

Стационарное температурное поле внутри цилиндра при граничных условиях третьего рода, когда на внутренней и внешней поверхностях происходит теплообмен со средой по закону Ньютона, определяется выражением:

$$T = \frac{T_1 \cdot \left(\frac{1}{h_2 \cdot R_2} + \ln \frac{R_2}{r} \right) + T_2 \cdot \left(\frac{1}{h_1 \cdot R_1} + \ln \frac{r}{R_1} \right)}{\frac{1}{h_1 \cdot R_1} + \frac{1}{h_2 \cdot R_2} + \ln \frac{R_2}{R_1}}, \quad (5)$$

где $h_1 = \frac{\alpha_1}{\lambda}$; $h_2 = \frac{\alpha_2}{\lambda}$; T_2 – температура среды на внутренней и внешней поверхностях; α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи на внешней и внутренней поверхностях, Вт/(м²·град.); λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м²·град.).

Результаты расчетов для цилиндра при изменении коэффициента теплоотдачи на внешней поверхности и внутреннего радиуса цилиндра приведены в табл. 1. При этом значения остальных величин, входящих в формулы, приняты равными: $E = 0{,}196 \cdot 10^6$ МПа; $\nu = 0{,}35$; $\alpha = 11{,}4 \cdot 10^{-6}$ град$^{-1}$; $R_2 = 0{,}175$ м; $T_2 = 250$ °C; $h_1 = 40$ м$^{-1}$; $T_1 = 90$ °C.

В табл. 2.1 и 2.2 приведено распределение температуры, напряжений и коэффициента m, характеризующего характер напряженного состояния, по радиусу. Коэффициент m, согласно объединенной теории прочности Давиденкова-Фридмана, характеризует напряженное состояние и представляет собой отношение наибольшего касательного напряжения к наибольшему приведенному растягивающему напряжению в данной точке:

$$m = \frac{\tau_{max}}{+\sigma_{max}^{\pi}}; \quad \tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2};$$

$$\sigma_{max}^{\pi} = \sigma_1 - \nu \cdot (\sigma_2 + \sigma_3),$$

причем σ_1 – наибольшее; σ_3 – наименьшее главные напряжения.

Вместе с сопротивлениями отрыву и срезу коэффициент m характеризует возможность хрупкого или вязкого разрушения. При «жестких» способах нагружения $m < 1$ более вероятным является хрупкое разрушение путем отрыва, когда может быть использована теория наибольших удлинений. При «мягких» – разрушение путем среза после довольно значительной пластической деформации, когда можно применять теорию наибольших касательных напряжений.

Таблица 1

Значения температуры и напряжений (МПа) на внешней и внутренней поверхностях цилиндра, R_2 = 0,175 м; h_1 = 40 м$^{-1}$; T_1 = 90°С; T_2 = 250°С

		Внутренний радиус R_1, м					
		0,125		0,0875		0,0475	
		$r = R_1$	$r = R_2$	$r = R_1$	$r = R_2$	$r = R_1$	$r = R_2$
	$\sigma_{\varphi\varphi}$	61	–49	110	–70	174	–72
h_2 = 5 м$^{-1}$	σ_{zz}	–222	–332	–211	–390	–206	–452
	T,°С	109	141	111	164	119	191
	$\sigma_{\varphi\varphi}$	158	–126	213	–135	260	–108
h_2 = 50 м$^{-1}$	σ_{zz}	–256	–540	–220	–569	–209	–577
	T,°С	140	222	132	233	134	241
	$\sigma_{\varphi\varphi}$	173	–139	225	–143	267	–111
h_2 = 100 м$^{-1}$	σ_{zz}	–261	–573	–221	–589	–209	–587
	T,°С	144	235	134	241	135	245
	$\sigma_{\varphi\varphi}$	188	–150	236	–149	273	–114
h_2 = 500 м$^{-1}$	σ_{zz}	–266	–604	–222	–607	–209	–596
	T,°С	148	247	136	248	136	249

Таблица 2.1

Распределение температуры, напряжений и коэффициента m по радиусу цилиндра, R_1 = 0,125 м; R_2 = 0,175 м; T_1 = 90°С; T_2 = 250°С; h_1 = 40 м$^{-1}$; h_2 = 50 м$^{-1}$

	Текущий радиус r, м					
	0,125	0,135	0,145	0,155	0,165	0,175
T, °С	139	158	176	192	207	222
σ_{rr}, МПа	0	9	12	11	6	0
$\sigma_{\varphi\varphi}$, МПа	158	84	21	–34	–83	–126
σ_{zz}, МПа (ε_{zz} = 0)	–256	–321	–381	–437	–490	–540
m	0,84	1,05	1,34	1,27	1,2	1,16
σ_{zz}, МПа (F_z = 0)	158	93	33	–24	–77	–126
m	0,77	0,69	0,49	0,72	0,72	0,71

Таблица 2.2

Распределение температуры, напряжений и коэффициента m по радиусу цилиндра, R_1 = 0,0875 м; R_2 = 0,175 м; T_1 = 90°С; T_2 = 250°С; h_1 = 40 м$^{-1}$; h_2 = 50 м$^{-1}$

	Текущий радиус r, м					
	0,088	0,105	0,122	0,14	0,157	0,175
T, °С	132	158	181	201	218	233
σ_{rr}, МПа	0	25	29	23	13	0
$\sigma_{\varphi\varphi}$, МПа	213	97	15	–46	–95	–135
σ_{zz}, МПа (ε_{zz} = 0)	–220	–312	–389	–456	–516	–569
m	0,75	1,04	1,23	1,2	1,16	1,15
σ_{zz}, МПа (F_z = 0)	213	122	44	–23	–82	–135
m	0,77	0,61	0,51	0,72	0,72	0,71

Результаты расчетов показывают, что цилиндр с равным нулю осевым усилием характеризуется более жестким напряженным состоянием, когда наиболее вероятным является разрушение путем отрыва. Следует отметить, что при расчетах на термопрочность температурное поле оказывает влияние на величину напряжений в соответствующей точке, сопротивление отрыву и срезу и характер разрушения, который определяется коэффициентом напряженного состояния m.

При анализе температурных напряжений представляет интерес влияние коэффициентов теплоотдачи h_1 и h_2, размера внутреннего отверстия R_1 на величину напряжений.

Из данных табл. 1 следует, что при фиксированном значении $R_1 = 0{,}125$ м увеличение коэффициента теплоотдачи h_2 с 5,0 до 500 м$^{-1}$ увеличивает перепад температур на внешней и внутренней поверхностях и, соответственно, тангенциальные напряжения с 61 до 188 МПа на внутренней поверхности и с –49 до –150 МПа на наружной поверхности, подтверждая тот факт, что более теплоизолированный цилиндр обладает большей термопрочностью. Уменьшение размера внутреннего отверстия во всех случаях приводит к увеличению тангенциальных напряжений на внутренней поверхности. При $h_1 = 5$ м$^{-1}$ сжимающие тангенциальные напряжения на внешней поверхности увеличиваются по абсолютной величине, в других случаях происходит уменьшение по абсолютной величине при уменьшении размера внутреннего отверстия. Если температуры на внешней и внутренней поверхности $T_2' < T_1'$, то тангенциальные напряжения будут сжимающими на внутренней поверхности и растягивающими на внешней. Можно отметить, что с точки зрения величины напряжений на внутренней и внешней поверхностях при различных температурах, наиболее прочным является цилиндр с большим размером внутреннего отверстия.

Результаты расчетов, приведенные в табл. 2.1 и 2.2, позволяют отметить следующее. При $R_1 = 0{,}125$ м и $R_1 = 0{,}0875$ м тангенциальные напряжения $\sigma_{\varphi\varphi}$ достаточно быстро уменьшаются по мере удаления от внутренней и наружной поверхностей цилиндра. Так же ведут себя осевые напряжения σ_{zz} при равном нулю осевом усилии $F_z = 0$.

Для плоского деформированного состояния $\varepsilon_{zz} = 0$ осевые напряжения достигают наибольшего значения по абсолютной величине на наружной поверхности. В этом случае коэффициент m, определяющий характер напряженного состояния, имеет наименьшее значение на внутренней поверхности, где наиболее вероятно хрупкое разрушение путем отрыва. При данном значении температурного поля в центральной части полого цилиндра наблюдается переход к более мягкому виду напряженного состояния и разрушению путем среза, а на наружной поверхности возможен тот и другой вид разрушения. При равном нулю осевом усилии $F_z = 0$ во всех точках цилиндра $m < 1$, что определяет наиболее вероятное хрупкое разрушение путем отрыва. Следует отметить, что наименьшее значение коэффициента m имеет место во внутренних точках области, когда напряженное состояние приближается к всестороннему равномерному растяжению.

Список литературы

1. Артемьева Е.А., Денисов Ю.В. Анализ температурных воздействий и свойств материала. – Студенческий научный форум 2012, http://rae.ru/forum2012/206/2202 (Дата обращения: 11.08.2012).

2. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 486 с.

3. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

4. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. – М.: Мир, 1964. – 518 с.

5. Паркус Г. Неустановившиеся температурные напряжения. – М.: Физматгиз, 1963. – 252 с.

6. Прочность материалов и конструкций / под ред. Г.С. Писаренко. – Киев: Наукова думка, 1975. – 384 с.

7. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1979. – 560 с.

References

1. Artem'eva E.A., Denisov Ju.V. Analiz temperaturnyh vozdejstvij i svojstv materiala. – Studencheskij nauchnyj forum 2012, http://rae.ru/forum2012/206/2202 (accessed 11 August 2012).

2. Karslou G., Eger D. Teploprovodnost' tverdyh tel. M., Nauka, 1964, 486 p.

3. Lykov A.V. Teorija teploprovodnosti. M., Vysshaja shkola, 1967, 600 p.

4. Boli B., Ujejner Dzh. Teorija temperaturnyh naprjazhenij. M., Mir, 1964, 518 p.

5. Parkus G. Neustanovivshiesja temperaturnye naprjazhenija. M., Fizmatgiz, 1963, 252 p.

6. Prochnost' materialov i konstrukcij pod red. G.S. Pisarenko. Kiev, Naukova dumka, 1975, 384 p.

7. Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. Teorija uprugosti. M., Nauka, 1979, 560 p.

Рецензенты:

Паршин В.С., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Металлургические и роторные машины» Механико-машиностроительного института Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург;

Чечулин Ю.Б., д.т.н., профессор кафедры «Детали машин» Механико-машиностроительного института Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург;

Пындак В.И., д.т.н., профессор Волгоградской сельскохозяйственной академии, г. Волгоград.

Работа поступила в редакцию 03.06.2013.