

УДК 539.3

ОЦІНЮВАННЯ ДОПУСТИМИХ РОЗМІРІВ НЕПРОВАРІВ СТІЛЬНИКОВИХ ТОНКОСТІННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

М. Г. СТАЦУК

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Встановлено напружено-деформований стан біля технологічних тріщиноподібних непроварів у стільниковому елементі. Отримано формулу розрахунку коефіцієнтів інтенсивності напружень для тріщиноподібного непровару та знайдено його критичну довжину. Виявлено, що непровари довжиною до половини товщини стінки елемента не впливають на міцність стільникових виробів.

Ключові слова: поліетиленові стільникові труби, непровар, тріщина, коефіцієнт інтенсивності напружень, метод скінченних елементів, напружено-деформований стан, допустима довжина непровару.

Під час формування поліетиленової трубної конструкції з пустотілою (стільниковою) будовою стінки за допомогою екструзійного зварювання виникають непровари. Вони мають тріщиноподібний вигляд та є наслідком зварювання двох поліетиленових трубок у стінці стільникового виробу [1, 2]. Однак розраховували міцність таких труб [3] без врахування тріщиноподібних концентраторів напружень, які можуть призвести до передчасного руйнування конструкції. Їх можна вважати аналогами тріщин. У зв'язку із цим актуальними є дослідження допустимих розмірів таких дефектів з позицій механіки руйнування. А отже, щоб оцінити міцність стільникової конструкції з технологічними дефектами-непроварами, скористаємось лінійною механікою руйнування [4]. Для цього визначимо коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН) для дефектів-непроварів у стільниковому елементі (рис. 1), використовуючи метод скінченних елементів (МСЕ). КІН знаходимо числово. Основні ідеї застосування МСЕ для встановлення КІН висвітлені в літературі [5]. Щоб підтвердити достовірність числових результатів потрібно розраховувати КІН K_I для центральної тріщини у пластині й смузі та порівняти одержані значення з розрахунками за відомими аналітичними формулами.



Рис. 1. Типовий тріщиноподібний дефект-непровар у стінці стільника.

Fig. 1. Typical crack-like faulty fusion in the cell wall.

Програмно-аналітичне визначення КІН. МСЕ все ширше застосовують для розв'язання різноманітних задач теорії пружності та пластичності. Тому скористаємось ним для оцінки міцності стільникового елемента з технологічними дефектами-непроварами. При цьому першочергове завдання – розбиття скінченними

елементами області біля вершини тріщиноподібного дефекту-непровару. Для цього спочатку необхідно на тестовому прикладі МСЕ розрахувати K_I для центральної тріщини у пластині та смузі.

Вибір сітки розбиття скінченними елементами в околі вершини тріщини. Для плоскої задачі теорії пружності компоненти тензора напружень на продовженні тріщини поблизу її краю можна подати у вигляді [4]

$$\sigma_{22} = K_I / \sqrt{2\pi r} + O(r^0), \quad \sigma_{12} = K_{II} / \sqrt{2\pi r} + O(r^0), \quad (1)$$

де K_I та K_{II} – КІН; $O(r^0) = O(1)$ – обмежена величина при $r \rightarrow 0$; r – відстань від вершини тріщини до точки, в якій визначаємо компоненти тензора напружень σ_{ij} (рис. 2). КІН розраховуємо за формулою [6]

$$K_I - iK_{II} = \lim_{x \rightarrow l+0} \sqrt{2\pi(x-l)} [\sigma_{22}(x, 0) - i\sigma_{12}(x, 0)]. \quad (2)$$

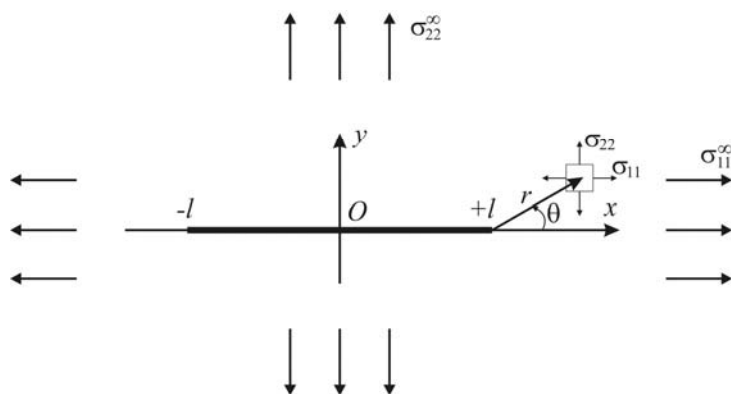


Рис. 2. Схема двовісного розтягу пластини з тріщиною.

Fig. 2. Scheme of biaxial tension of a plate with a crack.

Вважаємо, що права вершина тріщини знаходиться в точці $x = l$ на осі x , яка направлена уздовж дотичної до контура тріщини в її вершині.

Кутові залежності напружень σ_{ij} визначають рівності [4]

$$\begin{aligned} \sigma_{22} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + O(r^0), \\ \sigma_{11} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) - \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + O(r^0), \quad (3) \\ \sigma_{12} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + O(r^0). \end{aligned}$$

Зауважимо, що розподіл напружень (1) та (3) справедливий в околі вершини тріщини. Проте числово, використовуючи МСЕ, можна встановити напружено-деформований стан (НДС) тіла тільки у певних точках (вузлах), що залежать від вибору та розмірів сітки розбиття скінченними елементами. Тому, щоб використати формулу (2) для коректного визначення КІН K_I та K_{II} , необхідно оцінити лінійні розміри сітки розбиття скінченними елементами в околі вершини тріщини. Для цього потрібно визначити розмір зони біля вершини тріщини, для якої справедливі формули (3).

Розглянемо нескінченну пластину, послаблену наскрізною тріщиною довжини $2l$ (рис. 2). Розподіл напружень біля її вершини подамо у вигляді розв'язку Вестергаарда [6]. Приймаємо, що безмежна пластинка знаходиться під дією двовісного розтягу на нескінченності зусиллями інтенсивності $\sigma_{11}^{\infty} = \sigma_{22}^{\infty} = \sigma$. Відпо-

відно компоненти тензора напружень для плоскої задачі біля вершини тріщини можна подати у вигляді [6]

$$\sigma_{22} = \operatorname{Re}\Phi(z) + y \operatorname{Im}\Phi'(z), \quad \sigma_{11} = \operatorname{Re}\Phi(z) - y \operatorname{Im}\Phi'(z), \quad \sigma_{22} = -y \operatorname{Re}\Phi'(z), \quad (4)$$

де $z = x + iy$, $i^2 = -1$, а комплексний потенціал $\Phi(z) = \sigma/\sqrt{1-l^2/z^2}$.

На продовженні тріщини напруження

$$\sigma_{22} = (l+r)\sigma/\sqrt{(l+r)^2-l^2}. \quad (5)$$

У першому наближенні, якщо радіус r близький до нуля, то

$$\sigma_{22} = \sigma\sqrt{l/2r} = K_1/\sqrt{2\pi r}. \quad (6)$$

Наведені (табл. 1) відносні напруження σ_{22}/σ на продовженні тріщини за нормального відриву, які розраховували за формулою (5) та наближеною формулою (6). При цьому визначали їх відносні похибки.

Таблиця 1. Компоненти відносного напруження σ_{22}/σ на продовженні тріщини

r	0,001l	0,01l	0,1l	l
$\sigma_{22}^{\text{ac}}/\sigma$ за ф-ою (5)	22,377	7,124	2,40	1,155
$\sigma_{22}^{\text{ap}}/\sigma$ за ф-ою (6)	22,361	7,071	2,236	0,707
$(\sigma_{22}^{\text{ac}} - \sigma_{22}^{\text{ap}} /\sigma_{22}^{\text{ac}}) \times 100\%$	0,075%	0,743%	6,85%	38,72%

З наведених результатів розрахунку напружень σ_{22} в околі радіуса $r = 0,01l$ біля вершини тріщини бачимо, що наближена формула (6) та відповідна рівність (3) досить точно (з похибкою 1%) визначають напружений стан у пружному тілі. Водночас, використовуючи МСЕ, можна встановити НДС тіла тільки у заданих вузлових точках. Відповідно, застосовуючи МСЕ для оцінки КІН, необхідно сітку розбиття скінченними елементами біля вершини тріщини згущувати. При цьому лінійні розміри комірок розбиття a , b в околі вершини тріщини мають бути менші, ніж $0,01l$, тобто

$$a \leq 0,01l, \quad b \leq 0,01l. \quad (7)$$

Умови (7) є необхідними для забезпечення точності розрахунків КІН на основі співвідношень (3) або (6), у яких величина r сумірна з лінійними розмірами комірок розбиття a , b в околі вершини тріщини.

Розрахунок КІН для тріщини у нескінченній пластині за допомогою методу скінченних елементів. З використанням МСЕ встановимо числово КІН K_I для нескінченної пластини, послабленої наскрізною тріщиною довжини $2l$ за двовісного розтягу на нескінченності зусиллями інтенсивності σ . Сітку розбиття скінченними елементами біля вершини тріщини приймаємо такою, як на рис. 3, де лінійні розміри комірки біля вершини тріщини вважали рівними

$$a_1 = b_1 = 0,000387l, \quad (8)$$

а для віддалених – скінченно-елементне розбиття задавали співвідношеннями

$$a_i = a_1 + (i-1)\xi, \quad b_j = b_1 + (j-1)\xi. \quad (9)$$

Тут $\xi = 0,000113l$, i та j – відповідно номер стовпця та рядка елементів розбиття біля вершини тріщини.

Зауважимо, що на продовженні тріщини завдовжки $0,01l$ вміщується 11 комірок розбиття.

Напружений стан біля вершини тріщини розраховували, застосовуючи скінченно-елементний програмний комплекс [7]. Розподіл напружень σ_{22} біля вершини тріщини поданий на рис. 4. Під час числового розрахунку задавали зусилля інтенсивністю $\sigma = 100$ МПа, а довжину тріщини $2l = 1$ см.

Наведені значення відповідають напруженням σ_{22} у центрі кожної комірки розбиття скінченними елементами. Також для порівняння у дужках подано числові значення напружень σ_{22} , отримані за аналітичною формулою (5). Як бачимо, значення напружень, одержані з використанням МСЕ та аналітично за формулою (5), збігаються (похибка 2%).

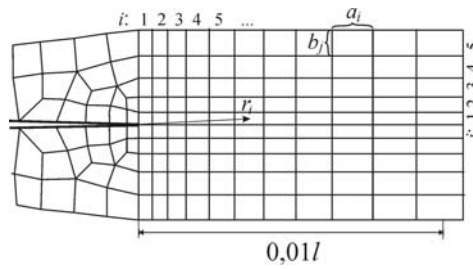


Рис. 3. Сітка розбиття скінченними елементами біля вершини тріщини.

Fig. 3. Division mesh by the finite element method (FEM) at the crack tip.

2422,1 (2407)	2490,3 (2496)	2153,4 (2153)	1747,7 (1750)	1455,1 (1445)	1245,2 (1230)	1091,2 (1074)
3379,6 (3436)	2916,0 (2946)	2121,9 (2169)	1695,2 (1696)	1413,4 (1402)	1219,4 (1204)	1075,2 (1058)
5027,6 (5345)	2754,4 (2881)	2060,7 (2067)	1654,2 (1646)	1395,1 (1379)	1209,6 (1192)	1070,1 (1054)
5027,6 (5345)	2754,4 (2881)	2060,7 (2067)	1654,2 (1646)	1395,1 (1379)	1209,6 (1192)	1070,1 (1054)
3379,6 (3436)	2916,0 (2946)	2121,9 (2169)	1695,2 (1696)	1413,4 (1402)	1219,4 (1204)	1075,2 (1058)
2422,1 (2407)	2490,3 (2496)	2153,4 (2153)	1747,7 (1750)	1455,1 (1445)	1245,2 (1230)	1091,2 (1074)

Рис. 4. Розподіл напружень σ_{22} (МПа) біля вершини тріщини, отриманий числово з використанням МСЕ та аналітично за формулою (5) (значення у дужках).

Fig. 4. Distribution of stress σ_{22} (MPa) at the crack tip, obtained numerically using FEM and analytically by formula (5) (values in parentheses).

На основі першої формули (3) КІН K_I обчислюємо за співвідношенням

$$K_I(r_i) = \sigma_{22}(r_i) \sqrt{2\pi r_i} / \left(\cos \frac{\theta_i}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta_i}{2} \sin \frac{3\theta_i}{2} \right) \right), \quad (10)$$

де за виразами (8), (9) та сумою арифметичної прогресії $S_n = na_1 + (n-1)n\xi/2$, задаємо $r_i = 0,5\sqrt{((2i-1)a_1 + (i-1)^2\xi)^2 + b_1^2}$, $\theta_i = \arcsin(b_1/2r_i)$.

Таблиця 2. КІН K_I , розраховані за формулою (10) для напружень $\sigma_{22}(r_i)$, визначених числово МСЕ

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$K_I(r_i)$, МПа \sqrt{m}	118	120	125	126	127	127,5	127,9	128	128,5	128,7

Примітка: індекс i відповідає номеру комірки від вершини тріщини на її продовженні.

З формули (10) та числових значень напружень σ_{22} (рис. 4) одержали значення K_I в i -их комірках розбиття на продовженні тріщини (табл. 2). Оскільки значення K_I для кожної комірки розбиття дещо різняться, то для тріщини шукаємо середнє арифметичне значення $K_I(r_i)$, починаючи від третьої до десятої комірки розбиття, тобто

$$K_I = \sum_{i=3}^{10} K_I(r_i) / 8. \quad (11)$$

На основі цього одержуємо, що $K_I = 127,4 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

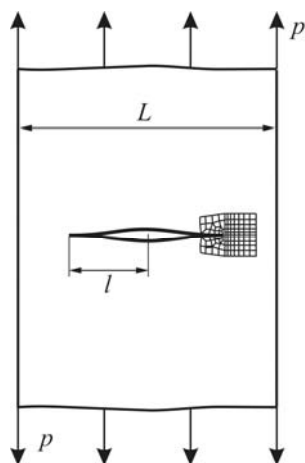


Рис. 5. Схема навантаження смуги з тріщиною.

Fig. 5. Loading chart of a strip with a crack.

За двовісного розтягу нескінченної пластини, послабленої наскрізною тріщиною довжини $2l$, аналітичне значення КІН [6] $K_I = \sigma\sqrt{\pi l}$. Приймавши, що $\sigma = 100 \text{ МПа}$, а $2l = 0,01 \text{ м}$, знаходимо $K_I = 125,33 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Порівнюючи отримане числово значення $K_I = 127,4 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ та аналітичне $K_I = 125,33 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, бачимо, що МСЕ можна з похибкою в межах 1...2% встановити КІН за умови, що на продовженні тріщини завдовжки $0,01l$ вміщується 10...15 комірок розбиття скінченними елементами.

Аналогічно розраховували K_I для нескінченної смуги шириною L , послабленої центральною тріщиною завдовжки $2l$. Смуга розтягується на нескінченності зусиллями інтенсивності p . Схема її навантаження зображена на рис. 5.

Встановивши за допомогою МСЕ напружений стан у смугі з тріщиною, за формулою (10) знаходимо значення $K_I(r_i)$ у комірках розбиття, що розміщені на продовженні тріщини. Розраховували K_I для різних відносних довжин тріщини $\lambda = 2l/L = 0,3; 0,5; 0,7; 0,9$. Результати наведено у табл. 3. У розрахунках приймали, що $p = 100 \text{ МПа}$, а $2l = 0,01 \text{ м}$.

Таблиця 3. КІН $K_I(r_i)$ (МПа $\sqrt{\text{м}}$) для смуги з центральною тріщиною, розраховані за формулою (10)

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\lambda = 0,3$	121,4	123,4	129	130	131	131,4	131,8	132,1	132,4	132,6
$\lambda = 0,5$	136,3	139	145	146	146,8	147,4	147,9	148,2	148,5	148,9
$\lambda = 0,7$	173	175,3	183	184	184,7	185,3	185,8	186	186,5	186,7
$\lambda = 0,9$	300	304	316,7	319	320,3	321,4	322,1	322,7	323	323,5

КІН для смуги шириною L з центральною тріщиною довжини $2l$ за різних $\lambda = 2l/L$ подані у табл. 4. Тут також вказані значення K_I , встановлені за формулою (11) (як середнє арифметичне), де $K_I(r_i)$ брали з табл. 3.

Таблиця 4. КІН K_I для смуги з центральною тріщиною за різних λ

$\lambda = 2l/L$	0,3	0,5	0,7	0,9
$K_I, \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ [8, 9]	132,5	148,7	186,5	324
$K_I = \sum_{i=3}^{10} K_I(r_i) / 8$	131,3	147,3	185,3	321,1

Порівнюючи результати в табл. 4, бачимо, що значення K_I , обчислені за допомогою МСЕ, практично збігаються зі значеннями, отриманими раніше [8, 9]. Отже, за числового встановлення КІН (з використанням МСЕ), щоб забезпечити точність розрахунків, необхідно згустити сітку розбиття скінченними елементами біля вершини і на продовженні тріщини завдовжки $0,01l$ вмістити 10...15 комірок.

Оцінка допустимої довжини тріщиноподібного дефекту-непровару у стільниковій конструкції.

Дефекти-непровари для одношарової стільникової трубної конструкції (див. рис. 1) є технологічно неминучі під час її виготовлення. Оцінюючи їх вплив на довговічність та міцність стільникової конструкції, необхідно встановити КІН – як один з важливих параметрів механіки руйнування [4]. Оскільки структура стінки стільникової конструкції має складну (пустотілу) будову, то для визначення КІН потрібно розв'язувати тривимірну задачу теорії пружності, яка досить складна і трудомістка. Тому приймемо додаткові спрощення. Досліджуючи міцність пластинчастого порожнистого зразка з тріщиноподібним дефектом-непроваром (рис. 6), враховуватимемо тільки внутрішні зусилля G_{11} та T_{11} , викликані зовнішнім навантаженням. Для досліджуваного дефекту інші зусилля несуттєво впливатимуть на КІН. Тому встановимо залежності $K_I = K_I(T_{11}, G_{11})$. Приймемо, що пластинчастий зразок знаходиться в умовах плоскої деформації [10]. Тому необхідно встановити КІН для наскрізної тріщини у смузі з круговими вирізами.

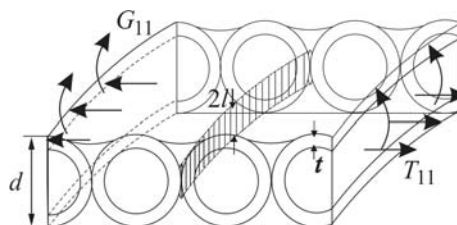


Рис. 6. Схема тріщини-непровару у стінці стільникового зразка.

Fig. 6. Scheme of a crack-faulty fusion in the wall of the cell sample.

Визначення КІН K_I для тріщини у смузі з періодичною системою кругових вирізів. Розглянемо смугу одиничної товщини з періодичною системою кругових вирізів та наскрізним розрізом. Смуга навантажена зусиллям T_{11} (тип I) та згинальним моментом G_{11} (тип II). Схема навантаження смуги з тріщиною зображена на рис. 7. Ширина смуги d , радіус вирізу $r = d/2 - t$. Довжину наскрізної тріщини приймаємо рівною $2l$. Смуга знаходиться в умовах плоскої деформації.

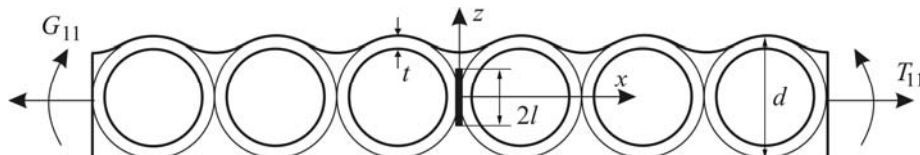


Рис. 7. Схема навантаження смуги з круговими вирізами та наскрізною тріщиною.

Fig. 7. Load chart of a strip with circular cuts and a through crack.

Встановимо значення K_I для смуги з наскрізною тріщиною між круговими вирізами (рис. 7). Знаходимо його числово, використовуючи МСЕ [5]. Алгоритм розрахунку K_I для досліджуваної смуги з коловими вирізами такий самий, як і під час розрахунку K_I для тріщини у нескінченній пластині та смузі. Як уже встановили, щоб забезпечити достатню точність результатів розрахунку КІН за допомогою МСЕ, необхідно сітку розбиття скінченними елементами біля вершини тріщини згущувати, причому на продовженні тріщини завдовжки $0,01l$ потрібно вмістити 10...15 комірок. Скінченно-елементна модель смуги з круговими вирізами та наскрізною тріщиною враховує геометрію стільникової будови. Схему розбиття скінченними елементами в околі вершини тріщини приймали такою ж, як на рис. 3. НДС смуги (рис. 7) розраховували за допомогою відомої скінченно-

елементної програми [7]. Вибирали смугу з 10-ма круговими вирізами. Ширину смуги задавали рівною $d = 5$ см, а радіус кругових вирізів $r = 2$ см, де $t = d/10 = 0,5$ см. Приймали, що поліетилен, з якого виготовлений зразок, є ідеально пружний, однорідний та ізотропний з модулем пружності $E = 600$ МПа [11, 12] та коефіцієнтом Пуассона $\nu = 0,42$ [12]. Під час розрахунку відносну довжину тріщини задавали рівною $\lambda = 2l/d = 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 0,7$. Зовнішнє навантаження на кінцях смуги задавали розтягальним зусиллям $T_{11} = 100$ кН/м (тип I) або згинальним моментом $G_{11} = 100$ Н (тип II). МСЕ отримано розподіл напружень у вершині розрізу для навантажень I та II-го типів. На рис. 8 зображено розподіл напружень σ_{11} біля вершини тріщини у смугі, для якої $\lambda = 2l/d = 0,2$.

-172,3	-193,2	-209,3	-217,6	-217,6	-209,3	-193,2	-172,3
-179,1	-214,2	-244,7	-264,6	-264,6	-244,7	-214,2	-179,1
-178,0	-221,0	-293,9	-339,0	-339,0	-293,9	-221,0	-178,0
-168,2	-212,6	-288,1	-523,6	-523,6	-288,1	-212,6	-168,2
-148,2	-178,3	-223,1	-324,7	-324,7	-224,1	-178,3	-148,2

Рис. 8. Розподіл напружень σ_{11} (МПа) в околі верхньої вершини розрізу за навантаження I типу (зусиллям $T_{11} = 100$ кН/м).

Fig. 8. Distribution of stresses σ_{11} (MPa) in the vicinity of the cut tip under mode I loading (forces $T_{11} = 100$ kN/m).

На основі отриманого числовим способом розподілу напружень в околі вершин розрізу за допомогою формули (10) встановлюємо КІН K_I у комірках розбиття, що розміщені на продовженні тріщини (табл. 5).

Таблиця 5. КІН K_I для смуги з наскрізним розрізом та періодичною системою кругових вирізів

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$K_I^+(r_i)$, МПа \sqrt{m}	-15,3	-15,7	-16,5	-16,6	-16,7	-16,8	-16,9	-17,0	-17,1	-17,1
$K_I^-(r_i)$, МПа \sqrt{m}	-9,0	-9,6	-10,2	-10,2	-10,3	-10,5	-10,6	-10,6	-10,7	-10,7

Примітка: індекс “+” відповідає верхній вершині тріщини, а “-” – нижній (рис. 7).

Остаточні значення K_I^\pm для тріщини шукаємо як середнє арифметичне значень $K_I^\pm(r_i)$, починаючи з третьої по десятку комірку, тобто $K_I^\pm = \sum_{i=3}^{10} K_I^\pm(r_i) / 8$ МПа \sqrt{m} .

На основі цієї формули та числових результатів (табл. 5), отримали: $K_I^+ = -16,8 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ і $K_I^- = -10,4 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Як бачимо, ці КІН для розглядуваної смуги за її розтягу від'ємні, що відповідає стискальним напруженням.

Аналогічно, за допомогою МСЕ отримали числові розрахунки для КІН K_I за різних $\lambda = 2l/d = 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 0,7$ під час навантаження смуги розтягальними зусиллями інтенсивності $T_{11} = 100 \text{ кН/м}$ та згинальним моментом $G_{11} = 100 \text{ Н}$ (табл. 6).

Таблиця 6. Значення K_I^\pm за різних λ під час навантаження смуги розтягальним зусиллям $T_{11} = 100 \text{ кН/м}$ та згинальним моментом $G_{11} = 100 \text{ Н}$

$\lambda = 2l/d$		0,1	0,2	0,3	0,5	0,7
$T_{11} = 100 \text{ кН/м}$	$K_I^+, \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$	-8,9	-16,8	-21,2	26,8	290,1
	$K_I^-, \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$	-6,2	-10,4	-15,6	17,9	331,2
$G_{11} = 100 \text{ Н}$	$K_I^+, \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$	-10,3	-18,5	-24,2	30,2	170,6
	$K_I^-, \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$	8,5	13,1	19,2	-21,5	-250,3

Опрацювавши числові результати (табл. 6), запропонували розрахункову формулу для визначення КІН K_I для тріщиноподібного дефекту-непровару у стільниковому елементі

$$K_I^\pm(\lambda) = (T_{11}t^\pm(\lambda)/d - 12G_{11}h^\pm(\lambda)/d^3)\sqrt{\pi\lambda d}, \quad \lambda = 2l/d, \quad (12)$$

де $2l$ – довжина тріщини-непровару; d – діаметр поліетиленової трубки, з якої формують стінку стільника; функції $t^\pm(\lambda)$ і $h^\pm(\lambda)$ описують вплив стільникової структури на КІН і графічно проілюстровані на рис. 9.

Використовуючи формулу (12) та графічний матеріал (рис. 9), критичну довжину непровару визначаємо з умови $K_I(\lambda_{cr}) = 0$, оскільки за незначного збільшення його довжини K_I різко зростає і перевищує значення K_{Ic} для поліетилену [13]. За цією ж умовою критична довжина непровару $l_{cr} = 0,45d$.

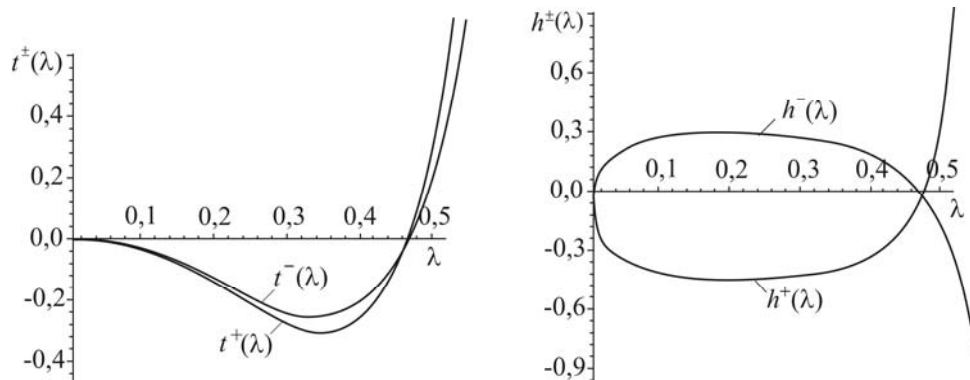


Рис. 9. Залежність функцій $t^\pm(\lambda)$ та $h^\pm(\lambda)$ від відносної довжини непровару $\lambda = 2l/d$.

Fig. 9. Dependence of functions $t^\pm(\lambda)$ and $h^\pm(\lambda)$ on the relative faulty fusion length $\lambda = 2l/d$.

ВИСНОВКИ

На основі МСЕ запропоновано ефективну схему для встановлення КІН тріщиноподібного дефекту-непровару у стінці стільника, яка дає можливість детально аналізувати локальні поля напружень та деформацій у стільниках біля таких дефектів. Для задання сітки розбиття скінченними елементами в околі вер-

щини тріщини реалізовано тестові приклади розрахунку K_I для центральної тріщини у пластині та смузі. Одержані числово (з використанням МСЕ) КІН K_I для тріщини у нескінченній пластині та смузі порівняно з літературними результатами (похибка в межах 1...2%). Для забезпечення такої точності результатів для КІН сітку розбиття скінченними елементами біля вершини тріщини необхідно згущувати, причому на продовженні тріщини $0,01l$ ($2l$ – довжина тріщини) потрібно вмістити 10...15 комірок. Забезпечуючи відповідне згущення сітки розбиття скінченними елементами у вершинах тріщини з використанням МСЕ, встановили НДС, а також КІН біля технологічних тріщиноподібних непроварів у стільниковому елементі. Отримано формулу розрахунку КІН K_I для тріщиноподібного непровару у стільниковому елементі. На її основі знайдено критичну довжину таких непроварів. Встановлено, що непровари з довжиною, яка досягає майже половини товщини стінки (діаметра поліетиленової трубки), не впливають на міцність стільникових виробів.

РЕЗЮМЕ. Установлено напряженно-деформированное состояние возле технологических трещиноподобных непроваров в сотовом элементе. Получена формула расчета коэффициентов интенсивности напряжений для трещиноподобного непровара и найдено его критическую длину. Установлено, что непровары длиной до половины толщины стенки элемента не влияют на прочность сотовых изделий.

SUMMARY. The stress-strain state at the technological crack-like faulty fusions in a cell element was established. The formula calculating the stress intensity factors K_I for the crack like faulty fusion was found and its critical length was calculated. It was established that faulty fusions of the length to half of the wall thickness does not affect the strength of cellular products.

Робота виконана в межах цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України “Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин” (“РЕСУРС” № Р 9.8-2013).

1. Корпорация “Энергоресурс-инвест” представляет новую технологию производства крупногабаритных полимерных изделий с пустотелой (сотовой) конструкцией стенки // Полимерные трубы. – 2007. – № 2. – С. 6–7.
2. Великогабаритні полімерні конструкції з пустотілою (стільниковою) будовою стінки // Вода і водоочисні технології. – 2008. – № 5. – С. 65–66.
3. Стацук М. Г., Дорош М. І. Розрахунок великогабаритних поліетиленових труб з порожнистою стінкою // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – 48, № 4. – С. 39–45.
4. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
5. Морозов Е. М., Никишков Г. П. Метод конечных элементов в механике разрушения. – М.: Наука, 1980. – 354 с.
6. Нотт Дж. Ф. Основы механики разрушения. – М.: Металлургия, 1978. – 256 с.
7. Рычков С. П. MSC.visualNASTRAN для Windows. – М.: ИТ Пресс, 2004. – 552 с.
8. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. – Т. 2: М. П. Саврук. Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами. – К.: Наук. думка, 1988 – 620 с.
9. Krenk W. T. On the elastic strip with an internal crack // Int. J. Solids and Struct. – 1975. – 11, № 6. – Р. 693–708.
10. Демидов С. П. Теория упругости. – М.: Высш. шк., 1979. – 432 с.
11. McGrath T. J, Moore I. D., and Hsuan G. Y. NCHRP Report 631: Updated test and design methods for thermoplastic drainage pipe. – Washington, D. C.: Transportation Research Board, 2009. – 323 p.
12. Short-term and long-term behaviors of buried corrugated high-density polyethylene (HDPE) pipes: Part B / J. S. Kang, T. H. Han, Y. J. Kang, and C. H. Yoo // Composites. – 2009. – 40. – Р. 404–412.
13. Болтон У. Конструкционные материалы металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты: Справ. – М.: Изд. дом “Додэка XXI”, 2004. – 320 с.

Одержано 07.10.2013