

УДК 539.37

Анализ живучести пластины из высокопористого порнищаемого ячеистого материала при циклическом термонагружении

А.М. Покровский¹, Ю.В. Воронов¹, И.А. Чернышев²¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.² ООО «Энергооборудование», 115318, Москва, Российская Федерация, Ткацкая ул., д. 1.

Analysis of survivability of a plate made of a highly porous cellular material under cyclic thermal loading

A.M. Pokrovskiy¹, Yu.V. Voronov¹, I.A. Chernyshev²¹ Bauman Moscow State Technical University, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation.² OJSC «Power Equipment», Tkatskaya str., 1, 115318, Moscow, Russian Federation.

e-mail: ampokr@mail.ru, chernyshov@enerob.ru



В настоящее время все большее значение приобретает проблема изготовления деталей и конструкций из высокопористых порнищаемых ячеистых материалов (ВПЯМ), имеющих сетчато-ячеистую структуру и обладающих уникальными физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Использование ВПЯМ особенно актуально при изготовлении эффективных теплообменных устройств, фильтров, катализаторов, конструкций для поглощения различных видов энергии. В статье разработана методика прогнозирования долговечности пластины из ВПЯМ при циклическом термонагружении путем расчета на живучесть в детерминированной постановке с использованием уравнения Пэриса. Для определения коэффициента интенсивности напряжений по фронту полуэллиптической трещины использован конечно-элементный комплекс ANSYS. Приведены результаты экспериментального исследования физико-механических свойств ВПЯМ, необходимых для математического моделирования. Представлены результаты численной реализации применительно к непркатанным и прикатанным пластинам, работающим в качестве стенок экологически безопасного промышленного водогрейного котла. Показано, что прикатка пластины приводит к увеличению ее долговечности при термонагружении приблизительно в 1,5 раза.

Ключевые слова: высокопористый ячеистый материал, термонагружение, долговечность, живучесть, полуэллиптическая трещина, метод конечных элементов, уравнение Пэриса.



The problem of manufacturing parts and structures from highly porous cellular materials (HPCMs) to obtain unique physical and mechanical properties and high performance is becoming increasingly important. Using HPCMs is especially important in the manufacture of efficient heat exchangers, filters, catalysts, and structures absorbing various types of energy. In this paper, a technique for forecasting the durability of an HPCM plate under cyclic thermal loading is developed. The technique implies the calculation of survivability within a deterministic framework by using the Paris equation. The finite element software package ANSYS is used to determine the stress intensity factor of a semi-elliptical crack. Experiments were conducted in order to establish physical and mechanical properties of HPCMs needed for the mathematical modeling. The numerical analysis is performed for rolled up and unrolled plates used as walls of an ecological industrial boiler. The results of research show that rolling up a plate increases its durability under thermal loading by a factor of about 1.5.

Keywords: highly porous cellular material, thermal loading, durability, survivability, semi-elliptical crack, finite element method, Paris equation.

В настоящее время все большее значение приобретает проблема изготовления деталей и конструкций из высокопористых проницаемых ячеистых материалов (ВПЯМ). Такие материалы, имеющие сетчатую ячеистую структуру, характеризуются уникальными физико-механическими и эксплуатационными свойствами: высокой термостойкостью, пылеемкостью, коррозионной стойкостью, конструкционной прочностью и жесткостью. Использование ВПЯМ особенно актуально при изготовлении эффективных теплообменных устройств, фильтров, катализаторов, конструкций для поглощения различных видов энергии. В частности, ВПЯМ применяются для изготовления компактного экологически безопасного промышленного водогрейного котла [1].

При эксплуатации теплогенератора, основу которого составляет блочный каталитический инфракрасный тепловыделяющий элемент, стенки котла претерпевают многократное термонагружение в результате чего происходит их разрушение. Экспериментальные исследования показали, что увеличения ресурса стенок котла можно добиться посредством механической прикатки пластин из ВПЯМ, из которых изготавливаются стенки.

Цель работы — разработка методики прогнозирования долговечности пластины из ВПЯМ при циклическом термонагружении путем расчета на живучесть в детерминированной постановке с использованием уравнения Пэриса.

Конструкция теплогенератора позволяет с достаточной степенью точности использовать в качестве математической модели стенки котла пластину, закрепленную по двум сторонам шарнирно, а по противоположным сторонам — на катках (рис. 1). В настоящей работе проведен сравнительный анализ ресурса двух квадратных пластин из ВПЯМ со стороной 250 мм посредством решения задачи живучести. Рассмотрены неприкатанная пластина толщиной 8 мм и пластина, прикатанная до толщины 5 мм. В рабочем состоянии температура внутренней поверхности стенки котла T_1 составляет 800 °С, а наружной T_2 — 200 °С. Циклическость теплового нагружения осуществляется за счет периодического отключения нагрева.

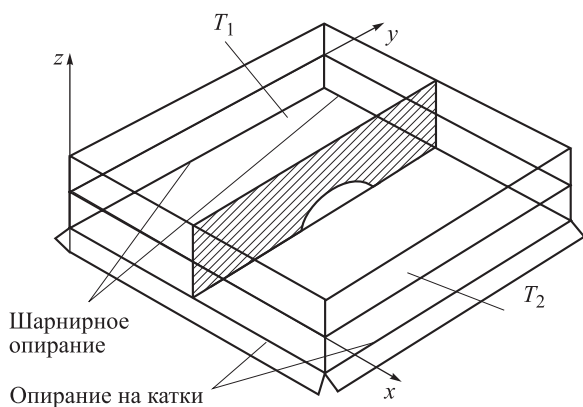


Рис. 1. Расчетная схема

Определение коэффициента интенсивности напряжений (КИН) по фронту полуэллиптической краевой трещины проводилось в конечно-элементном комплексе ANSYS. Использовался 15-узловой конечный элемент (КЭ) Solid 186, обладающий тремя степенями свободы в каждом узле. Данный элемент может иметь форму гексаэдра или тетраэдра, а в особых случаях — форму трехгранной призмы или пирамиды с четырехугольным основанием. Наличие дополнительных узлов в серединах ребер этого элемента делает его наиболее применимым для моделирования тонкостенных конструкций. Кроме того, используемый КЭ имеет встроенную функцию вычисления КИН по фронту трещины при различных типах нагружения, в том числе и температурном. Конечно-элементная модель пластины с трещиной представлена на рис. 2. Для тестирования модели выполнены расчеты КИН для поперечной полуэллиптической трещины в растянутой полосе. Результаты сравнения с аналитическим решением, приведенным в работе [2], показали адекватность разработанной математической модели. Погрешность вычислений не превысила 5 %.

Живучесть пластины из ВПЯМ при температурном нагружении оценивалась в детерминированной постановке. Использовался подход, называемый расчет на гарантированную прочность [3], согласно которому предполагалось, что изначально в наиболее опасном месте пластины (в середине) имеется краевая полуэллиптическая трещина с начальной глубиной, равной 1 мм. Определялось количество циклов нагружения, при котором трещина вырастет от начального до критического размера. При моделировании роста трещины предполагалось, что ее форма остается эллиптической. В основу расчета была положена формула Пэриса, описывающая линейный участок кинетической диаграммы усталостного разрушения [4]:

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K_I)^m, \quad (1)$$

где ΔK_I — размах КИН за цикл; l — характерный размер трещины (малая или большая полуоси эллипса); N — число циклов; C , m — эмпирические коэффициенты.

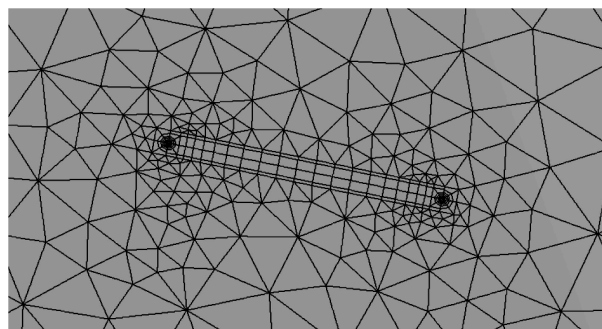


Рис. 2. Конечно-элементная модель пластины с трещиной

(Полноцветную версию см. <http://www.izvuzmash.bmstu.ru>)

Численное интегрирование уравнения (1) проводилось шаговым методом. На каждом шаге с помощью комплекса ANSYS для текущих размеров трещины (малой или большой полуосей) определялись значения КИН в наиболее заглубленной точке фронта трещины и точке, выходящей на поверхность. Задавался шаг изменения циклов нагружения ΔN и определялось увеличение размеров трещины за данный шаг в двух этих точках:

$$\Delta l = \Delta K_I^m \Delta N. \tag{2}$$

При расчете значение КИН в этих двух точках на шаге считалось постоянным. На следующем шаге генерировалась новая конечно-элементная сетка для пластины с подросшей трещиной и определялись текущие значения КИН для этой трещины. Далее все повторялось. Долговечность (количество циклов до разрушения) определялась путем анализа двух условий. Во-первых, проверялось выполнение силового критерия разрушения Ирвина [4], согласно которому максимальное значение КИН не может превышать критического значения, равного вязкости разрушения K_{Ic} . Во-вторых, анализировалась длина малой полуоси (глубина) трещины, которая не могла превышать толщины пластины. При невыполнении любого из этих условий считалось, что пластина разрушается, а количество циклов, при котором это произошло равняется долговечности. При этом шаг циклов нагружения определялся численно посредством проведения расчетов с различными шагами. Свидетельством того, что был выбран правильный шаг, являлась неизменность результатов расчета при уменьшении шага.

Проведению численного расчета предшествовало экспериментальное исследование физико-механических свойств ВПЯМ. Поскольку настоящая работа посвящена оценке живучести при термонагружении, то в первую очередь необходимо было определить коэффициент линейного расширения. С этой целью при нормальной температуре в пластине из ВПЯМ на расстоянии приблизительно 100 мм друг от друга просверливались два отверстия, в которые с натягом вставлялись проволоочные штыри (рис. 3). Расстояние между штырями при температуре $t_1 = 28 \text{ }^\circ\text{C}$, замеренное штангенциркулем составило $l_1 = 101,6 \text{ мм}$. Далее проводился нагрев пластины до температуры



Рис. 3. Определение коэффициента линейного расширения

$t_2 = 560 \text{ }^\circ\text{C}$ и повторный замер. Расстояние в этом случае составило $l_2 = 102,7 \text{ мм}$. Коэффициент линейного расширения определялся по формуле

$$\alpha = (l_2 - l_1) / (t_2 - t_1) / l_1. \tag{3}$$

Описанный опыт проводился трижды для неприкатанной и прикатанной пластины. Обработка полученных экспериментальных данных показала, что с достаточной степенью точности КИН для неприкатанной и прикатанной пластины можно принять равным $1,85 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$.

Натурный эксперимент показал, что в процессе эксплуатации стенки котла из ВПЯМ с размерами $250 \times 250 \times 8 \text{ мм}$ выгибаются наружу в центре на 7 мм. В связи с этим механические испытания проводились на образцах, вырезанных из неприкатанных и прикатанных пластин, толщиной 8 и 5 мм соответственно, длиной равной половине габаритных размеров пластины 125 мм и шириной 21 мм. Образцы испытывались на изгиб. Один конец образца жестко (консольно) закреплялся, а на другой конец подвешивался груз, при котором прогиб свободного конца, фиксируемый индикатором часового типа, составлял 7 мм. При этом определялся вес требуемого груза. При испытании неприкатанных образцов при нормальной температуре были получены следующие значения массы груза: 0,884; 1,021, 1,038 и 1,185 кг. Для консольно закрепленного образца, нагруженного на другом конце силой, равной весу груза, прогиб точки приложения силы [5]

$$\delta = 4Fl^3 / (Ebh^3), \tag{4}$$

где F — вес груза; l , b и h — длина, ширина и толщина образца; E — модуль Юнга.

Выражая формулу (4) относительно E и подставляя в нее среднее значение массы 1,032 кг, а также прогиб и размеры образца, можно определить значение модуля Юнга для неприкатанной пластины при нормальной температуре.

По четыре опыта также было проведено для нагретых до температур 800 и 1 000 $^\circ\text{C}$ образцов, вырезанных из прикатанных пластин. Результаты экспериментального исследования зависимости модуля Юнга для неприкатанной E_1 и прикатанной пластины E_2 от температуры сведены в таблицу. В результате обработки опытных данных методом наименьших квадратов [6] получены следующие зависимости для модуля Юнга в интервале температур 25...1 000 $^\circ\text{C}$:

$$E_1 = 28,7\sqrt{1050 - t}; \quad E_2 = 30,1\sqrt{1098 - t}, \tag{5}$$

где t — температура, $^\circ\text{C}$.

Зависимость модуля Юнга от температуры

Модуль Юнга, МПа	Температура, $^\circ\text{C}$		
	25	800	1 000
E_1	930	570	343
E_2	970	594	383

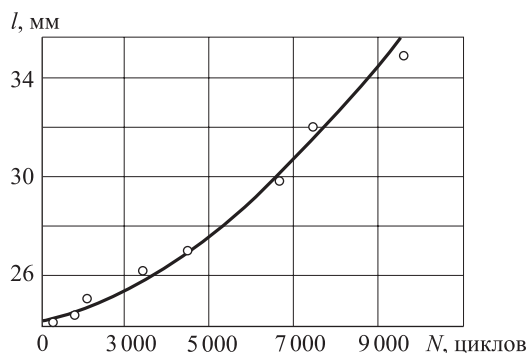


Рис. 4. Зависимость длины трещины от количества циклов:

○ — эксперимент; — — расчет

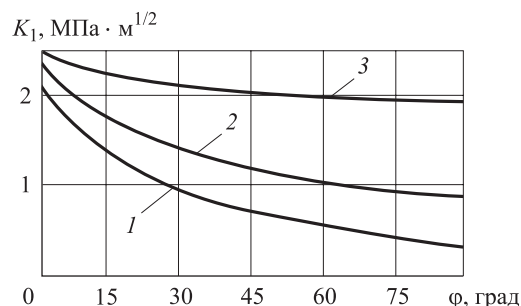


Рис. 5. Изменение КИН по фронту трещины в зависимости от отношения длины трещины к глубине:

1 — $l/b = 2$; 2 — $l/b = 4$; 3 — $l/b = 10$

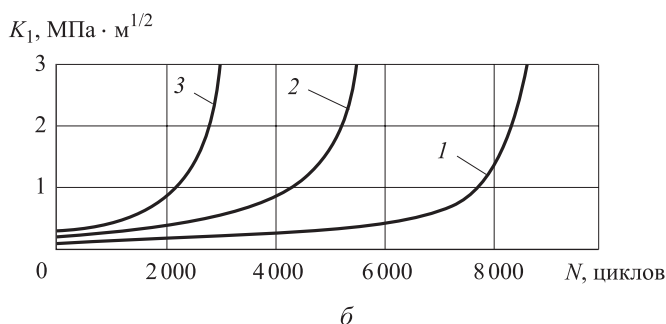
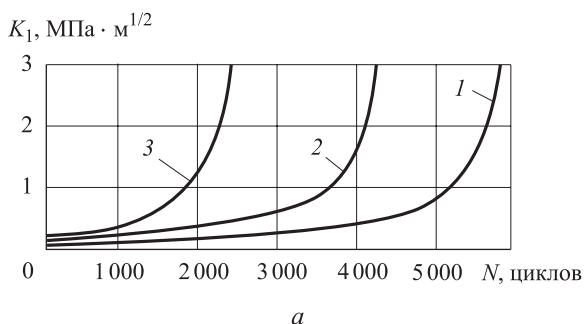


Рис. 6. Зависимость максимального КИН от количества циклов нагружения непркатанной (а) и прикатанной (б) пластин и от отношения длины трещины к глубине:

1 — $l/b = 4$; 2 — $l/b = 10$; 3 — $l/b = 20$

Экспериментальное исследование вязкости разрушения показало, что для непркатанной пластины можно принять $K_{Ic} = 4$, а для прикатанной — $K_{Ic} = 5 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$.

Известно, что для большинства материалов значение эмпирического коэффициента m , входящего в формулу Пэриса (1), составляет 2,3–3,4 [7], поэтому в работе было принято среднее значение 2,85. Значение коэффициента C определялось на основании метода наименьших квадратов, исходя из лучшего соответствия экспериментальной зависимости изменения длины трещины от количества циклов расчетным значениям, полученным по формуле Пэриса. Проведенный анализ показал, что наилучшее согласование с экспериментом для непркатанной пластины получается при значении $C = 3,31 \cdot 10^{-4}$. Экспериментальные значения и результаты численного расчета длины трещины при данных значениях коэффициентов C и m приведены на рис. 4. Для прикатанной пластины значения коэффициента m было принято таким же, как для непркатанной, а значение $C = 2,32 \cdot 10^{-5}$.

В расчете принималось линейное распределение температуры по толщине пластины (200 °С на нижней поверхности, 800 °С — на верхней), что

справедливо для стационарного температурного поля. В качестве иллюстрации возможностей разработанной математической модели на рис. 5 представлены результаты расчета КИН по фронту трещины глубиной 5 мм в непркатанной пластине для различных соотношений длины к глубине трещины. На рисунке видно, что по мере увеличения соотношения длины трещины к ее глубине различие КИН в наиболее заглубленной точке к КИН в точке, выходящей на поверхность, уменьшается, что объясняется «затуплением» трещины в наиболее заглубленной точке.

Результаты оценки живучести непркатанной и прикатанной пластины с начальной трещиной глубиной 1 мм приведены на рис. 6.

Выводы

1. Увеличение начальной длины трещины при условии неизменности начальной глубины приводит к уменьшению долговечности пластины.

2. Прикатка пластины способствует увеличению ее долговечности при термонагружении приблизительно в 1,5 раза.

Литература

- [1] Анциферов В.Н., Храпцов В.Д., Поливода А.И., Волков Е.П., Цой Г.А., Бевз А.П. Высокопористые проницаемые материалы для экологически безопасных теплогенераторов. *Перспективные материалы*, 2008, № 6, с. 5–10.
- [2] Мураками Ю., ред. *Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений*. Т. 2. Москва, Мир, 1990. 1016 с.
- [3] Партон В.З., Морозов Е.М. *Механика упруго-пластического разрушения*. Ч. 1. *Основы механики разрушения*. Москва, ЛКИ, 2008. 352 с.
- [4] Черепанов Г.П. *Механика разрушения*. Ижевск, Институт компьютерных исследований, 2012. 872 с.
- [5] Феодосьев В.И. *Сопrotивление материалов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 591 с.
- [6] Бахвалов Н.С., Корнев А.А., Чижонков Е.В. Численные методы. Решения задач и упражнения. Москва, Изд-во Дрофа, 2009. 393 с.
- [7] Гусев А.С. *Вероятностные методы в механике машин и конструкций*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 224 с.

References

- [1] Antsiferov V.N., Khrantsov V.D., Polivoda A.I., Volkov E.P., Tsoi G.A., Bevez A.P. Vysokoporistye pronitsaemye materialy dlia ekologicheski bezopasnykh teplogeneratorov [The highly permeable materials for environmentally friendly heat generators]. *Perspektivnye materialy* [Journal of Advanced Materials]. 2008, no. 6, pp. 5–10.
- [2] *Spravochnik po koeffitsientam intensivnosti napriazhenii* [Handbook of stress intensity factors]. Ed. Murakami Ju., Moscow, Mir publ., vol. 2, 1990. 1016 p.
- [3] Parton V.Z., Morozov E.M. *Mekhanika uprugoplasticheskogo razrusheniia*. Ch. 1. *Osnovy mekhaniki razrusheniia* [Elastoplastic fracture mechanics: pt. 1. Fundamentals of Fracture Mechanics]. Moscow, LKI publ., 2008. 352 p.
- [4] Cherepanov G.P. *Mekhanika razrusheniia* [Fracture mechanics]. Izhevsk, Institut komp'uternykh issledovaniy publ., 2012. 872 p.
- [5] Feodos'ev V.I. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow, Bauman Press, 2001. 591 p.
- [6] Bakhvalov N.S., Kornev A.A., Chizhonkov E.V. *Chislennye metody. Resheniia zadach i upravneniia* [Numerical methods. Solving problems and exercises]. Moscow, Drofa publ., 2009. 393 p.
- [7] Gusev A.S. *Veroiatnostnye metody v mekhanike mashin i konstruksii* [Probabilistic methods in the mechanics of machines and structures]. Moscow, Bauman Press, 2009. 224 p.

Статья поступила в редакцию 14.03.2014

Информация об авторах

ПОКРОВСКИЙ Алексей Михайлович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная механика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: ampokr@mail.ru).

ВОРОНОВ Юрий Викторович (Москва) — аспирант кафедры «Прикладная механика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

ЧЕРНЫШЕВ Илья Александрович (Москва) — начальник конструкторского отдела ООО «Энергооборудование» (115318, Москва, Российская Федерация, Ткацкая ул., д. 1, e-mail: chernyshov@enerob.ru).

Information about the authors

POKROVSKIY Aleksey Mikhaylovich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Applied Mechanics» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: ampokr@mail.ru).

VORONOV Yuriy Viktorovich (Moscow) — Post-Graduate of «Applied Mechanics» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation).

CHERNYSHEV Ilya Aleksandrovich (Moscow) — Head of Development Department. OJSC «Power Equipment» (Tkatskaya str., 1, 115318, Moscow, Russian Federation, e-mail: chernyshov@enerob.ru).