

Експериментально-теоретичне дослідження нелінійного напружено-деформованого стану шаруватого керамічного композита

О. В. Горик^а, О. М. Григор'єв^б, Д. Ю. Островой^в, В. Г. Піскунов^г,
В. М. Чередников^а

^а Полтавський державний технічний університет імені Ю. Кондратюка, Полтава, Україна

^б Інститут проблем матеріалознавства НАН України, Київ, Україна

^в Інститут проблем міцності НАН України, Київ, Україна

^г Національний транспортний університет, Київ, Україна

Експериментально досліджено механічний опір зразка шаруватого керамічного композита статичному згину. Розроблено методику розв'язку оберненої задачі на основі експериментальних даних щодо деформування шаруватого керамічного композитної балки-зразка, що дозволило оцінити її механічні характеристики. Побудовано нелінійну залежність напруження–деформація матеріалу зразка як квазіоднорідної структури, отримано аналогічні залежності для кожного з двох типів матеріалів шарів, що утворюють композит. Проведено теоретичне дослідження напружено-деформованого стану шаруватого керамічного композита і проаналізовано отримані результати.

Ключові слова: кераміка, шаруватий керамічний композит, непружна деформація, прогини, напруження.

Вступ. Під час створення, проектування і конструювання композитів різної структури, у тому числі шаруватого, постає задача визначення їх механічних характеристик у залежності від модулів пружності, показників міцності, жорсткості, виду діаграм напруження σ – деформація ε , розташування фаз того чи іншого матеріалу в загальній структурі композита, а також від величини та розподілу залишкових напружень в його об'ємі. Для розв'язання цієї задачі існує багато аналітико-експериментальних методів [1–10 та ін.]. Так, авторами даної роботи запропоновано розв'язок на основі аналізу експериментально визначених фізико-механічних характеристик композита [4–11], наявність яких, у свою чергу, дає можливість теоретично дослідити напружено-деформований стан (НДС) такого матеріалу. Для цього як модельний матеріал використовували зразок шаруватого керамічного композита. Цей вибір зумовлений тим, що серед керамічних композитів матеріали з шаруватою структурою забезпечують можливість найбільш раціонального використання на практиці унікальних фізико-механічних властивостей як монолітної кераміки, так і композитів із керамічною матрицею, що дозволяє підвищити їх витривалість, опір руйнуванню, корозійну і термічну стійкість, зношування та ін. [12–18].

Експериментальні дослідження механічного опору зразка керамічного композита здійснювали за методиками та на устаткуванні, що використовуються для випробовування кераміки [19–20].

Матеріал та методика дослідження. Об'єктом дослідження служив композит у вигляді пакету з дванадцяти об'єднаних керамічних шарів, що чергуються, – більш жорстких (матеріал А) і менш жорстких (матеріал В). Матеріал А – щільний шар TiB_2-V_4C , матеріал В – пористий шар SiC (відносна пористість до 40%). Загальна технологічна схема виготовлення такого композита наступна: приготування порошків – шлікерне лиття тонких плівок – прокатування плівок і їх розрізування на заготовки – складання пакетів із заготовок у вигляді шарів заданої послідовності – гаряче пресування пакетів [15, 16].

Попередні експериментальні дослідження зразків подібного шаруватого композита виявили непружний характер його деформування, який, можливо, зумовлений наявними мікророзтріскуваннями у структурі внаслідок внутрішніх напружень у шарах композита [16]. На даному етапі дослідження аналіз механічної поведінки шаруватого композита здійснювали без урахування початкового НДС, зумовленого можливою наявністю зазначених вище залишкових напружень у структурі матеріалу, і подальшої його зміни під впливом механічного навантажування.

Враховуючи, що експериментально не визначались чисельні значення фізико-механічних характеристик кожного шару зазначеного композита, для подальших розрахунків як перше наближення прийнято наступні оцінки модулів пружності (E) шарів: $E_A = 550$ ГПа (матеріал А) і $E_B = 50$ ГПа (матеріал В), що цілком припустимо, виходячи із задач цього дослідження.

Зразок для механічного випробування у вигляді прямокутної балки (рис. 1,а) отримували шляхом розпилювання пакету на заготовки з наступним їх шліфуванням за допомогою алмазного інструмента таким чином, щоб розміщення шарів уздовж висоти балки було якомога симетричним відносно її серединної площини (рис. 1,б).

Зразок заданого розміру випробували в умовах кімнатної температури за чотириточковою схемою згину (чистий згин; рис. 1,а) зі швидкістю деформування (переміщення траверси машини для випробувань) 0,005 мм/хв.

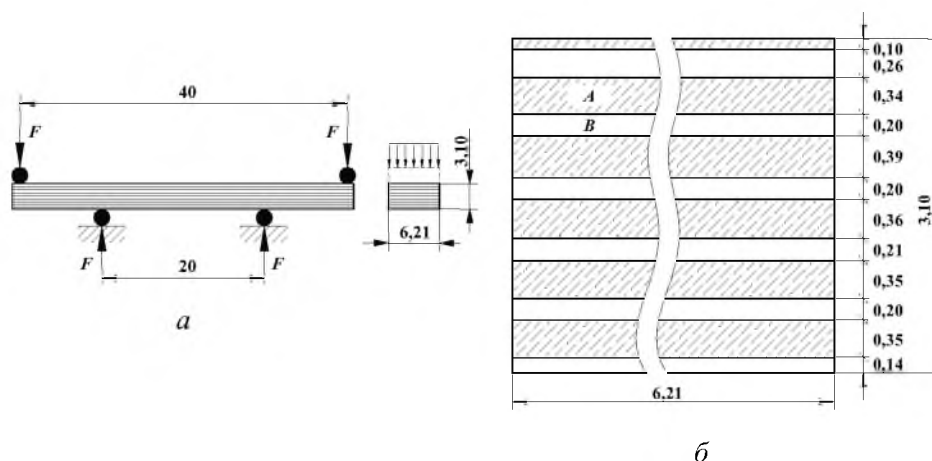


Рис. 1. Схема випробування (а) та структура поперечного перерізу зразка (б) (розміри у міліметрах).

Результати та їх аналіз. *Лінійний розрахунок.* У результаті випробування зразка шаруватого керамічного композита отримали експериментальну залежність навантаження F – прогин w для його серединного перерізу, яка подана на рис. 2 у вигляді точної комп'ютерної інтерпретації. Ця залежність носить нелінійний характер із місцями стрімкої релаксації навантаження на певних його рівнях.

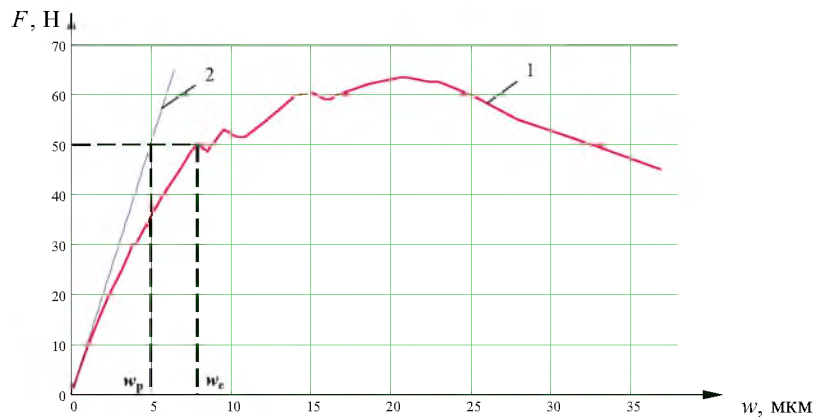


Рис. 2. Експериментальна (1) та отримана за початковими модулями пружності (2) залежність навантаження F від прогину w зразка.

Аналіз діаграми показав, що наведені вище модулі пружності E_A і E_B матеріалів шарів є початковими і на їх основі неможливо отримати аналітичні результати, адекватні експериментальним даним. Водночас для найбільш повного теоретичного дослідження процесу деформування шаруватого композита необхідно мати залежності $\sigma - \varepsilon$ для кожного з цих матеріалів. Це дозволило б оцінити його НДС за відомою методикою розрахунку композитних брусів [10, 11].

Попередньо розглянемо розрахунок композитного зразка на основі заданих (початкових) модулів пружності, тобто здійснюємо розрахунок за лінійним наближенням. Його результати представлено на рис. 2, де на експериментальну діаграму $F - w$ накладено аналогічну залежність, отриману безпосереднім розрахунком багат шарової балки за початковими модулями. На рівні навантаження $F = 50$ Н, що відповідає першому суттєвому стрибку на діаграмі (вважаємо, що стрибок характеризує початкові зміни структури композита), прогин w за лінійним розрахунком буде дорівнювати $w_p = 4,941$ мкм при експериментальному значенні $w_e = 7,850$ мкм, тобто відношення $(w_e / w_p) = 1,588$. Розрахункове напруження у верхньому шарі (рис. 1,б) при цьому складає $\sigma_p = 85,3$ МПа. Оскільки з технічних причин експериментальні значення деформацій і відповідних напружень при випробуваннях не визначались, виникає задача їх теоретичної оцінки на основі нелінійного характеру деформування зразка.

Побудова нелінійної залежності $\sigma - \varepsilon$ квазіоднорідного зразка. На першому етапі теоретичних досліджень ставиться задача одержання узагальненої залежності $\sigma - \varepsilon$ композитного зразка як деякого квазіоднорідного. На основі цієї залежності отримуємо узагальнені значення модуля пружності.

Відповідно до відомої формули опору матеріалів [11] для визначення прогину посередині прольоту відносно опор розглянутої балки-зразка знаходимо узагальнений модуль пружності:

$$w_{\max} = \frac{Fl^3}{128E_{уз}I} \Rightarrow E_{уз} = \frac{Fl^3}{128w_{\max}I}, \quad (1)$$

де l – довжина зразка, $l = 0,04$ м; $l/2$ – відстань між опорами, $l/2 = 0,02$ м. Якщо прийняти за w_{\max} експериментальні прогини w_e , що відповідають певним рівням навантаження F , і вважати, що переріз є однорідним із моментом інерції $I = bh^3/12$, то одержимо остаточну формулу для узагальненого модуля пружності (січного модуля):

$$E_{уз} = \frac{3Fl^3}{32w_ebh^3}, \quad (2)$$

де b – ширина зразка, $b = 6,21 \cdot 10^{-3}$ м; h – висота зразка, $h = 3,1 \cdot 10^{-3}$ м.

На підставі цієї залежності одержуємо значення модулів, наведених у табл. 1. Визначимо на кожному кроці навантаження згинальний момент і найбільші напруження $\sigma_{\max} = \frac{M}{W} = \frac{3Fl}{2bh^2}$ з урахуванням відповідних узагальнених модулів пружності. У результаті отримаємо деформації $\varepsilon_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{E_{уз}}$. Зазначені дані також подано в табл. 1, а діаграма $\sigma - \varepsilon$, що

відповідає частині залежності $F - w$ до рівня навантаження $F = 50$ Н, – на рис. 3. На цьому рисунку також наведено апроксимуюче рівняння діаграми.

Т а б л и ц я 1

Попередні результати розрахунку за експериментальною залежністю $F - w$

F , Н	w_e , мкм	$\frac{E_{уз}}{10^5}$, МПа	σ_{\max} , МПа	$\frac{\varepsilon_{\max}}{10^{-5}}$, м/м	D , Н·м ²	$\frac{E_A}{10^5}$, МПа	$\frac{E_B}{10^4}$, МПа	$\frac{\varepsilon_A}{10^{-5}}$, м/м	$\frac{\varepsilon_B}{10^{-5}}$, м/м	σ_A , МПа	σ_B , МПа
0	0	3,55	0	0	5,060	5,50	5,00	0	0	0	0
5	0,52	3,12	5,03	1,61	4,808	5,23	4,75	1,63	1,59	8,53	0,76
10	1,10	2,95	10,05	3,41	4,546	4,94	4,49	3,45	3,37	17,10	1,51
15	1,70	2,86	15,08	5,27	4,412	4,80	4,36	5,33	5,20	25,60	2,27
20	2,40	2,70	20,11	7,44	4,117	4,53	4,12	7,53	7,35	34,10	3,03
25	3,15	2,57	25,13	9,77	3,968	4,31	3,92	9,88	9,65	42,60	3,78
30	4,00	2,43	30,16	12,40	3,750	4,08	3,71	12,10	12,30	51,20	4,54
35	4,90	2,32	35,19	15,20	3,571	3,88	3,53	15,40	15,00	59,70	5,30
40	5,75	2,26	40,22	17,80	3,478	3,78	3,44	18,00	17,60	68,20	6,05
45	6,80	2,15	45,24	21,10	3,309	3,60	3,27	21,30	20,80	76,70	6,81
50	7,85	2,07	50,27	24,30	3,185	3,46	3,15	24,60	24,00	85,30	7,56

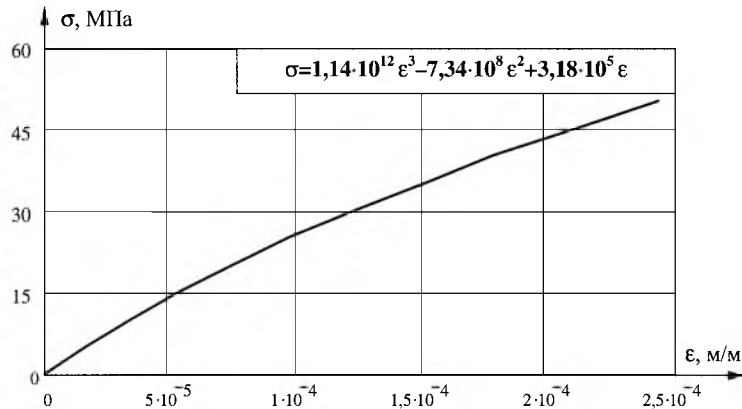


Рис. 3. Узагальнена залежність $\sigma - \epsilon$ для випадку, коли балка-зразок вважається квазіоднорідною.

Отримані значення E_{y_3} не дають можливості побудувати реальні епюри розподілу напружень за висотою зразка з урахуванням модулів пружності матеріалів окремих шарів.

Залежності $\sigma - \epsilon$ матеріалів шарів. У зв'язку з викладеним задача другого етапу – одержання залежності $\sigma - \epsilon$ окремо для кожного з матеріалів шарів. Цей процес, у свою чергу, можна розбити на два підетапи. На першому вводимо ряд припущень відносно поведінки зразка в процесі навантаження (зміна фізико-механічних і геометричних характеристик, форма розподілу поздовжніх деформацій за висотою перерізу та ін.), що дозволяє у першому наближенні побудувати діаграми $\sigma - \epsilon$ для кожного з матеріалів шарів. На другому підетапі за отриманими залежностями $\sigma - \epsilon$ визначаємо НДС шаруватого зразка для послідовних кроків навантаження. Далі за допомогою кількох ітерацій виконуємо коригування початкових діаграм відповідно до експериментальних даних і остаточно визначаємо НДС.

Для побудови залежності $\sigma - \epsilon$ матеріалу шарів на першому підетапі приймемо наступні припущення.

1. Співвідношення $E_B / E_A = m$ зберігається в процесі навантаження на кожному його кроці до найбільшого прийнятого дослідного значення $F = 50$ Н.

2. Відносні поздовжні деформації ϵ зразка мають лінійний розподіл за його висотою, тобто виконується гіпотеза плоских перерізів (це зумовлено тим, що на ділянці між опорами балка знаходиться в стані чистого згину), а товщини шарів і загальна висота зразка не змінюються.

3. Вважаємо (неостаточно), що на кожному окремому кроці навантаження модулі пружності всіх шарів не залежать від поздовжніх деформацій ϵ , тобто модулі пружності кожного з матеріалів A і B не змінюються за висотою перерізу.

4. Модулі пружності матеріалів шарів при стиску і розтязі однакові.

Перейдемо до реальної неоднорідної шаруватої системи, для якої маємо наступні вирази для координати центра жорсткості C та жорсткості при згині [11] (рис. 4):

$$z_C = \frac{\sum_{k=1}^{12} E_k (z_{0B_k}^2 - z_{0H_k}^2)}{2 \sum_{k=1}^{12} E_k (z_{0B_k} - z_{0H_k})}, \quad D = \frac{b}{3} \sum_{k=1}^{12} E_k (z_{B_k}^3 - z_{H_k}^3), \quad (3)$$

де k – номер шару, що відраховується знизу.

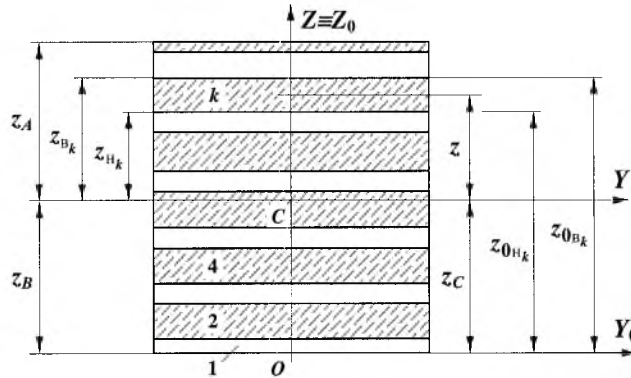


Рис. 4. Розрахункова схема перерізу зразка.

За допомогою значень модулів пружності матеріалів E_A і E_B з урахуванням третього припущення другу формулу (3) перепишемо у такому вигляді:

$$D = E_A \sum_{k=1}^6 \frac{b}{3} (z_{B_{2k}}^3 - z_{H_{2k}}^3) + E_B \sum_{k=1}^6 \frac{b}{3} (z_{B_{2k-1}}^3 - z_{H_{2k-1}}^3). \quad (4)$$

Вирази під знаками суми є моментами інерції шарів із матеріалів А і В відносно центра жорсткості C поперечного перерізу зразка [8]:

$$I_A = \frac{b}{3} \sum_{k=1}^6 (z_{B_{2k}}^3 - z_{H_{2k}}^3); \quad I_B = \frac{b}{3} \sum_{k=1}^6 (z_{B_{2k-1}}^3 - z_{H_{2k-1}}^3). \quad (5)$$

З урахуванням першого припущення запишемо кінцевий вираз жорсткості за будь-якого рівня навантаження:

$$D = E_A (I_A + mI_B). \quad (6)$$

Найбільші прогини зразка можна обчислити за формулою

$$w_{\max} = \frac{Fl^3}{128D}. \quad (7)$$

Якщо за найбільші прогини прийняти експериментальні значення w_e , то з формули (7) можна визначити жорсткості для кожного кроку навантаження:

$$D = \frac{Fl^3}{128w_e}. \quad (8)$$

Жорсткості, що розраховано за цією формулою, подано у табл. 1.

Прирівняємо жорсткості за формулами (6) і (8), в результаті одержимо залежність для модуля пружності матеріалу А:

$$E_A = \frac{Fl^3}{128(I_A + mI_B)w_e}. \quad (9)$$

Модуль пружності матеріалу В визначаємо з формули $E_B = mE_A$. Результати визначення модулів пружності (січних модулів) наведено у табл. 1.

Щоб отримати поздовжні деформації у середньому перерізі бруса, скористаємося формулою опору матеріалів:

$$\varepsilon\left(\frac{l}{2}, z\right) = \frac{Fl}{4D} z, \quad (10)$$

де z – координата точки, що розглядається, відносно центра жорсткості перерізу. Зазначені вище припущення дозволяють для побудови діаграми $\sigma - \varepsilon$ приймати довільну координату z перерізу. Для шарів із матеріалу А прийемо відносно центра жорсткості координату $z_A = 1,569 \cdot 10^{-3}$ м (крайня верхня точка перерізу), а для шарів із матеріалу В – координату $z_B = -1,531 \cdot 10^{-3}$ м (крайня нижня точка перерізу). Абсолютні значення деформацій $\varepsilon_A, \varepsilon_B$ у цих точках подано у табл. 1.

Максимальні нормальні напруження σ_A і σ_B , що виникають у крайніх верхньому і нижньому шарах відповідно, знаходимо за законом Гука $\sigma = E\varepsilon$ з урахуванням визначених модулів пружності та деформацій. Отримані значення напружень також наведено у табл. 1.

Щоб побудувати діаграми $\sigma - \varepsilon$ для досліджуваних матеріалів, була виконана апроксимація розрахункових даних поліномами третього степеня:

$$\text{матеріал А: } \sigma_A = 1,83 \cdot 10^{12} \varepsilon^3 - 1,21 \cdot 10^9 \varepsilon^2 + 5,35 \cdot 10^5 \varepsilon \text{ (МПа);} \quad (11)$$

$$\text{матеріал В: } \sigma_B = 1,74 \cdot 10^{11} \varepsilon - 1,13 \cdot 10^8 \varepsilon^2 + 4,87 \cdot 10^4 \varepsilon \text{ (МПа).} \quad (12)$$

Ці залежності покладемо в основу підетапу визначення НДС.

Напружено-деформований стан композитного зразка. Процедура визначення НДС (другий підетап), що враховує нелінійні властивості матеріалу шарів (див. формули (11) і (12)), наступна:

1. За початковими модулями пружності обчислюємо жорсткість D згідно з формулою (3).

2. Приймаємо фіксоване значення діючого на даному кроці навантаження (для першого кроку – 5 Н, загалом воно змінюється від 5 до 50 Н із кроком 5 Н), і за формулою (10) визначаємо поздовжні деформації.

3. За формулами (11) і (12) знаходимо напруження у шарах із матеріалів А і В.

4. Визначаємо модулі пружності шарів і перераховуємо їх для кожного шару з наступної умови: модуль пружності шару є середнім між модулями пружності для верхньої $E_B = \sigma_B / \varepsilon_B$ і нижньої $E_H = \sigma_H / \varepsilon_H$ його точок, тобто $E = (E_B + E_H) / 2$.

5. За новими модулями пружності перераховуємо згідно з формулою (3) жорсткість D і повторюємо пп. 2–5 доти, доки значення модулів пружності на даному кроці навантаження не стабілізуються.

6. Збільшуємо величину діючого навантаження на 5 Н і повторюємо пп. 1–6, але за початкові модулі пружності приймаємо кінцеві (остаточно визначені) модулі пружності з попереднього кроку навантаження, продовжуючи цей процес доки значення діючого навантаження не буде становити 50 Н.

Результати розрахунку за залежностями $\sigma - \varepsilon$ подано у табл. 2. Там же представлено прогини, визначені за формулою (7). Рис. 5 ілюструє розрахункову нелінійну діаграму $F - w$ у порівнянні з експериментальною та з отриманою лінійним розрахунком за початковими модулями.

Т а б л и ц я 2

Результати розрахунку за залежностями $\sigma - \varepsilon$ на першому етапі

F , Н	w , мкм	σ_A , МПа	σ_B , МПа	D , Н·м ²
0	0	0	0	5,060
5	0,52	8,44	0,75	4,796
10	1,07	16,70	1,48	4,668
15	1,65	24,80	2,20	4,538
20	2,27	32,60	2,90	4,408
25	2,92	40,30	3,58	4,277
30	3,62	47,80	4,24	4,147
35	4,36	55,20	4,90	4,017
40	5,14	62,50	5,54	3,891
45	5,97	69,80	6,19	3,770
50	6,84	77,20	6,84	3,656

На кінцевому кроці навантаження розбіжність розрахункових прогинів з експериментальними становить близько 13%. Для зменшення цієї розбіжності виконано корегування коефіцієнтів поліномів (11) і (12) шляхом їх варіювання таким чином, щоб на кожному кроці навантаження витримувалося співвідношення модулів пружності шарів $E_B / E_A = m$, а коефіцієнт

жорсткості D наближався до значення, обчисленого за формулою (8). При цьому для кожного кроку навантаження й окремого варіювання коефіцієнтів зазначених поліномів виконувався розрахунок, що відповідає пп. 1–5 другого підетапу визначення НДС. У результаті декількох ітерацій отримано наступні остаточні залежності $\sigma - \varepsilon$:

$$\text{матеріал А: } \sigma_A = 1,79 \cdot 10^{12} \varepsilon^3 - 1,28 \cdot 10^9 \varepsilon^2 + 5,13 \cdot 10^5 \varepsilon \text{ (МПа);} \quad (13)$$

$$\text{матеріал В: } \sigma_B = 1,84 \cdot 10^{11} \varepsilon^3 - 1,31 \cdot 10^8 \varepsilon^2 + 4,68 \cdot 10^4 \varepsilon \text{ (МПа).} \quad (14)$$

Результати розрахунку за цими залежностями наведено у табл. 3. Розрахункові значення прогинів w практично відповідають експериментальним (табл. 1), що підтверджує достовірність інших наведених результатів (напруження, жорсткості).

Т а б л и ц я 3

Результати розрахунку за скоригованими залежностями $\sigma - \varepsilon$

F , Н	w , мкм	σ_A , МПа	σ_B , МПа	D , Н·м ²
0	0	0	0	5,060
5	0,55	8,42	0,75	4,579
10	1,13	16,60	1,47	4,435
15	1,75	24,60	2,16	4,287
20	2,42	32,30	2,82	4,136
25	3,14	39,80	3,45	3,982
30	3,92	47,10	4,05	3,825
35	4,77	54,20	4,62	3,667
40	5,70	61,10	5,16	3,509
45	6,70	68,00	5,68	3,356
50	7,79	75,10	6,21	3,211

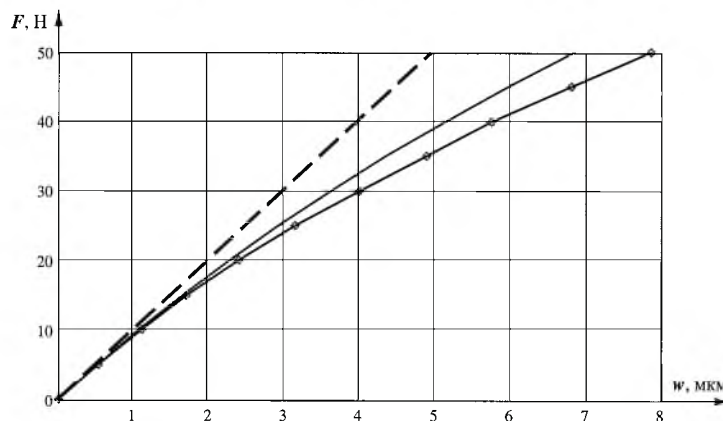


Рис. 5. Експериментальна (точки), нелінійна (суцільна лінія) і лінійна (штрихова лінія) розрахункові залежності $F - w$.

На рис. 6 представлено залежність $\sigma - \varepsilon$ для випадку, коли зразок вважається квазіоднорідним, і аналогічні залежності, отримані за формулами (13) і (14). Як бачимо, діаграма шаруватого зразка як квазіоднорідного матеріалу розміщується між діаграмами матеріалів шарів А і В.

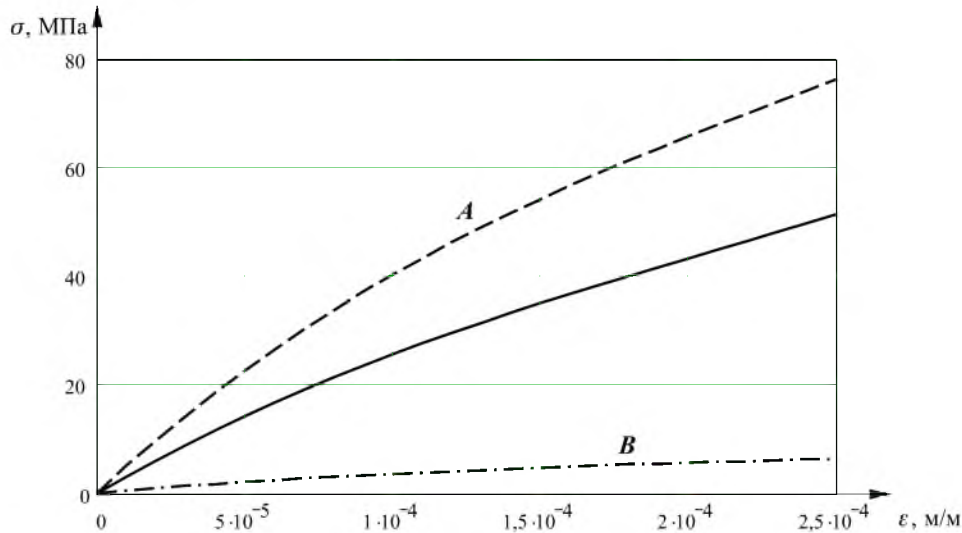


Рис. 6. Залежності $\sigma - \varepsilon$ для матеріалів шарів А і В та узагальнена діаграма деформування балки-зразка як квазіоднорідного матеріалу.

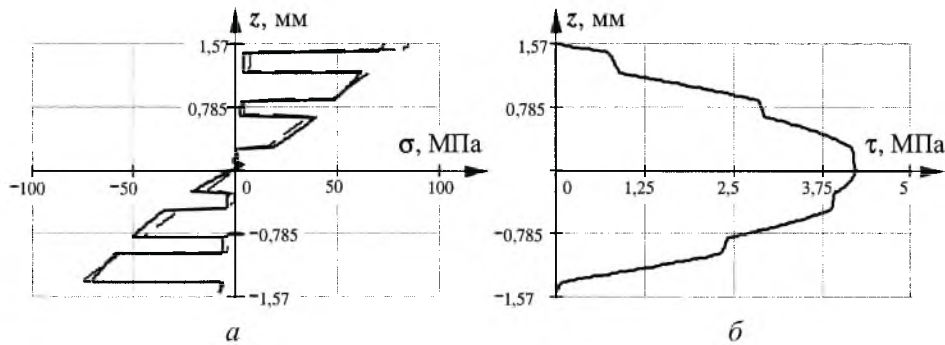


Рис. 7. Розподіл за висотою зразка нормальних напружень в середньому перерізі (а) і дотичних напружень на консольних ділянках (б).

Розподіл за висотою зразка нормальних і дотичних напружень за виразами (13) і (14) ілюструє рис. 7. При цьому розподіл нормальних напружень (рис. 7,а) подано у двох варіантах: нелінійний характер (суцільні лінії) – відповідно до формул (13) і (14); лінійний (пунктирні лінії) – відповідно до початкових модулів пружності. Спостерігаються стрибки напружень, що відповідають межі контакту шарів. Графіки наведено для випадку найбільшого дослідного навантаження (50 Н). При цьому максимальні нормальні напруження за нелінійним розрахунком дорівнюють 75,1 МПа, в той час як за лінійним розрахунком вони вищі – 85,3 МПа. Максимальні дотичні напруження (рис. 7,б) мають місце на рівні нейтральної осі і дорівнюють 4,2 МПа. На графіку дотичних напружень їхнім великим перепадам відповідають шари з матеріалу А, малим – із матеріалу В.

Висновки. Таким чином, на базі теорії неоднорідних шаруватих систем розроблено методику розв'язку оберненої задачі на основі експериментальних даних щодо деформування шаруватої керамічної композитної балки-зразка, що дозволило оцінити її механічні характеристики: побудувати узагальнену нелінійну діаграму $\sigma - \varepsilon$ для випадку, коли матеріал зразка вважається квазіоднорідним, а також діаграми $\sigma - \varepsilon$ для кожного з двох матеріалів його шарів. На основі отриманих діаграм вдалося теоретичним шляхом дослідити напружено-деформований стан композита й оцінити уточнення, які вносить нелінійний підхід до розрахунку, зокрема рівень зменшення найбільших нормальних напружень у порівнянні з їхніми значеннями за лінійним розрахунком.

Резюме

Експериментально досліджено механічне опірність зразка шаруватого керамічного композита статичному вигибу. Розроблена методика рішення оберненої задачі на основі експериментальних даних о деформуванні шаруватого керамічного композитного балки-зразка, що дозволило оцінити її механічні характеристики. Побудована нелінійна залежність напруження–деформація матеріала зразка як квазіоднорідної структури, отримані аналогічні залежності для кожного з двох типів матеріалів шарів, що утворюють композит. Проведено теоретичне дослідження напружено-деформованого стану шаруватого керамічного композита і проаналізовані отримані результати.

1. *Whitney J. M., Browning C. E. and Mair A.* Analysis of the flexure test for laminated composite materials // *Composite Materials: Testing and Design*, ASTM STP 546. – 1974. – P. 30 – 45.
2. *Jones R. M.* *Mechanics of Composite Materials.* – Washington: Scripta Book, 1975.
3. *Johnson A. F. and Sims G. D.* Mechanical properties and design of sandwich materials // *Composites.* – 1986. – **17**, No. 4. – P. 321 – 328.
4. *Болотин В. В., Новичков Ю. Н.* Механика многослойных конструкций. – М.: Машиностроение, 1980. – 376 с.
5. *Механика композиционных материалов и конструкций.* Т. 1. Механика материалов / А. Н. Гузь, Л. П. Хорошун, Г. А. Ванин и др. – Киев: Наук. думка, 1982. – 368 с.
6. *Пискунов В. Г., Веригин В. Е.* Линейные и нелинейные задачи расчета слоистых конструкций. – Киев: Вища шк., 1987. – 200 с.
7. *Рассказов А. О., Соколовская И. И., Шульга Н. А.* Теория и расчет многослойных ортотропных оболочек и пластин. – Киев: Вища шк., 1987. – 200 с.
8. *Васильев В. В.* Механика конструкций из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.

9. Горик О. В., Пискунов В. Г., Чередников В. М. Теоретико-экспериментальные исследования изгиба тришаровых брусьев // Пробл. прочности. – 2000. – № 3. – С. 76 – 85.
10. Горик А. В., Пискунов В. Г., Чередников В. Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния композитных брусьев при изгибе в двух плоскостях. Сообщ. 1. Выводы соотношений неклассической модели // Там же. – 1999. – № 2. – С. 115 – 125.
11. Опір матеріалів з основами теорії пружності й пластичності: У 2 ч., 5 кн. – Ч. I, кн. 2. Опір бруса: Підручник / В. Г. Пискунов, В. С. Сіпетов, В. Д. Шевченко, Ю. М. Федоренко. – Київ: Вища шк., 1995. – 384 с.
12. Harmer M. P., Chan H. M. and Miller G. A. Unique opportunities for microstructural engineering with duplex and laminar ceramic composites // J. Amer. Ceram. Soc. – 1992. – **75**, No. 7. – P. 1715 – 1728.
13. Chan H. M. Layered ceramics: processing and mechanical behavior // Annual Rev. Mater. Sci. – 1997. – **27**. – P. 249 – 282.
14. Shigegaki Y., Brito M. E., Hirao K., et al. Fracture behavior of a multilayered silicon nitride // J. Ceram. Soc. Jpn. – 1997. – **105**, No. 9. – P. 824 – 826.
15. Grigoriev O. N., Karoteev A. V., Klimenko A. V., and Prilutsky E. V. Development and properties of SiC–TiB₂ multilayered composites // Proc. 6th Conf. and Exhib. Eur. Ceram. Soc., 20–24 June 1999, Brighton, UK (Chameleon Press, 1999): Abstr. – P. 165.
16. Григорьев О. Н., Каротеев А. В., Клименко А. В. и др. Получение и свойства многослойной керамики системы SiC–TiB₂ // Огнеупоры и техн. керамика. – 2000. – № 11. – С. 20 – 25.
17. Lii D.-F., Huang J.-L., and Chou F.-C. Mechanical behaviors of Si₃N₄–SiC/Si₃N₄–Si₃N₄ layered composites // J. Ceram. Soc. Jpn. – 1996. – **104**, No. 8. – P. 699 – 704.
18. Yaroshenko V. and Katashinsky V. Processing and properties of silicon-nitride based laminated composites // Canad. Ceramics Quarterly – J. Canad. Ceram. Soc. – 1997. – **66**, No. 4. – P. 292 – 296.
19. Гогоци Г. А., Завада В. П. Аттестация современной керамики по механическим свойствам // Пробл. прочности. – 1994. – № 1. – С. 68 – 75.
20. Дроздов А. В., Кутняк В. В., Неговский А. Н. Экспериментальное оборудование для оценки характеристик прочности керамических материалов // Пробл. прочности. – 1999. – № 5. – С. 117 – 126.

Поступила 26. 12. 2000