УДК 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЯЧЕИСТОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ И РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТНОЙ БАЛКИ ПРИ НАЛИЧИИ В СВЯЗУЮЩЕМ СЛОЕ ТРЕЩИНЫ НОРМАЛЬНОГО ОТРЫВА

М. Шишесаз, М. Дехгани, М. Хасанванд

Университет г. Ахваз им. Шахида Чамрана, Ахваз, Иран
E-mails: mshishehsaz@scu.ac.ir, mohammad.dehghani.20@gmail.com, m.hasanvand89@gmail.com

Исследуется зависимость коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины нормального отрыва, расположенной в связующем слое пятислойной композитной балки, от свойств заполнителя. Ячейки заполнителя в форме сотов, равносторонних треугольников и квадратов изготовлены из листов номекса. Механические свойства двумерного и трехмерного ячеистых заполнителей определялись численно методом конечных элементов. Определен коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины нормального отрыва, расположенной в связующем слое композитной слоистой балки. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными. Установлено, что в балке с заполнителем, состоящим из ячеек в форме сотов, коэффициент интенсивности напряжений меньше, чем в балке с заполнителем, состоящим из ячеек в форме равносторонних треугольников или квадратов. Показано, что с увеличением толщины стенок ячеек коэффициент интенсивности напряжений увеличивается.

Ключевые слова: ячеистый заполнитель, трещина нормального отрыва, связующий слой, метод конечных элементов.

DOI: 10.15372/PMTF20200113

Введение. Слоистые балки, пластины и панели [1] являются слоистыми композитными конструкциями, которые широко используются в судо- и авиастроении, поскольку обладают большой прочностью при малой массе [2]. Такие конструкции состоят из двух несущих пластин, воспринимающих изгибные моменты, и находящегося между ними заполнителя. Несущие пластины и заполнитель скреплены двумя адгезионными (связующими) слоями. Ячеистые заполнители изготовлены из частиц с различными формой и массой [3], в частности, широко используются частицы в форме сотов.

Ячеистые заполнители слоистых балок и пластин могут быть изготовлены различным способом. Если стенки ячеек заполнителя изготовлены из изотропного материала, то их механические свойства можно определить на основе свойств одной ячейки с использованием уравнений классической механики. Если стенки ячеек изготовлены из композитных материалов, то их механические свойства можно определить экспериментально, используя блок ячеек, или с помощью численных методов [4].

В работе [5] механические свойства ячеистого заполнителя определялись с использованием двумерной модели в предположении, что стенка ячейки ведет себя так же, как балка Бернулли, в [6] — с помощью метода конечных элементов. В [7] механические свойства заполнителя с ячейками в виде сотов, изготовленными из листов номекса, определялись экспериментально, свойства заполнителя с ячейками в виде сотов в поперечном направлении определялись с помощью метода конечных элементов. В работе [8] с использованием метода конечных элементов и экспериментальных данных изучались механические свойства перфорированной слоистой композитной пластины. Установлено, что предел прочности неперфорированной слоистой панели на 3 % меньше по сравнению с перфорированной панелью. Свойства поверхности контакта после ее диффузионного наполнения алюминием исследовались в работе [9]. Заполнитель состоял из гладких и гофрированных листов сплава Cr15Al5, а несущие слои были выполнены из стали марки 12Cr18Ni10Ti. Установлено, что после алюминизации поверхности контакта концентрация алюминия увеличивается равномерно по всей толщине листа.

Во многих работах исследовалось разрушение слоистых конструкций вследствие наличия трещины в связующем слое. Предложен ряд соотношений, позволяющих оценить поведение конструкций, изготовленных из изотропных материалов. Для анализа поведения конструкций из композитных материалов использовались численные и экспериментальные методы. В работе [10] исследовалось поведение слоистой балки с несущими слоями из эпоксидного углерода и заполнителем из пеноподобного материала. В [11] изучено поведение двумерной трещины, расположенной вблизи поверхности раздела двух материалов, определена критическая длина трещины, расположенной параллельно среднему слою, и установлено, что мягкий несущий слой не препятствует распространению расположенной вблизи поверхности раздела трещины в направлении этой поверхности. В работе [12] с использованием метода конечных элементов исследовалось распространение трещины в слоистой пластине с заполнителем из пенообразного материала, а также изучалось влияние надрезов, расположенных вблизи нижнего и верхнего несущих слоев, на поведение пенообразного заполнителя.

Существует большое количество работ, в которых приведены результаты изучения процесса разрушения слоистых композитных конструкций. Однако, насколько известно авторам данной работы, исследование влияния наличия трещины в связующем слое, скрепляющем несущие слои с заполнителем, на поведение слоистой конструкции не проводилось.

В настоящей работе предлагается метод определения механических свойств ячеистого заполнителя на основе данных о свойствах отдельных ячеек и исследуется зависимость коэффициента интенсивности напряжений от формы ячеек при наличии в слоистой композитной балке трещины нормального отрыва.

1. Моделирование ячеистого заполнителя методом конечных элементов. На рис. 1 показаны двумерные и трехмерные модели ячеистых заполнителей, механические характеристики которых определялись с использованием метода конечных элементов. Определены упругие постоянные, характеризующие поведение заполнителя в направлениях 1 и 2, лежащих в его плоскости (модули упругости E_1, E_2, модуль сдвига G_{12}, коэффициент Пуассона ν_{12}), в направлении 3 (модуль упругости E_3, модули сдвига G_{13}, G_{23}), а также коэффициенты Пуассона ν_{21}, ν_{32}.

Для моделирования поведения двумерного и трехмерного ячеистых заполнителей использовались балочные и оболочечные элементы, а также двухузловые балочные элементы, построенные на основе теории балки Тимошенко, учитывающей поперечные сдвиги. Балочные и оболочечные элементы в каждом узле имеют шесть степеней свободы: перемещения в направлениях осей x, y, z и повороты относительно этих осей.

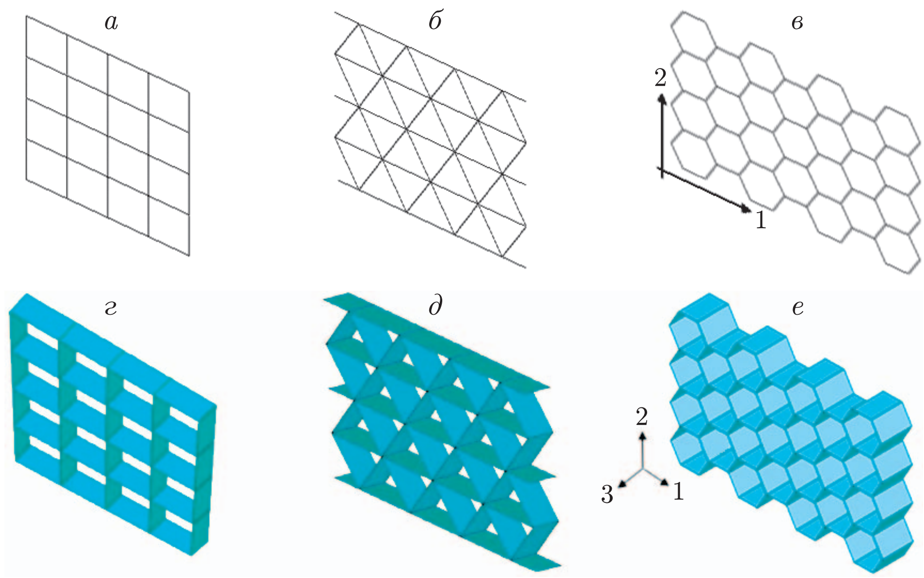


Рис. 1. Двумерные (*а*–*в*) и трехмерные (*г*–*е*) модели ячеистого заполнителя:
а, г — ячейки в форме квадратов, *б, д* — ячейки в форме равносторонних треугольников, *в, е* — ячейки в форме сотов

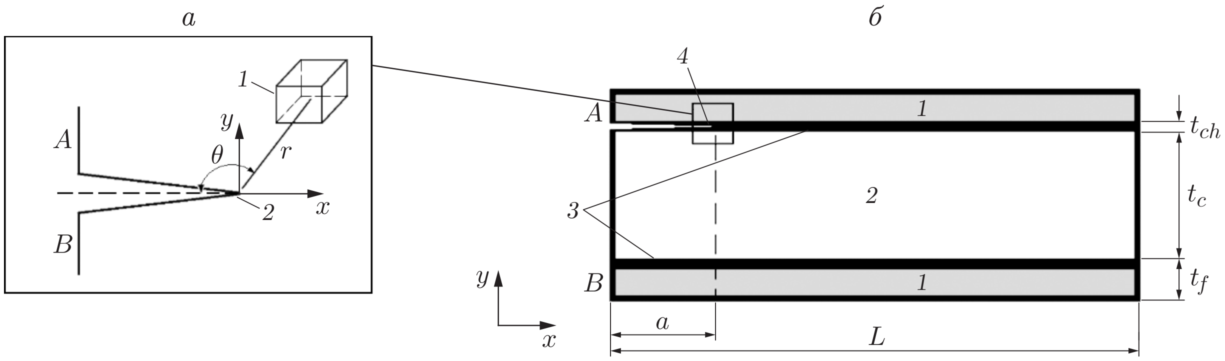


Рис. 2. Разрушение слоистой балки по первой моде:
а — схема трещины (*1* — элемент среды, *2* — вершина трещины), *б* — схема слоистой балки (*1* — несущие слои, *2* — ячеистый заполнитель, *3* — связующие слои, *4* — вершина трещины)

При определении механических свойств ячеистого заполнителя краевые условия для конечно-элементных моделей задавались в соответствии с условиями экспериментов [13]. При определении упругих постоянных, характеризующих поведение заполнителя в направлении 1, узлы, расположенные вдоль кромки, нормальной к направлению 1, полагались неподвижными, а к противоположной кромке прикладывалась растягивающая сила. Аналогичные краевые условия задавались при определении упругих постоянных, характеризующих поведение заполнителя в направлении 2. При определении упругих постоянных, характеризующих поведение заполнителя в направлении 3, одна из лицевых поверхностей полагалась неподвижной, а ко второй прикладывалась сжимающая нагрузка. Такой способ нагружения использовался в экспериментах (см. [7, 14]).

2. Конечно-элементное моделирование слоистой балки. При моделировании разрушения слоистой балки по первой моде предполагалось, что трещина с начальной длиной a располагается в адгезионном (связующем) слое, скрепляющем лицевые пластины с заполнителем (рис. 2). На рис. 2 использованы следующие обозначения: L — длина

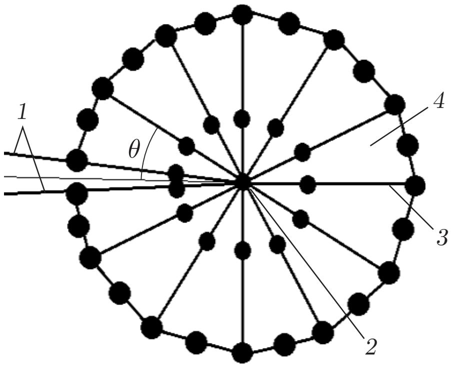
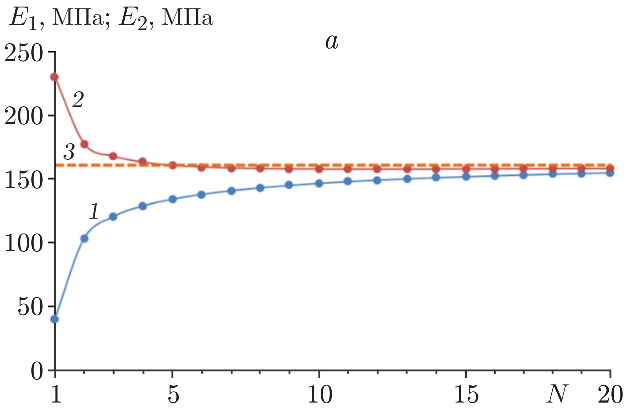


Рис. 3. Шестиузловые плоские конечные элементы в окрестности вершины трещины:
1 — берега трещины, *2* — вершина трещины, *3* — продолжение трещины, *4* — шестиузловой конечный элемент



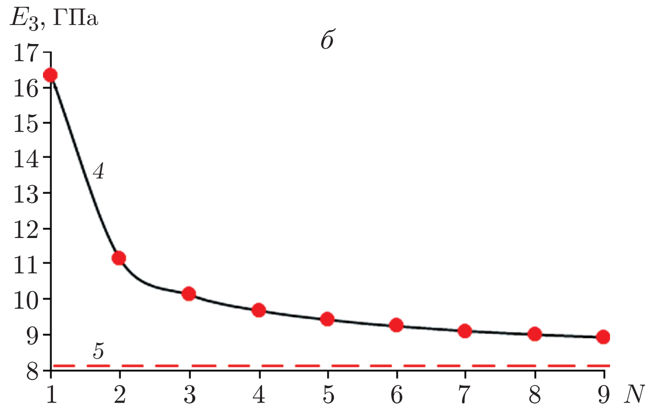


Рис. 4. Зависимости модулей упругости E_1, E_2 (*а*) и E_3 (*б*) ячеистого заполнителя с ячейками в форме сотов от количества ячеек N:
1, 2, 4 — результаты численного моделирования (*1* — модуль упругости E_1, *2* — модуль упругости E_2, *4* — модуль упругости E_3), *3, 5* — аналитическое решение [5]

балки, t_f — толщина несущих слоев, t_c — толщина заполнителя, t_{ch} — толщина связующего слоя. При моделировании сингулярного напряженного состояния в окрестности вершины трещины использовался специальный шестиузловой плоский конечный элемент (рис. 3). В остальных областях двумерной слоистой балки использовались плоские конечные элементы. Моделирование краевых условий, имевших место в эксперименте [10], осуществлялось следующим образом. Смещения в точках сечений A и B в направлении оси x (см. рис. 2) полагались равными нулю. В точках сечения B смещение в направлении оси y (см. рис. 2) также полагалось равным нулю. Ограничения на смещение точек сечения A в направлении оси y не накладывались. Такие условия позволяют рассматривать смещение точек сечения A в направлении оси y как результат действия в этом сечении сосредоточенной силы.

3. Верификация результатов исследования и их обсуждение. Механические характеристики двумерного и трехмерного ячеистых заполнителей, состоящих из ячеек в виде сотов, полученные в результате численного моделирования с использованием конечных элементов и с использованием аналитического решения [5], приведены на рис. 4, 5 и в табл. 1 ($E_{c.w}$, $\nu_{c.w}$ — модуль упругости и коэффициент Пуассона для материала стенки

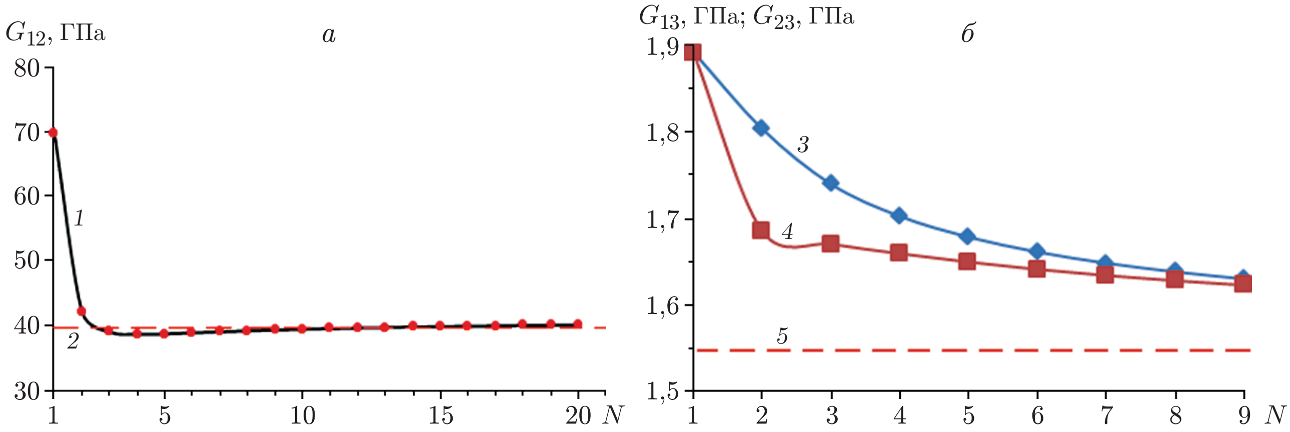


Рис. 5. Зависимости модулей сдвига G_{12} (*а*) и G_{13}, G_{23} (*б*) ячеистого заполнителя с ячейками в форме сотов от количества ячеек N:
1, 3, 4 — результаты численного моделирования (*1* — модуль сдвига G_{12}, *3* — модуль сдвига G_{13}, *4* — модуль сдвига G_{23}), *2, 5* — аналитическое решение [5]

Таблица 1

Механические характеристики алюминиевого ячеистого заполнителя, определенные методом конечных элементов и на основе аналитического решения [5], при $h = 1$ мм, $E_{c.w} = 70$ ГПа, $l = 10$ мм, $\nu_{c.w} = 0{,}3$

Метод решения	E_1	E_2	ν_{12}	G_{12}	E_3	G_{13}	G_{23}
Аналитическое решение [5]	$1{,}61 \cdot 10^8$	$1{,}61 \cdot 10^8$	1,00	$3{,}99 \cdot 10^7$	$8{,}08 \cdot 10^9$	$1{,}55 \cdot 10^9$	$1{,}55 \cdot 10^9$
Метод конечных элементов	$1{,}55 \cdot 10^8$	$1{,}55 \cdot 10^8$	1,06	$3{,}96 \cdot 10^7$	$8{,}80 \cdot 10^9$	$1{,}63 \cdot 10^9$	$1{,}63 \cdot 10^9$
Относительная погрешность, %	3,73	1,86	6,00	1,50	8,18	4,91	4,91

ячейки, l — длина грани ячейки). Толщина стенки ячейки составляла $H = 1$ мм. В работе [5] решение получено методами строительной механики с учетом механических и геометрических свойств одной ячейки. Из полученных результатов следует, что в случае симметричных ячеек в виде сотов при увеличении числа ячеек значения модулей упругости E_1, E_2, E_3, так же как и модулей сдвига G_{12}, G_{13}, G_{23}, приближаются к теоретическим значениям (см. рис. 4, 5). Аналогичные закономерности имеют место для заполнителя, состоящего из ячеек другой формы (в форме треугольников или квадратов). Согласно результатам, полученным с использованием теоретического решения и метода конечных элементов, имеет место равенство модулей упругости E_1 и E_2, а также модулей сдвига G_{13} и G_{23}, что обусловлено симметрией структуры заполнителя в плоскостях $(1,2)$, $(2,3)$, $(1,3)$. Результаты, приведенные на рис. 4, 5 и в табл. 1, получены для заполнителя с числом ячеек в виде сотов 20×20. Согласно полученным данным при большом числе ячеек механические свойства заполнителя определяются на основе аналитического решения с достаточной точностью.

Зависимости механических характеристик ячеистого заполнителя от толщины стенки ячейки для заполнителей, состоящих из ячеек в форме сотов, равносторонних треугольников и квадратов, приведены в табл. 2–4 (H — толщина листа номекса). Для изготовления заполнителя толщиной 3 мм использовались пластины из номекса (HRH-10-F50GR5.5-0.308”-Non-Metallic Honeycomb) толщиной 0,0370; 0,0572; 0,0763 мм. Во всех рассматриваемых случаях с увеличением толщины стенки ячейки модули упругости и сдвига заполнителя увеличиваются. Следует отметить, что в случае ячеек в форме сотов коэффициенты Пуассона ν_{12}, ν_{13}, ν_{23} не зависят от толщины стенки ячейки. При этом

Таблица 2

Механические характеристики заполнителя, состоящего из ячеек в форме сотов

H, мм	E_1, МПа	E_2, МПа	E_3, МПа	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}	G_{12}, МПа	G_{23}, МПа	G_{13}, МПа
0,0370	0,08	0,08	82,72	1	0	0	0,02	20,30	20,30
0,0572	0,31	0,31	127,73	1	0	0	0,80	31,40	31,65
0,0763	0,73	0,73	170,23	1	0	0	0,19	41,93	41,93

Таблица 3

Механические характеристики заполнителя, состоящего из ячеек в форме равносторонних треугольников

H, мм	E_1, МПа	E_2, МПа	E_3, МПа	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}	G_{12}, МПа	G_{23}, МПа	G_{13}, МПа
0,0370	125,80	106,68	246,82	0,36	0	0	87,85	76,07	82,07
0,0572	194,54	165,00	380,37	0,36	0	0	135,86	117,51	126,63
0,0763	259,59	220,22	507,00	0,36	0	0	181,32	156,78	168,81

Таблица 4

Механические характеристики заполнителя, состоящего из ячеек квадратной формы

H, мм	E_1, МПа	E_2, МПа	E_3, МПа	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}	G_{12}, МПа	G_{23}, МПа	G_{13}, МПа
0,0370	108,26	108,26	157,11	0	0	0	15,56	36,36	36,36
0,0572	167,36	167,36	236,48	0	0	0	24,26	56,26	56,26
0,0763	223,25	223,25	309,59	0	0	0	32,72	75,15	75,15

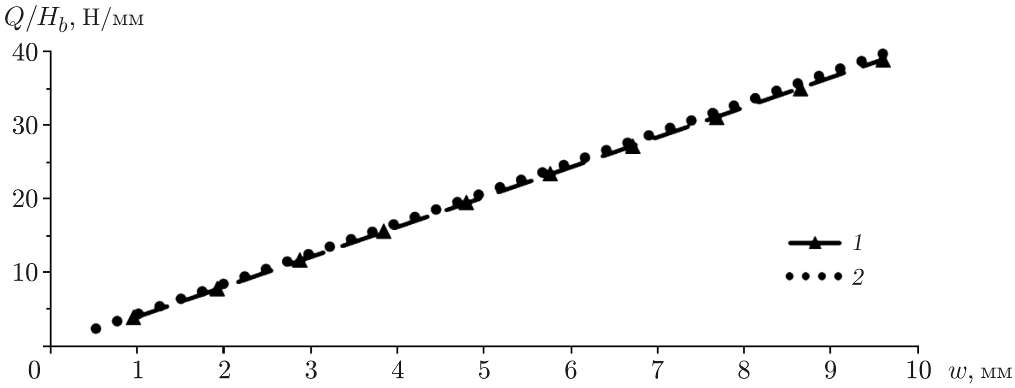


Рис. 6. Зависимость силы реакции Q/H_b от величины смещения w:
1 — расчет с использованием метода конечных элементов, *2* — эксперимент [10]

$\nu_{12} = 1$, $\nu_{23} = \nu_{13} = 0$. Аналогичная закономерность имеет место в случае ячеек в форме равносторонних треугольников, за исключением того, что в этом случае $\nu_{12} = 0{,}36$. Для заполнителя с ячейками в форме квадратов $\nu_{12} = \nu_{23} = \nu_{13} = 0$.

С учетом приведенных выше результатов и с использованием метода конечных элементов определен коэффициент интенсивности напряжений K_{I} для трещины нормального отрыва, расположенной в адгезионном (связующем) слое. Несущие слои трехслойной балки были изготовлены из алюминия, модуль упругости которого равен $70 \cdot 10^9$ Па, коэффициент Пуассона — 0,34. Модуль упругости материала адгезионного слоя FM73 составлял $35 \cdot 10^9$ Па, коэффициент Пуассона — 0,4. Зависимости силы реакции Q в сечении A, отнесенной к толщине балки H_b, от смещения w этого сечения представлены на рис. 6.

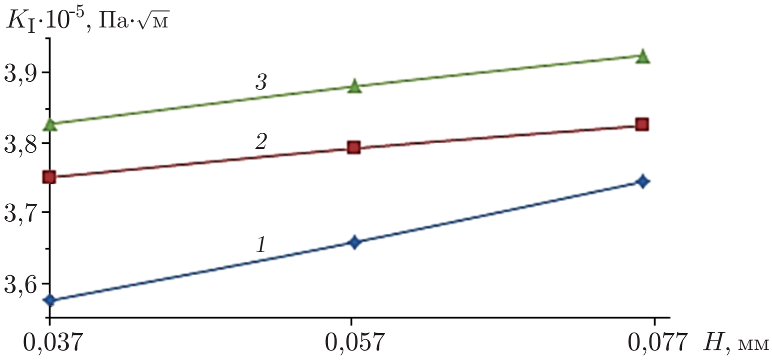


Рис. 7. Зависимость коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины от толщины стенки ячейки H для ячеистых заполнителей с ячейками различной формы:

1 — ячейки в форме сотов, *2* — ячейки в форме квадратов, *3* — ячейки в форме равносторонних треугольников

Результаты, полученные методом конечных элементов, согласуются с экспериментальными данными. Если нормальное напряжение на бесконечности σ_y известно, то коэффициент интенсивности напряжений K_I при $\theta = \pi$ (значение $\theta = \pi$ соответствует точкам, находящимся на продолжении трещины (см. рис. 2, 3)) можно вычислить по формуле

$$K_\mathrm{I} = \sigma_y \sqrt{2\pi r}\,.$$

Поскольку из этой формулы следует, что $K_\mathrm{I} = 0$ при $r = 0$, сначала вычислялись значения K_I в точках, в которых $r \ne 0$ (в точках *1*, *2* (см. рис. 3), для которых $\theta = \pi$), а затем путем экстраполяции вычислялось значение K_I в вершине трещины ($r = 0$).

На рис. 7 приведены значения коэффициента интенсивности K_I при различных значениях толщины стенки ячейки для заполнителей, состоящих из ячеек различной формы (см. табл. 2–4). Зависимости, представленные на рис. 7, получены при следующих значениях геометрических параметров: $a = 80$ мм, $L = 240$ мм, $t_f = 1{,}5$ мм, $t_c = 3$ мм, $t_{ch} = 0{,}3$ мм. Из рис. 7 следует, что коэффициент интенсивности напряжений увеличивается с увеличением толщины стенки ячейки. В случае заполнителя, состоящего из ячеек в форме сотов, значение коэффициента интенсивности напряжений K_I является наименьшим при всех рассмотренных значениях толщины стенки ячейки.

Заключение. Предложена конечно-элементная модель определения механических свойств заполнителя, состоящего из ячеек в форме сотов. Проведено сравнение результатов с известными результатами, полученными на основе аналитических решений. Показано, что при числе ячеек, приближенно равном 20, результаты численных расчетов лучше согласуются с теоретическими данными. Установлено, что с увеличением толщины стенок ячеек увеличиваются модули упругости и сдвига заполнителя. Для заполнителей, состоящих из ячеек в форме сотов и квадратов, с увеличением толщины стенок ячеек коэффициент Пуассона практически не меняется. С использованием предложенной модели можно с большой точностью определить коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины нормального отрыва, расположенной в связующем слое композитной балки. В балке с заполнителем, состоящим из ячеек в форме сотов, коэффициент интенсивности напряжений меньше, чем в балке с заполнителем, состоящим из ячеек в форме равносторонних треугольников или квадратов. С увеличением толщины стенок ячеек коэффициент интенсивности напряжений увеличивается.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Aleksandrov A. Y.** Calculation of three-layered structures / A. Y. Aleksandrov, L. E. Brukker, L. M. Kurshi, A. P. Prusakov. M.: Oborongiz, 1960.
2. **Kobelev V. N.** Calculation of three-layered structures: Reference book / V. N. Kobelev, L. M. Kovarskii, S. I. Timofeev. M.: Mashinostroenie, 1984.
3. **Stepanov N. V., Savel'ev D. I., Petrova O. L., Perova I. E.** Experimental dependence of the stiffness characteristics of a cellular core on its height // Konstr. Komposit. Mater. 2009. N 1. P. 48–53.
4. **Pershin A. M.** Numerical study of static stability of cellular cores made of composite materials // Vestn. Samar. Gos. Aerokosm. Univ. 2014. V. 47. P. 118–123.
5. **Gibson L. J.** Cellular solids: Structures and properties. 2nd ed. / L. J. Gibson, M. F. Ashby. N. Y.: Cambridge Univ. Press, 1997.
6. **Osadchii N. V., Shepel V. T.** Estimation of mechanical properties of a cellular core by the finite element method // Vestn. Rybinsk. Gos. Aviats. Tekhnol. Akad. 2015. V. 1. P. 129–135.
7. **Roy R., Park S. J., Kweon J. H., Choi J. H.** Characterization of Nomex honeycomb core constituent material mechanical properties // Composite Structures. 2014. V. 117. P. 255–266.
8. **Anoshkin A. N., Zuiko V. Y., Tchugaynova A. V., Shustova E. N.** Experimental-theoretical research of mechanical properties of perforated composite sandwich panels // Solid State Phenomena. 2016. V. 243. P. 1–10.
9. **Pugacheva N. B., Zamaraev L. M., Igumnov A. S.** Study the structure and properties of the material of the nodes a honeycomb structure after diffusion aluminizing // Diagnostics, Resour. Mech. Mater. Struct. 2016. N 4. P. 71–88.
10. **Ramantani D. A., Moura M. F. S. F., Campilho R. D. S. G., Marques A. T.** Fracture characterization of sandwich structures interfaces under mode I loading // Composites Sci. Technol. 2010. V. 70. P. 1386–1394.
11. **Lu H., Lardner T. J.** Mechanics of subinterface cracks in layered material // Intern. J. Solids Structures. 1992. V. 29. P. 669–688.
12. **Caner F. C., Bazant Z. P.** Size effect on strength of laminate-foam sandwich plates: finite element analysis with interface fracture // Composites. 2009. V. 40. P. 337–348.
13. **Foo C. C., Chai G. B., Seah L. K.** Mechanical properties of Nomex material and Nomex honeycomb structure // Composite Structures. 2007. V. 80. P. 588–594.
14. **Roy R., Kweon J. H., Choi J. H.** Meso-scale finite element modeling of Nomex honeycomb cores // Adv. Composite Materials. 2014. V. 23. P. 17–29.

Поступила в редакцию 8/II 2019 г.,
после доработки — 6/VI 2019 г.
Принята к публикации 24/VI 2019 г.