

О.З.Двейрін<sup>1</sup>, О.В.Андрєєв<sup>1</sup>,  
А.В.Кондратьєв<sup>2</sup>, В.Є.Гайдачук<sup>3</sup>

НАПРУЖЕНИЙ СТАН В ОКОЛІ ОТВОРУ  
МЕХАНІЧНОГО З'ЄДНАННЯ КОМПОЗИТНИХ ДЕТАЛЕЙ

<sup>1</sup>Державне підприємство «Антонов»,

вул. Ак. Туполева, 1, 03062, Київ, Україна; e-mail: andreev@antonov.com;

<sup>2</sup>Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харків, Україна; e-mail: andrii.kondratiev@kname.edu.ua;

<sup>3</sup>Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ»,  
вул. Чкалова, 17, 61070, Харків, Україна; e-mail: gajdachukv@gmail.com

**Abstract.** The stress concentration near the hole in the polymer composite is studied theoretically and experimentally. Based on the finite element modeling, it is established that the stress concentration factor significantly depends on the degree of loading of the hole with the fastener. The dependence of the stress concentration coefficient of the sample with a non-loaded empty hole on the ratio of the hole diameter and the thickness of the sample is obtained. It was experimentally shown that only circumferential normal stresses significantly depend on the structure of a composite package. It is established that the shear stress maxima are observed in the area of the transition from compression (crumpling) to tension. It is established that the maxima of the stress concentration coefficient at the loaded hole are observed in the area of the load applied to the loading surface of the hole, where the crumpling zone occurs, in which failure in the form of rupture or shear is not observed.

**Key words:** mechanical connections, polymer composites, stress concentration, hole, finite element modeling, tensile testing of samples.

**Вступ.**

Механічні з'єднання (заклепкові, болтові, різьбові та інші) є основними способами складання конструкцій і залишаються такими для деталей і агрегатів з полімерних композиційних матеріалів (ПКМ). Однак анізотропія фізико-механічних характеристик ПКМ та інші специфічні особливості вимагають для реалізації їх високих потенційних можливостей розроблення нових методів розрахунків на міцність композитних деталей та вузлів агрегатів і в першу чергу локальних зон їх механічних з'єднань із дискретними кріпильними елементами [6, 19]. У той же час точність математичних моделей, що реалізують розрахункові схеми цих з'єднань, особливо для відповідальних силових елементів агрегатів [21 – 23], не завжди відповідає вимогам до методів забезпечення відповідності, що посилює роль експериментальної бази доказових документів [3, 17]. Існуюча система розрахункового та експериментального забезпечення проектування не враховує повною мірою особливості роботи композитних деталей у з'єднанні. До цих неврахованих особливостей належить концентрація напружень в отворі на границі дискретного кріпильного елемента, яка є одним з основних факторів, що визначають міцність конструкції відповідальних силових елементів агрегатів. Тому дослідження впливу концентрації напружень на несучу здатність механічного з'єднання композитних деталей і пошук шляхів її зниження є однією з актуальних задач сучасної механіки.

*Аналіз публікацій з концентрації напружень біля отворів у механічних з'єднаннях деталей з полімерних композитів.* Дослідженню впливу концентрації напружень на несучу здатність механічного з'єднання присвячено досить велику кількість робіт, які спрямовано або на виявлення факторів, що впливають на розподіл напружень навколо отворів та їх експериментальне встановлення, або на розробку методів дослідження впливу концентратора на розподіл напружень навколо отвору. Даний напрямок можна вважати найбільш дослідженим, але необхідність подальшого вивчення збереглася, тому що особливості поведінки композита в околі отвору привнесли нові фактори, що впливають на особливості розподілу напружень навколо отворів із кріпильними елементами.

Задача на розтяг – стиск або зсув плоскої композитної пластини із круговим отвором розв'язувалась багатьма авторами. Як найпростіше наближення можна розглядати аналітичні розв'язання для однорідних ортотропних нескінченних пластин, які представлено в роботах [8, 10]. У цих роботах для нескінченної пластини при розтягу (стиску) і зсуві визначено тангенціальні та нормальні напруження поблизу контура кругового отвору. Отримані залежності добре узгоджуються з формулами, наведеними в роботі [1], де для круглого отвору в пластині з ізотропного матеріалу визначено колові, радіальні та зсувні напруження. У цих роботах [1, 8, 10] також розроблено загальну методику оцінювання напружень в околі вирізів і отворів практично будь-якої форми. Однак за прагненням до збереження спільності підходу розрахунків губляться специфічні особливості, що пов'язані із взаємодією елементів з'єднання.

У роботі [15] відзначається, що умови контакту тіла кріпильного елемента з отвором (величини напружень зминання та зони контакту) залежать як від навантаження, так і від наявності просвіту або натягу. У роботі [16] показано, що коефіцієнт концентрації колових напружень  $k_\theta$  також залежить від багатьох факторів. До розглянутих факторів належать відношення діаметра отвору до ширини смуги, у якій розташований отвір, посадка кріпильного елемента в отворі та найбільша нормальна деформація отвору. У роботах [24, 31] отримано залежність для визначення коефіцієнта концентрації напружень для широкої пластини при одновісному навантаженні великих отворів. Для квазіізотропних пакетів отримане співвідношення спрощується до добре відомого значення  $k_\theta = 3$  для круглого отвору. Це співвідношення також показує, що отвір у високомодульних шарах матиме набагато більший вплив на міцність, ніж в низькомодульних. Коли отвори розташовані близько в болтовому з'єднанні, отвори починають взаємодіяти і міцність композитного пакета зменшується. Вплив кінцевої ширини проявляється на цьому ефекті взаємодії. Для ізотропних матеріалів у роботах [24, 31] отримано коефіцієнти «корекції кінцевої ширини» (FWC). Окремо в роботі [24] відзначено, що у випадку, коли діаметр отвору значно більший ніж товщина пакета, то концентрація напружень за природою двовимірна. Більшість досліджень пов'язана саме із цим випадком. Передбачити міцність пакета ПКМ з отвором значно складніше, коли товщина пакета суттєво перевершує діаметр отвору. Концентрація напружень за природою є тривимірною і вплив на неї порядку укладання шарів ПКМ може стати домінуючим. Однак немає ніяких вказівок на те, яке значення (або діапазон значень) відношення діаметра кріпильного елемента до товщини зразка можна вважати перехідним стосовно до вибору моделі.

У роботах [25, 26] показано, що серед інших факторів на міцність з'єднання впливає співвідношення між зминаючим навантаженням від кріпильного елемента та «прохідним» навантаженням (що розтягує деталь), а також відстань від отвору із кріпильним елементом до краю деталі. У випадку чистого навантаження «прохідним» зусиллям за рахунок овалізації отвору виникають дві області просвітів у межах  $0^\circ$  і  $180^\circ$ , а у випадку передачі навантаження із кріпильного елемента просвіт буде тільки один від  $90^\circ$  до  $270^\circ$ . Комбінування навантажень призводить до складного характеру розподілу напружень по контуру отвору. Для застосування традиційних прийомів методу суперпозиції в роботі [26] пропонується коефіцієнт концентрації напружень представити лінійною комбінацією коефіцієнта концентрації напружень при чистому зминанні стінки отвору навантаженням болтом і коефіцієнта концентрації при чистій передачі навантаження повз отвір.

У роботі [18] наведено порівняння результатів, що базуються на лінеаризації взаємодії навантажень і більш точного розв'язання. В цілому з наведеними в роботі [18] висновками цілком узгоджуються результати досліджень, результати яких наведено в роботі [9]. Ці результати отримано на основі експериментів із прототипами з'єднань на основі поляризаційно-оптичного методу. Як висновок у роботі [9] зазначено, що розподіл напружень по контуру залежить від відношення зусилля  $P$ , що діє у зразку, до зусилля  $Q$ , що передається кріпильному елементу. При  $P/Q = 0$  (передача навантаження через одну силову точку або через останню смугу вільного краю деталі), модулі максимальних значень радіальних напружень (напруження зминання) і окружних напружень близькі за величиною.

У випадку спільної дії  $P$  та  $Q$  у роботі [9] пропонується використовувати залежність для максимальних значень напружень  $\sigma_\theta$ . Недоліком досліджень [9] є те, що вони справедливі тільки для ізотропних матеріалів, тому що використаний поляризаційно-оптичний метод накладає жорсткі обмеження на матеріал моделі, що використовується.

У більшості зазначених робіт для розв'язання задач, що стосуються деформування та руйнування композитних пластин із круговими отворами, були використані добре відомі розв'язки анізотропної теорії пружності, після чого здійснювався перехід до композитного матеріалу за допомогою різних наближених підходів. У роботі [34] розглядається наближена кусочно-однорідна модель, що враховує явно структуру матеріалу. Ця модель, добре відома як модель Аутовотера [27], полягає в припущенні, що армуючі волокна випробовують тільки розтяг-стиск, а зв'язуючий матеріал – тільки зсув на площадках, паралельних волокнам. Розвиток цього підходу викладено в ряді робіт, наприклад [7, 20, 33]. Так у роботі [20] моделюється круговий отвір при прийнятті припущення про рівність нулю нормальних напружень на контурі. Однак, оскільки розв'язки при цих умовах усередині отвору відмінні від нуля, результат є дуже грубим наближенням [5]. Автор роботи [33], узагальнивши роботу [27], наближено замінив отвір системою близько розташованих дефектів і встановив, що концентрація напружень у цілих волокнах росте з ростом діаметра отвору, що узгоджується з експериментальними даними.

Для дослідження концентрації напружень і викликаних нею руйнувань в ПКМ крім аналітичних методів використовуються й числові методи, зокрема метод скінченних елементів [5, 23]. Так у роботах [28, 29] отримана залежність коефіцієнта концентрації напружень від відношення діаметра отвору до ширини пластини, а також від наявності ортотропії в матеріалі пластини. Це дозволило авторам отримати залежність, яка прогнозує зазначений коефіцієнт без проведення складних розрахунків контактних задач, використовуючи відомі апроксимації для ізотропного матеріалу та розв'язки Лехницького [8].

У роботах [30, 32] на основі результатів експериментальних досліджень представлено критерії прогнозування руйнування композитних пластин з отворами.

Розв'язки проблеми вибору раціональних або близьких до оптимальних конструктивно-технологічних рішень для композитних конструкцій літальних апаратів у нерегулярних зонах знайшло глибоке відображення в працях Я.С. Карпова, узагальнених у його монографії [6].

Відповідно до отриманих результатів було розроблено стандарти для оцінки міцності зразків з отвором [12, 14], оцінки впливу жорсткого тіла кріпильного елемента на міцність зразка [13] і впливу співвідношення зминаючого отвір навантаження від кріпильного елемента до «прохідного» навантаження на міцність зразка в межах отвору із кріпильним елементом [14].

Проведений аналіз стану проблеми та досліджень з теоретичного і експериментального забезпечення розрахунків механічних з'єднань на міцність дозволяє зробити наступні висновки:

основним інтегральним недоліком існуючої системи методик є те, що вона не враховує особливості поведінки композитів у зоні з'єднання, і тому не забезпечує належну якість проектувальних розрахунків механічних з'єднань і розрахунків їх на міцність;

використання існуючої системи, як показав накопичений досвід, в принципі можливо, але змушена компенсація її недоліків призводить до погіршення ряду характеристик конструкції, зокрема підвищення маси, що знижує ефективність застосування ПКМ;

існуючі методики експериментального забезпечення розрахунків механічних з'єднань композитних деталей ґрунтуються на системі, що розроблена для з'єднання металевих деталей;

перевагою існуючої системи методик експериментального забезпечення є те, що вона здебільшого відповідає стандартам.

Таким чином, розробка системи теоретичного та експериментального забезпечення розрахунків механічного з'єднання, яка максимально враховувала б особливості роботи ПКМ в околі дискретних зв'язків, є актуальною.

### §1. Постановка задачі.

Досліджується концентрація напружень в області контактуючого з болтом кругового отвору в прямокутній пластині постійної товщини, яка виготовлена з ортотропного композитного матеріалу. Розглядається двовимірна пружна задача деформування ортотропної пластини з різною структурою армування, що перебуває в умовах узагальненого плоского напруженого стану. Загальна постановка крайової задачі теорії пружності для ортотропних тіл містить в собі: рівняння рівноваги, узагальнений закон Гука, співвідношення Коші та крайові умови.

Теоретичні розв'язки отримано із застосуванням методу скінченних елементів. Область навколо отвору розбивається на трикутні скінченні елементи другого порядку апроксимації. Контакт болта з контуром отвору моделюється за допомогою схеми «вузол у вузол» і контактних елементів типу GAP.

При експериментальному визначенні концентрації напружень на границі кріпильного елемента механічного з'єднання композитної пластини використовувалися стандартні методи статичних випробувань, тензометрії, а також методи та засоби експериментального визначення коефіцієнта концентрації напружень.

### §2. Теоретичне (числове) розв'язання задачі.

На основі проведеного вище аналізу робіт можна зробити висновок, що фактори, які впливають на розподіл напружень навколо отвору механічного з'єднання композитних деталей, можна згрупувати за структурними ознаками композита, навантаження та геометричними параметрами.

У першу чергу на міцність матеріалу на розрив впливає структура пакета ПКМ. Саме вона прийнята як основний фактор, що впливає на концентрацію напружень в околі порожнього отвору в роботах [8, 10]. Це питання було обговорено в нашій роботі [2] і узагальнено в [4], де було встановлено, що несуча здатність розтягнутого зразка складноармованого композиційного матеріалу суттєво відрізняється від оцінки по границі міцності пакета для трьох розповсюджених варіантів критеріїв міцності та залежить від питомого об'єму волокон уздовж осі навантаження (табл. 1).

Таблиця 1

Міцність на розрив типового складноармованого зразка зі структурою [ 0 <sub>0,7</sub> ; ±45 <sub>0,2</sub> ; 90 <sub>0,1</sub> ], МПа		
Руйнування шарів 90°	Руйнування шарів ±45°	Руйнування шарів 0°
Критерій максимальних напружень		
56	123	775
Критерій максимальних деформацій		
49	123	521
Критерій Мізеса – Хілла		
55	91	775

На додаток до вище викладеного відноситься питання впливу змінності пакета в ході його руйнування в послабленому місці. Суть цього питання проілюстровано на рис. 1, де показано особливість руйнування композитної деталі.

Таким чином, при оцінці міцності пакета ПКМ в послабленому перетині не можна стверджувати, що структура пакета постійна. З іншого боку, немає надійних методів відстеження стану пакета по поверхні зразка в ході експерименту.

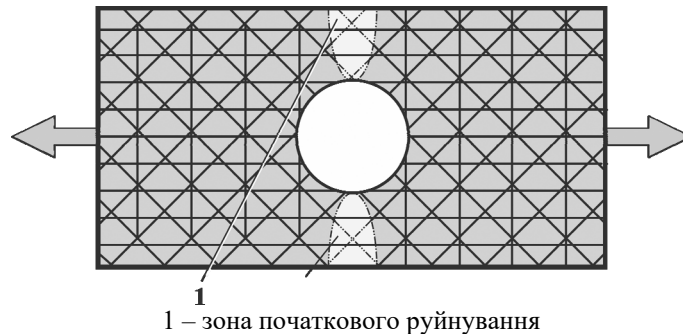


Рис. 1

Вплив особливостей навантаження на коефіцієнт концентрації проявляється в основному через відношення зусилля, що проходить по деталі, до зусилля, яке передається кріпильним елементом ( $N/Q$ ). Відмінність у параметрах навантаження кріпильних елементів характерна навіть у межах одного багаторядного стику. Параметричні дослідження механічного з'єднання (рис. 2) показали, що в широкому діапазоні параметрів елементів стику (властивості матеріалів, геометрія) відношення  $N/Q$  цілком стабільне до зміни згаданих параметрів і залежить від кількості рядів.

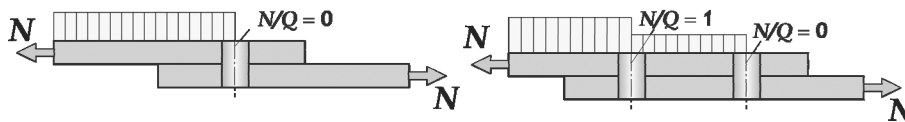


Рис. 2

У табл. 2 представлено розподіл по рядах кріпильних елементів зусиль, що проходять по деталі, до зусиль, які передаються відповідними рядами.

Дослідження [9, 10] показали, що розподіл напружень по колу суттєво залежить від відношення  $N/Q$ , навіть пропонувалися залежності для врахування впливу навантаження на напруження навколо отвору, але в роботі [9] вони отримувалися для ізотропних матеріалів. У роботі [10] досліджено розподіл напружень в околі отвору шаруватого склопластику, але є питання із приводу прив'язки отриманих результатів дослідження до експериментальних даних.

Таблиця 2

Кількість рядів	Номер ряду кріпильних елементів								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0								
2	1	0							
3	1,14	7,154	0						
4	1,15	14,31	13,31	0					
5	1,151	15,31	108,50	14,17	0				
6	1,151	15,38	203,70	202,70	14,23	0			
7	1,151	15,39	217,00	1551,50	215,90	14,24	0		
8	1,151	15,39	218,10	2900,30	2899,30	216,90	14,24	0	
9	1,151	15,39	218,10	3088,90	22096	3087,70	216,90	14,24	0

Таблиця 3

Параметр	Позначення	Розмірність	Значення
Товщина моношару	$\delta_0$	мм	0,087
Границя міцності уздовж волокна на розтяг	$F_{1p}$	МПа	677
Границя міцності уздовж волокна на стиск	$F_{1c}$	МПа	939
Модуль пружності уздовж волокна	$E_1$	МПа	135500
Коефіцієнт Пуассона	$\mu_{12}$	–	0,32
Границя міцності поперек волокна на розтяг	$F_{2p}$	МПа	21
Границя міцності поперек волокна на стиск	$F_{2c}$	МПа	210
Модуль пружності поперек волокна	$E_2$	МПа	7000
Границя міцності на зсув у площині укладання	$F_{12}$	МПа	75
Модуль пружності на зсув у площині укладання	$G_{12}$	МПа	5500

Таблиця 4

Характеристики матеріалу	Позначення	Розмірність	Структура пакета			
			№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Границя міцності при розтягу:						
- уздовж осі X	$F_{xp}$	МПа	333	269	562	197
- уздовж осі Y	$F_{yp}$	МПа	81	145	57	181
Границя міцності при стиску:						
- уздовж осі X	$F_{xc}$	МПа	708	543	673	373
- уздовж осі Y	$F_{yc}$	МПа	132	100	41	115
Границя міцності при зсуві:						
	$F_{xy}$	МПа	84	127	84	170
Модуль пружності:						
- уздовж осі X	$E_x$	МПа	102126	80105	112829	57552
- уздовж осі Y	$E_y$	МПа	26410	31856	13561	35370
Модуль зсуву						
	$G_{xy}$	МПа	11338	17175	11338	23013
Товщина елементарного пакета						
	$\delta_{el}$	мм	0,87	0,87	0,87	0,87
Коефіцієнт Пуассона						
	$\mu_{xy}$	–	0,299	0,408	0,573	0,48

Для розв'язання задачі щодо оцінки впливу на концентрацію напружень по краю отвору особливостей передачі навантаження, рівня навантаження та параметрів матеріалу було проведено серію параметричних досліджень на основі методу скінчених елементів. У якості змінних параметрів було прийнято наступне:

особливості навантаження розглянуто в трьох варіантах:  $N/Q=1$ , що близько до параметрів навантаження елементів навантаженого краю деталі (див. табл. 2);  $N/Q \rightarrow \infty$ , що відповідає умовам ненавантаженої зони багаторядного механічного з'єднання;  $N/Q=0$ , що відповідає умовам навантаження вільного краю деталі, що з'єднується;

для оцінювання впливу структури матеріалу розглянуто структури з односпрямованого пакета ПКМ на основі вуглепластику ЕЛУР-008 П/ 211-БН із фізико-механічними характеристиками, які представлено в табл. 3, а також наступні структури з цього матеріалу з різною часткою шарів з укладанням  $0^\circ$ : № 1 –  $[0^\circ_{0,7}; \pm 45^\circ_{0,2}; 90^\circ_{0,1}]$ ; № 2 –  $[0^\circ_{0,5}; \pm 45^\circ_{0,4}; 90^\circ_{0,1}]$ ; № 3 –  $[0^\circ_{0,8}; \pm 45^\circ_{0,2}]$ ; № 4 –  $[0^\circ_{0,3}; \pm 45^\circ_{0,6}; 90^\circ_{0,1}]$  (табл. 4);

для оцінювання можливого впливу рівня навантаження на коефіцієнт концентрації напружень розглянуто три рівні навантаження у регулярній зоні: 100, 200 і 300 МПа.

Так як напружено-деформований стан зразка має поздовжню вісь симетрії, то моделювання проводилося для половини зразка (рис. 3). Розміри на цьому рисунку зазначено в міліметрах.

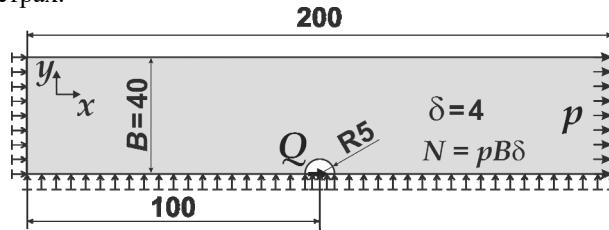


Рис. 3

Геометрія підбрана таким чином, щоб границі зразка гарантовано не впливали на напруження в околі отвору. Для моделювання пластини і стержня використано елементи типу SHELL3. Стержень виготовлено зі сталі 30ХГСА як найпоширенішої серед болтів. Для моделювання умов контактної взаємодії стержня та пластини використані елементи типу GAP без попереднього натягу і врахування коефіцієнта тертя. Тут слід зазначити, що на сучасному рівні розвитку технології забезпечити надійний попередній натяг при установці кріпильного елемента без руйнування пакета в зоні отвору практично неможливо (близькі результати поки можна одержати лише в процесі клепки, за рахунок роздачі тіла заклепки). Вплив тертя на напружено-деформований стан в околі отвору в композитній деталі поки недостатньо вивчений.

У процесі дослідження, згідно з рівнями навантаження і розглянутими особливостями передачі навантаження були сформульовані випадки навантаження, які наведено в табл. 5.

Таблиця 5

Напруження в регулярній зоні, МПа	Варіанти навантаження зразка (рис. 3)					
	$N/Q \rightarrow \infty$		$N/Q=1$		$N/Q=0$	
	$Q$ , Н	$p$ , МПа	$Q$ , кН	$p$ , МПа	$Q$ , кН	$p$ , МПа
100	0	100	8	50	16	0
200	0	200	16	100	32	0
300	0	300	24	150	48	0

Отримані в системі координат зразка  $(x, y)$  компоненти напружень на контурі кругового отвору  $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})$  перераховані в напруження в полярній системі координат  $(r, \theta)$  з полюсом у центрі отвору.

Для перерахунку використано залежності виду:

$$\begin{aligned}
 \sigma_r &= \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + \tau_{xy} \sin 2\theta; \\
 \sigma_\theta &= \sigma_x \sin^2 \theta + \sigma_y \cos^2 \theta - \tau_{xy} \sin 2\theta; \\
 \tau_{\theta r} &= (\sigma_y - \sigma_x) \sin \theta \cos \theta + \tau_{xy} \cos 2\theta.
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Відзначимо, що полярний кут  $\theta$  відраховується від позитивного напрямку осі  $ox$ .

### §3. Результати теоретичних досліджень.

В результаті проведених розрахунків були отримані значення напружень в полярній системі координат. Для оцінювання коефіцієнта концентрації напружень усі отримані компоненти напружень віднесено до величини напружень у регулярній зоні. Розрахунки показали, що в межах моделі значення коефіцієнтів концентрації напружень не залежать від рівня навантаження.

На рис. 4 – 6 наведені результати оцінювання коефіцієнтів концентрації колових ( $k_\theta$ ), радіальних ( $k_r$ ) і зсувних напружень ( $k_{\theta r}$ ) для трьох рівнів навантаження ( $N/Q \rightarrow \infty$ ;  $N/Q = 1$ ;  $N/Q = 0$ ) і п'яти структур матеріалу зразка з різною часткою шарів з укладанням  $0^\circ$  (30; 50; 70; 80; 100%).

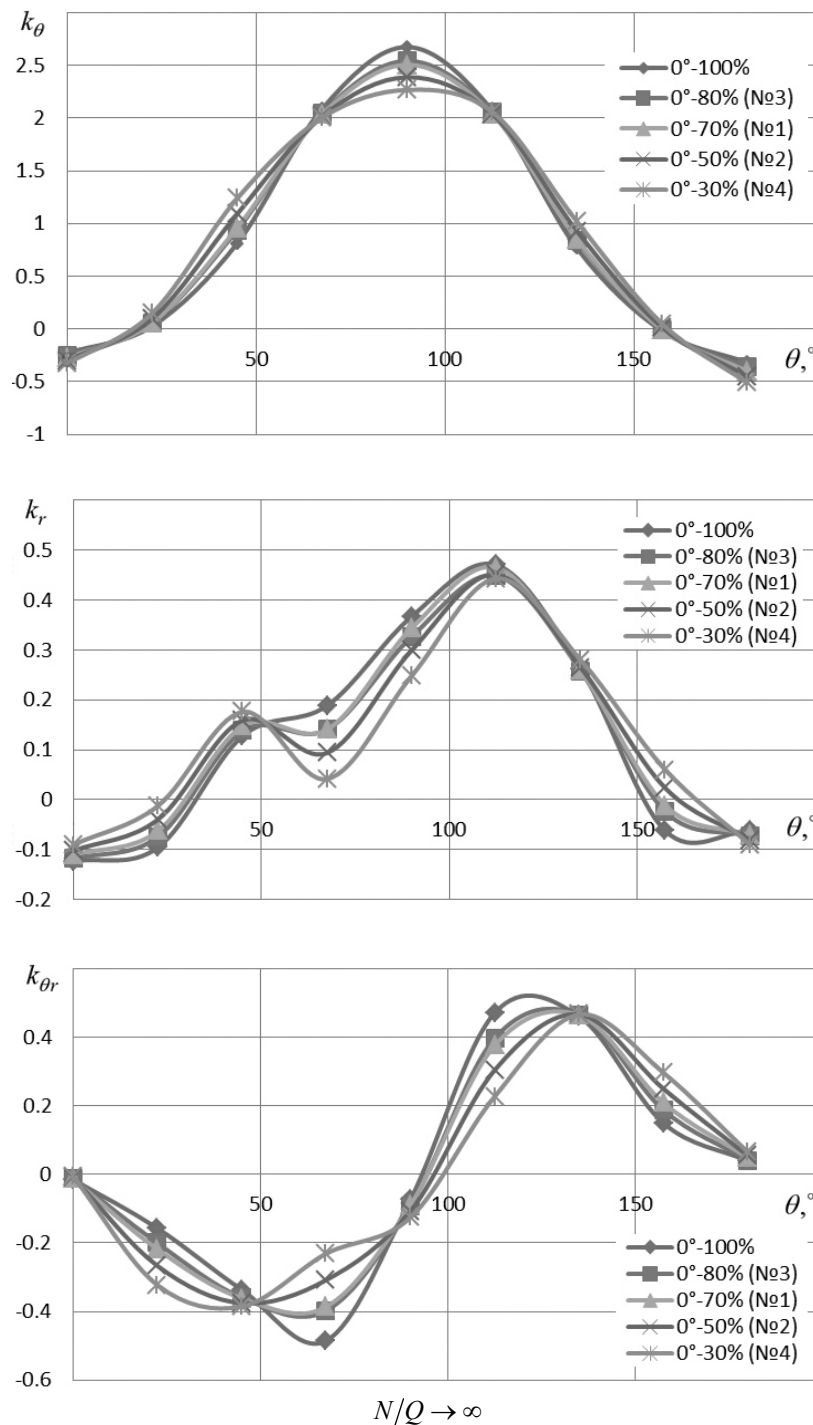


Рис. 4



Як показують графіки на рис. 4 – 6, в околі з'єднання, незалежно від характеру передачі навантаження, спостерігається складний напружений стан. Подібні ефекти наведено в різних роботах, наприклад [8, 9, 10, 25]. Неоднозначність в оцінці впливу концентрацій напружень навколо отвору на несучу здатність деталі привела до того, що було розроблено стандарти на проведення випробувань зразків з порожнім отвором [11], випробування зразків з отворами, заповненими імітаторами болтів [13], випробування зразків із частковою передачею навантаження через болт [14]. Залишається невирішеною проблема суміщення результатів параметричних досліджень із результатами експериментальних даних. У цьому плані певну перспективу має перерахунок компонентів коефіцієнта концентрації напружень в еквівалентний коефіцієнт.

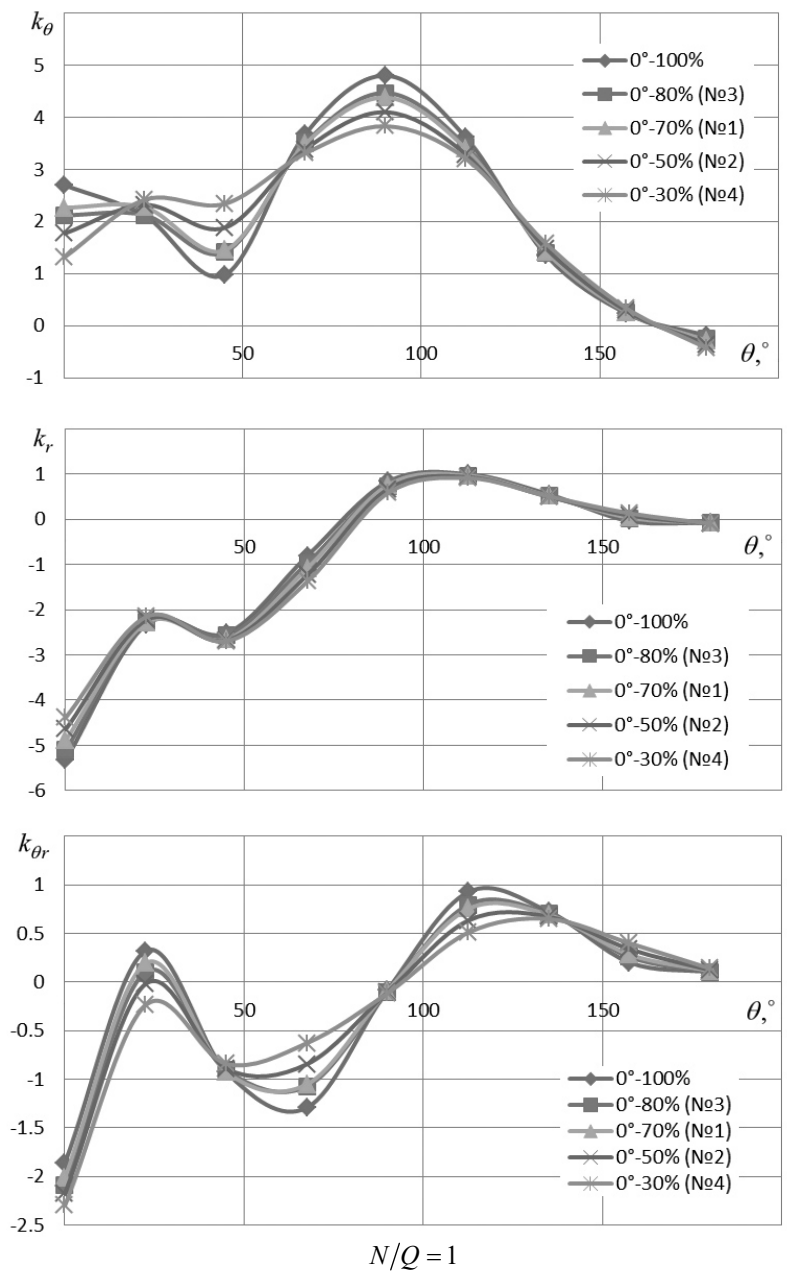


Рис. 5

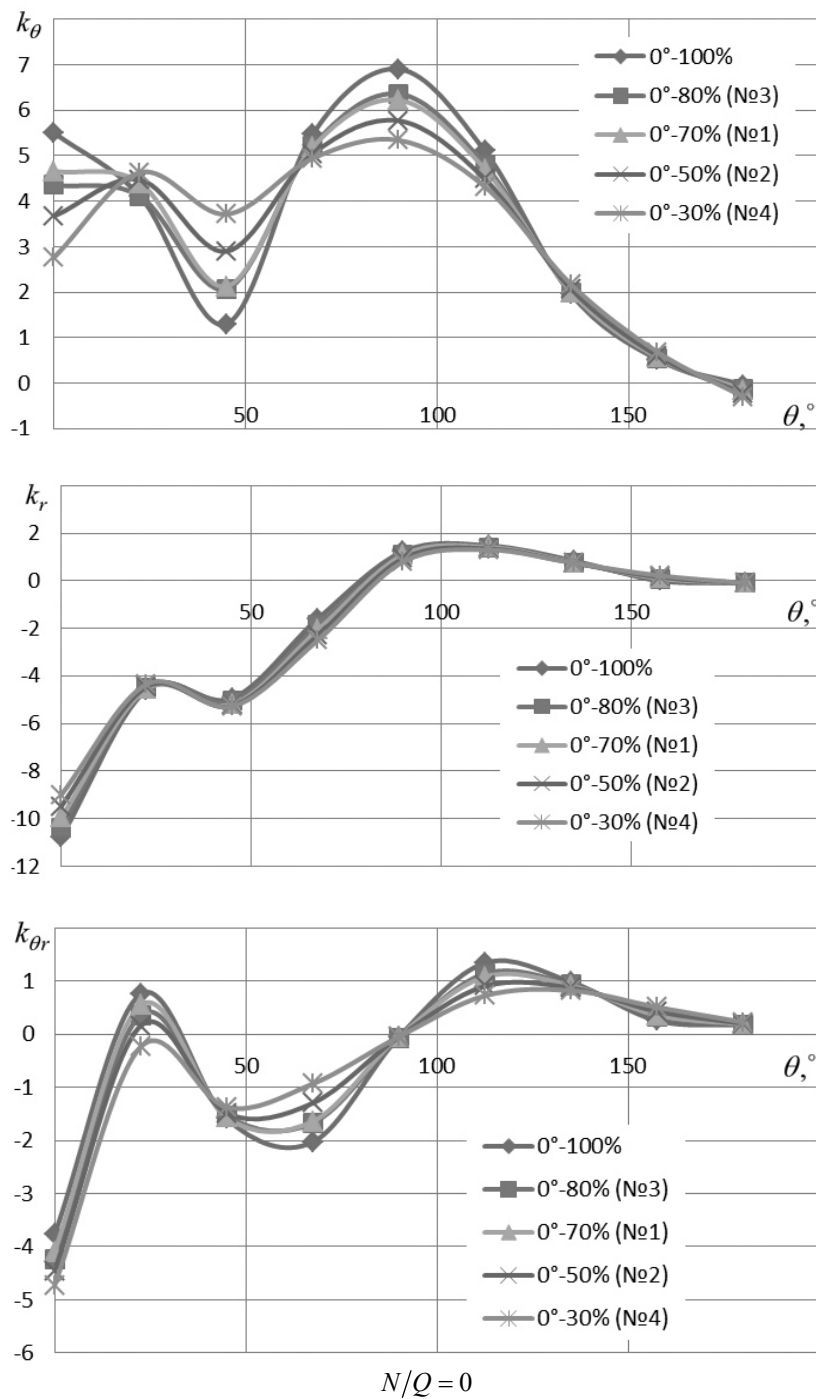


Рис. 6

Вибір формули перерахунку обґрунтувати теоретично складно, але найбільш простим бачиться одержання еквівалентного коефіцієнта концентрації напружень за аналогією з енергетичним критерієм

$$k_{eq} = \sqrt{k_{\theta}^2 + k_r^2 - k_{\theta}k_r + 3k_{\theta r}^2} . \quad (3.1)$$

Результати перерахунку показано на рис. 7.

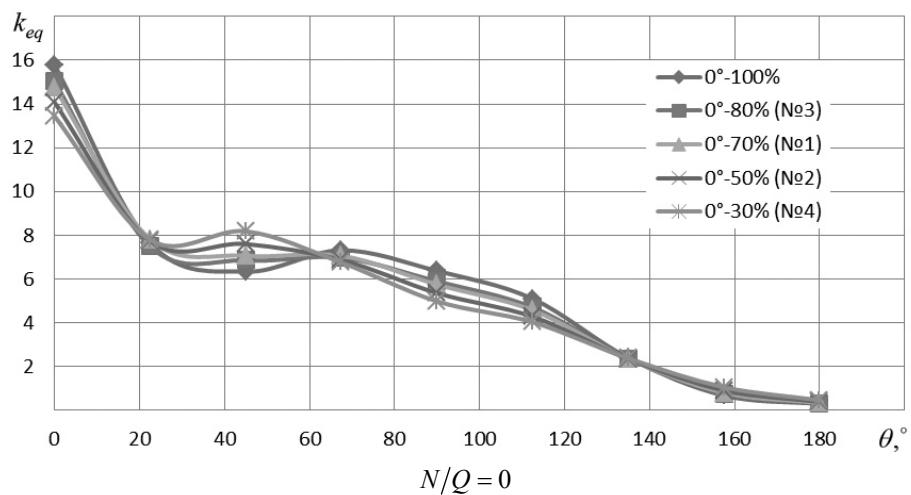
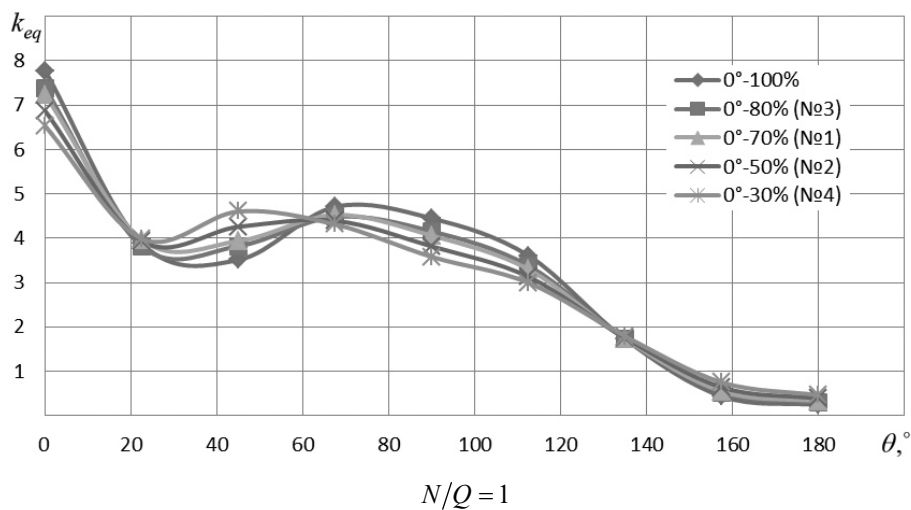
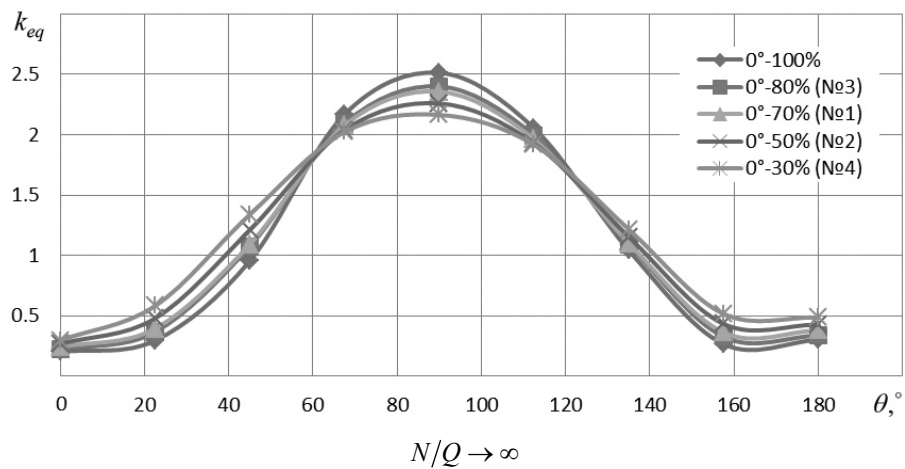


Рис. 7

Як видно на графіках, структура пакета в цілому впливає на розподіл коефіцієнта концентрації напружень по контуру, але для всіх варіантів пакетів спостерігається типова залежність від характеру передачі навантаження (рис. 8).

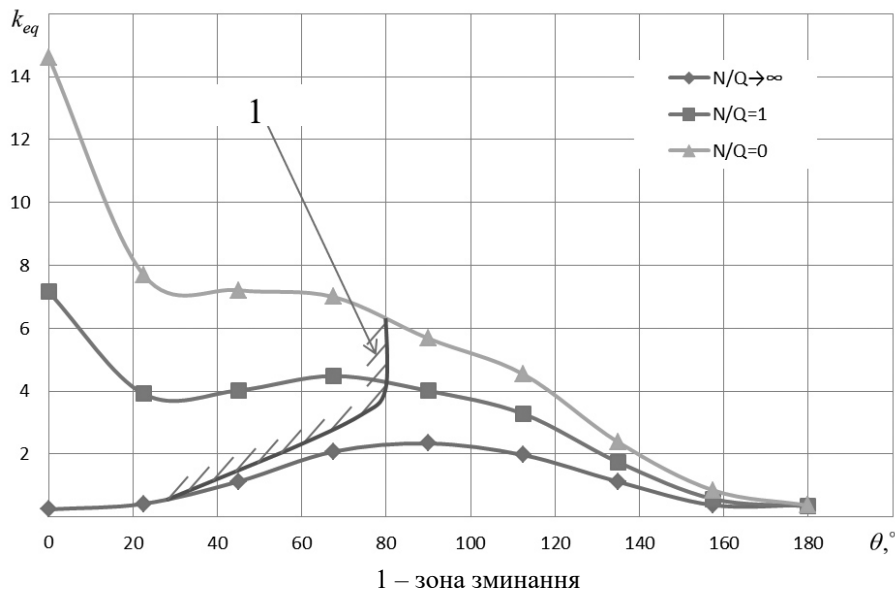


Рис. 8.

Слід зазначити, що у випадках передачі навантаження через тіло кріпильного елемента частина стінки отвору піддається змінанню ( $\sigma_r < 0$ ). У межах зони змінання розриви деталі не спостерігаються, незважаючи на істотні значення еквівалентного коефіцієнта концентрації. Для прохідної посадки точка, що обмежує зону змінання, дрейфує в межах  $\pm 80^\circ$ . Ця особливість підтверджує результати роботи [15].

Так як функція еквівалентного коефіцієнта концентрації в околі точки переходу є спадною, то руйнування відбувається безпосередньо в околі цієї точки. У випадку ненавантаженого тіла кріпильного елемента максимум коефіцієнта концентрації напружень перебуває в точці контуру отвору  $\theta = 90^\circ$ .

Виходячи з проведених досліджень було встановлено, що на розподіл еквівалентного коефіцієнта концентрації напружень домінуючий вплив має особливість навантаження деталі в межах отвору, а саме відношення «прохідного» у деталі навантаження до навантаження, яке передається кріпильним елементом ( $N/Q$ ). Максимальні значення еквівалентного коефіцієнта концентрації за межами зони змінання поверхні отвору (тобто враховується тільки область, де  $\sigma_r > 0$ ) наведено в табл. 6.

Таблиця 6

$N/Q$	0	1	$\infty$
$(k_{eq})_{max}$	6,35	4,25	2,34

Вплив структури пакета оцінюється розкидом значень коефіцієнта концентрації напружень у межах  $\pm 7...10\%$  від середнього значення.

#### §4. Експериментальні дослідження та обговорення отриманих результатів.

Наступною групою параметрів, що впливають на розподіл коефіцієнта концентрації напружень навколо отвору, є геометричні параметри елементів з'єднання. Так як вимоги до компоновання механічного з'єднання композитних деталей не допускають зменшення відстані між кріпильними елементами менше чотирьох діаметрів, то можна стверджувати, що взаємний вплив кріпильних елементів відсутній. Таким чином, доступними для аналізу залишаються тільки діаметр отвору і товщина деталі. Тут слід зазначити той факт, що як у теоретичних дослідженнях [8, 10], так і в існуючих стан-

дартах [11, 13] при оцінюванні міцності зразка послабленого отвором у розрахунки береться повна площа перерізу (без врахування площі під отвір). Максимальне значення коефіцієнта концентрації напружень оцінюється за відомою залежністю

$$k_{exp} = \frac{F_x}{F_{max}}, \quad (4.1)$$

де  $F_x$  – границя міцності зразка без отвору;  $F_{max}$  – границя міцності зразка з отвором.

У формулі (4.1)  $F_x$  за своєю суттю є характеристикою матеріалу пакета, у той час як  $F_{max}$  – є характеристика деталі. Виходячи з такого визначення коефіцієнта концентрації напружень і вхідних у нього компонентів, стає незрозуміло, чому при розрахунках на розрив в послабленому перерізі розглядають площу з урахуванням видалення матеріалу в отворі

$$\sigma_p = \frac{k_{exp} N}{(b-d)\delta} \leq F_x. \quad (4.2)$$

У цьому випадку спостерігається зниження несучої здатності, яку можна оцінити за наступною залежністю

$$k_{red} = \frac{\bar{b}-1}{\bar{b}}. \quad (4.3)$$

У формулах (4.2) і (4.3)  $k_{exp}$  – коефіцієнт концентрації напружень, що отриманий за формулою (4.1);  $k_{red}$  – коефіцієнт зниження несучої здатності;  $N$  – навантаження в деталі;  $b$  – ширина деталі;  $d$  – діаметр отвору;  $\bar{b} = b/d$  – відносна ширина деталі;  $\delta$  – товщина деталі.

При відносній ширині деталі на один кріпильний елемент 4...6 діаметрів коефіцієнт послаблення становить відповідно 0,75...0,83. Таким чином, при домінуванні руйнування на розрив деталі, несуча здатність знижується в середньому на 20% (від 25 до 17% у зазначених умовах).

Вплив товщини зразка на величину коефіцієнта концентрації вивчений недостатньо. Єдино достовірні обмеження стосуються недопущення яскраво вираженої тривимірної картини розподілу напружень у зоні отвору. Оцінювання проводиться щодо відношення діаметра отвору до товщини деталі (відносний діаметр) і прийнятним вважається, щоб відносний діаметр був більше одиниці.

Для оцінювання впливу відносного діаметра отвору на коефіцієнт концентрації напружень був використаний стандарт [11]. Згідно з вимогами стандарту було проведено контрольну серію випробувань зразків із вуглепластику ЕЛУР-008 П/ 211-БН із рівномірним розподілом по товщині пакета шарів з укладанням  $[0^{\circ}_{0,5}; \pm 45^{\circ}_{0,4}; 90^{\circ}_{0,1}]$  і з отвором діаметром  $d = 4, 5, 6, 8$  мм. Рекомендовані розміри випробуваних зразків наведено на рис. 9.

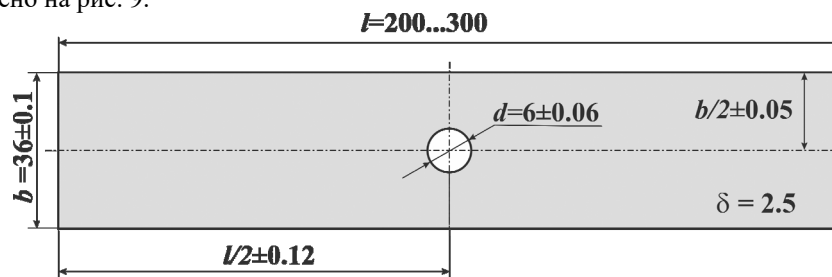


Рис. 9

Стандарт допускає відхилення розмірів зразків від рекомендованих у тому випадку, якщо вони задовольняють наступним співвідношенням:  $b/d = 6$ ,  $d/\delta = 1...3$ ,  $\delta = 2...4$  мм.

Згідно із цими співвідношеннями одержимо теоретичні значення геометричних параметрів зразків (табл. 7).

Таблиця 7

Номер зразка	$\delta$ , мм	$b$ , мм	$d$ , мм	$d/\delta$	$b/d$
1	3,48	24	4	1,15	6
2	3,48	30	5	1,43	6
3	3,48	36	6	1,72	6
4	3,48	48	8	2,30	6

Згідно вимог було виготовлено зразки. Кодування зразків проводилося згідно з наступним правилом: перша цифра – діаметр отвору, друга – порядковий номер зразка із зазначеним отвором. Геометричні параметри зразків наведено в табл. 8.

Таблиця 8

Номер зразка	$d$ , мм	$b$ , мм	$\delta$ , мм
4,1	4,0	23,92	3,84
4,2	4,0	23,91	3,52
4,3	4,0	23,83	3,87
5,1	5,0	29,76	3,84
5,2	5,0	29,85	3,65
5,3	5,0	29,7	3,75
6,1	6,0	35,54	3,85
6,2	6,0	35,76	3,66
6,3	6,0	35,85	3,71
8,1	8,1	47,62	3,73
8,2	8,1	47,85	3,40
8,3	8,0	48,00	3,68

У результаті випробувань усі зразки було розірвано в послабленому перерізі (рис. 10). Результати випробувань наведено в табл. 9.

Таблиця 9

Номер зразка	Розривне навантаження, кН	$F_{\max}$ , МПа	Осереднені значення $F_{\max}$ , МПа
4,1	27,25	296,67	332
4,2	29,50	350,89	
4,3	32,10	348,37	
5,1	30,00	262,52	296
5,2	33,50	307,16	
5,3	35,50	318,50	
6,1	33,75	246,68	292
6,2	42,25	322,52	
6,3	41,00	307,99	
8,1	43,50	244,70	290
8,2	54,25	333,15	
8,3	51,50	291,57	

Згідно з планом експериментів змінюваним параметром є відносний діаметр отворів (див. табл. 7 і 8).

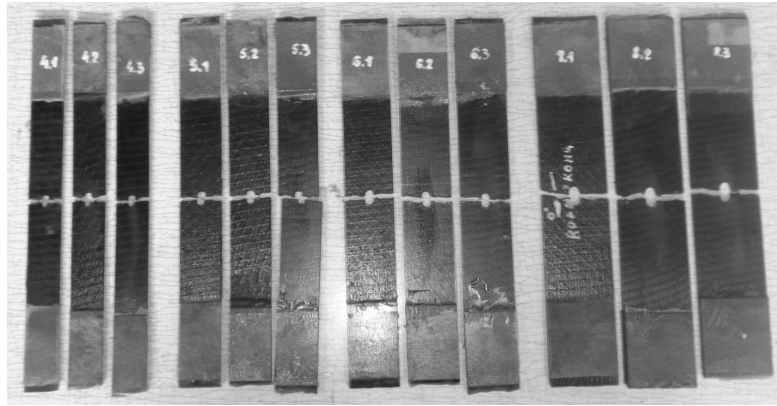


Рис. 10

Коефіцієнт концентрації напружень  $k_{exp}$  оцінювався за формулою (4.1), де значення  $F_{max}$  наведено в табл. 9, а значення  $F_x = 480$  МПа отримано раніше в роботах [2, 4] при аналізі міцності пакета.

Таким чином, було досліджено залежність між коефіцієнтом концентрації напружень і відносним діаметром отвору. Результати обробки експериментів наведено в табл. 10.

Таблиця 10

$d$ , мм	$d/\delta$	$k_{exp}$
4	1,07915	1,4458
5	1,33428	1,6216
6	1,60403	1,6438
8	2,23822	1,6552

Отримані результати були апроксимовані залежністю

$$k_{exp}(d/\delta) = -0,3647(d/\delta)^2 + 1,3753(d/\delta) + 0,4004. \quad (4.4)$$

Для порівняння проведено двовимірний аналіз із використанням методу скінченних елементів на основі моделі, що наведена на рис. 3, але без заповнення отвору. Отриманий в результаті моделювання та обробки результатів розподіл еквівалентного коефіцієнта концентрації напружень показано на рис. 11.

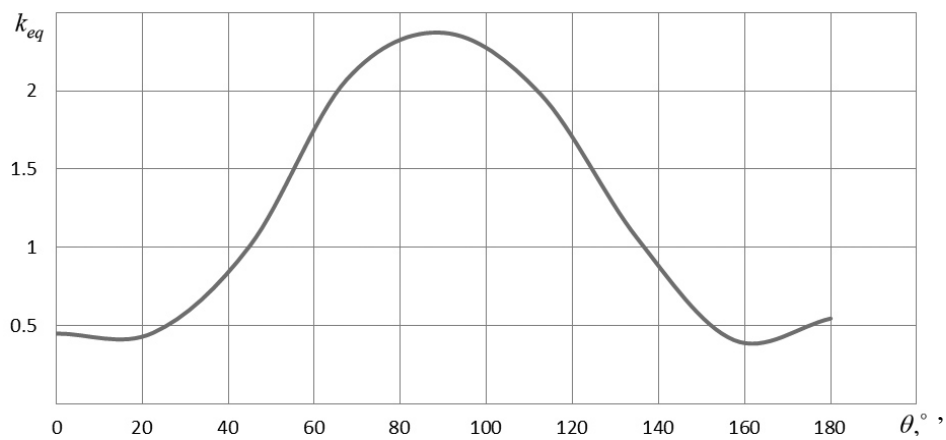


Рис. 11

Порівняння максимального значення еквівалентного коефіцієнта концентрації напруження з експериментальними даними дозволяє припустити тенденцію до збіжності цих значень при збільшенні відносного діаметра. Саме для даного варіанта навантаження зразка домінуючий вплив на формування коефіцієнта концентрації напружень виявили колові напруження ( $k_{\rho_{\max}} = 2,536$ ). Теоретичне (аналітичне) максимальне значення коефіцієнта концентрації напружень згідно [8, 10] становить 2,835. Таким чином, результати експерименту та параметричного дослідження, а також аналітична оцінка закономірно зближуються при збільшенні відносного діаметра отвору.

Слід зазначити, що теоретичні значення коефіцієнта концентрації отримані при допущенні про лінійно-пружну поведінку матеріалу зразка, що трохи завищує рівень напружень. Експериментальні ж величини коефіцієнта концентрації визначені з врахуванням можливих нелінійних процесів, що відбуваються в ПКМ аж до його руйнування.

### Висновки.

1. На підставі скінченно-елементного моделювання встановлено, що коефіцієнт концентрації напружень суттєво залежить від ступеня навантаження отвору кріпильним елементом, тобто від частки навантаження, що знімається кріпильним елементом. Це дозволило стверджувати, що використання коефіцієнта концентрації напружень у його класичному розумінні для проектування з'єднань із композитів недостатньо обґрунтоване.

2. У вигляді інженерної формули встановлено залежність коефіцієнта концентрації напружень стандартного зразка з ненавантаженим порожнім отвором від співвідношення діаметра отвору і товщини зразка.

3. Показано, що від характеристик матеріалу (структури пакета ПКМ) суттєво залежать тільки колові (по контуру отвору) нормальні напруження, у цілому ж коефіцієнт концентрації напружень слабо залежить від цих параметрів.

4. Максимуми напружень зсуву спостерігаються в околі переходу від стиску (зминання) до розтягу. Положення границі переходу від зминання (стиску) до розтягу практично не залежить від рівня навантаження і перебуває в межах  $\pm(80 \dots 90)^\circ$ .

5. Максимуми коефіцієнта концентрації напружень у навантаженого отвору спостерігаються в околі прикладання навантаження до контуру отвору, де має місце зона зминання, у якій руйнування у вигляді розриву або зсуву не спостерігається. Тому із усіх значень коефіцієнта концентрації приймаються максимальні значення за межами цієї зони, у межах  $\pm(80 \dots 90)^\circ$ .

**РЕЗЮМЕ.** Теоретично і експериментально досліджено концентрацію напружень біля отвору в полімерному композиті. На основі скінченно-елементного моделювання встановлено, що коефіцієнт концентрації напружень істотно залежить від ступеня навантаженості отвору кріпильним елементом. Отримано залежність коефіцієнта концентрації напружень зразка з ненавантаженим порожнім отвором від співвідношення діаметра отвору і товщини зразка. Експериментально показано, що від структури пакета композиту істотно залежать тільки колові нормальні напруження. Встановлено, що максимуми напружень зсуву спостерігаються в районі переходу від стиску (зминання) до розтягу. Встановлено, що максимуми коефіцієнта концентрації напружень біля навантаженого отвору спостерігаються в районі прикладання навантаження до контуру отвору, де має місце зона зминання, в якій руйнування у вигляді розриву або зсуву не спостерігається.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** механічні з'єднання, полімерні композити, концентрація напружень, отвір, скінченно-елементне моделювання, випробування зразків на розтяг.

1. Биргер И.А., Пановко Я.Г. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник: в 3-х томах. Т. 2. – Москва: Машиностроение, 1968. – 463 с.
2. Василевский Е.Т., Двейрин А.З., Карпов Я.С., Кривенда С.П. Система экспериментального обеспечения расчета на прочность механических соединений деталей из композитов // От-



- крытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2010. – № 47. – С. 42 – 52.
3. Двейрин А.З. Обзор и анализ состояния проблемы расчетно-экспериментального обеспечения проектирования агрегатов самолета из полимерных композитов с механическими соединениями деталей // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2014. – № 66. – С. 5 – 19.
  4. Двейрин А.З. Система экспериментального обеспечения расчета на прочность и проектирования механических соединений авиаконструкций из композиционных материалов: дис. канд. техн. наук: 05.07.02 / Двейрин Александр Захарович. – Киев, 2015. – 163 с.
  5. Карпов Е.В. Концентрация напряжений и разрушение вблизи круговых отверстий в композитных элементах конструкций: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.02.04 / Карпов Евгений Викторович. – Новосибирск, 2002. – 119 с.
  6. Карпов Я.С. Соединения деталей и агрегатов из композиционных материалов. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2006. – 359 с.
  7. Колтаков А.Г. Концентрация напряжений в конструкции из однонаправленного материала // ПМТФ. – 1982. – № 2. – С. 110 – 116.
  8. Лехницкий С.Г. Анизотропные пластинки. – Ленинград: ОГИЗ, 1947. – 365 с.
  9. Максименко В.Н., Олегин И.П., Пустовой Н.В. Методы расчета на прочность и жесткость элементов конструкций из композитов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – 424 с.
  10. Савин Г.Н. Распределение напряжений около отверстий. – Киев: Наук. думка, 1968. – 888 с.
  11. ASTM D5766/D5766M-07 Standard Test Method for Open-Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates. – West Conshohocken, PA: ASTM, 2011. – 7 p.
  12. ASTM D6484/D6484M-04e1 Standard Test Method for Open-Hole Compressive Strength of Polymer Matrix Composite Laminates. – West Conshohocken, PA: ASTM, 2009. – 16 p.
  13. ASTM D6742/D6742M-07 Standard Practice for Filled-Hole Tension and Compression Testing of Polymer Matrix Composite Laminates. – West Conshohocken, PA: ASTM, 2007. – 7 p.
  14. ASTM D7248/D7248M-08 Standard Test Method for Bearing/Bypass Interaction Response of Polymer Matrix Composite Laminates Using 2-Fastener Specimens. – West Conshohocken, PA: ASTM, 2008. – 30 p.
  15. Barrois W. Stresses and displacements due to load transfer by fasteners in structural assemblies // Engineering Fracture Mechanics. – 1978. – **10**, N 1. – P. 115 – 176.
  16. Barrois W. The strength of structures and the applications of the fracture mechanics // Engineering Fracture Mechanics. – 1978. – **10**, N 1 – P. 109 – 114.
  17. Bychkov A.S., Kondratiev A.V. Criterion-based assessment of performance improvement for aircraft structural parts with thermal spray coatings // J. of Superhard Materials. – 2019. – **41**, N 1, P. 53 – 59.
  18. Conti P. Influence of Geometric Parameters on the Stress Distribution Around a Pin-loaded Hole in a Composite Laminate // Composite Science and Technology. – 1986. – N 8. – P. 32 – 48.
  19. Gaidachuk V.E., Kondratiev A.V., Chesnokov A.V. Changes in the thermal and dimensional stability of the structure of a polymer composite after carbonization // Mechanics of Composite Materials. – 2017. – **52**, N 6 – P. 799 – 806.
  20. Govindan Potti P.K., Nageswara Rao B., Srivastava Y.K. Notched strength of carbon fibre/epoxy composite laminates with a circular hole // Forsch. Ingenieurs. – 2000. – N 65. – P. 295 – 300.
  21. Kondratiev A.V., Gaidachuk V.E., Kharchenko M.E. Relationships between the ultimate strengths of polymer composites in static bending, compression, and tension // Mechanics of Composite Materials. – 2019. – **55**, N 2 – P. 259 – 266.
  22. Kondratiev A.V., Kovalenko V.O. Optimization of design parameters of the main composite fairing of the launch vehicle under simultaneous force and thermal loading // Space Science and Technology: Kosmichna Nauka i Tehnologija. – 2019. – **25**, N 4(119). – P. 3 – 21.
  23. Lin K.Y., Cheng M.C., Johnson R.W. Statistical fracture analysis of notched composites // AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC. – 31st Struct., Struct. Dyn. and Mater. Conf., Long Beach, Calif., Aug. 2 – 4, 1990: Collect. Techn. Pap. – Pt 2. – P. 1168 – 1173.

24. *MIL-HDBK-17-1F* Composite materials handbook. Vol. 1 Polymer Matrix Composites Guidelines for Characterization of Structural Materials. – U.S. Department of Defense, 2002. – 586 p.
25. *MIL-HDBK-17-3F* Composite materials handbook. Vol. 3. Polymer matrix composites materials usage, design, and analysis. – U.S. Department of Defense, 2002. – 693 p.
26. *Oplinger D.W.* On the Structural Behavior of Mechanically Fastened Joints in Composite Structures. In: Leno E.M., Oplinger D.W., Burke J.J. (eds) *Fibrous Composites in Structural Design*. – Springer, Boston, MA, 1980. – P. 575 – 602.
27. *Outwater J.O.* The Fundamental Mechanics of Reinforced Plastics // *Paper Amer. Soc. Mech. and Eng.* – 1956. – N A20-1. – 11 p.
28. *Rudakov K., Dyfuchyn Yu.* About calculations of net-tension failure of a bolted joint on the weakened by hole cross-section of composite plate // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2018. – N 1 (82). – P. 58 – 66.
29. *Rudakov K., Dyfuchyn Yu., Babienko S.* Stress concentration factor near loaded hole contacting with the bolt in the monolayer of orthotropic composite material // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2019. – N 1 (85). – P. 41 – 48.
30. *Soutis C., Filion C., Pateau V.* Strength prediction of fiber reinforced plastics with a hole under compression-tension // *AIAA J.* – 2000. – **38**, N 1. – P. 110 – 114.
31. *SRM 3-88 SACMA* Recommended Test Method for Open-Hole Compression Properties of Oriented Fiber-Resin Composites. – Suppliers of Advanced Composite Materials Association, Arlington, VA, 1988. – 10 p.
32. *Switka R.* Equations of the fibre composite plates // *Eng. Trans.* – 1992. – **40**, N 2. – P. 187 – 201.
33. *Tung T.K.* On computation of stresses around holes in anisotropic plates // *J. Compos. Mater.* – 1987. – **21**, N 2. – P. 100 – 104.
34. *Yang F., Chow C.L.* Progressive damage of unidirectional graphite/epoxy composites containing a circular hole // *J. Compos. Mater.* – 1998. – **32**, N 6. – P. 504 – 525.

Надійшла 13.05.2019

Затверджена до друку 15.12.2020

---