

ВПЛИВ СМУГОВИХ НАКЛАДОК НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ПЛАСТИНИ З ВИДОВЖЕНИМ ПРЯМОКУТНИМ ОТВОРОМ¹Інститут технічної механікиНаціональної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна²Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,
пр. Гагаріна, 72, 49010, Дніпро, Україна; e-mail: hart@ua.fm

Розглянуто напружено-деформований стан пружної квадратної пластини з прямокутним видовженим отвором, підкріпленням на бічних сторонах прямокутними накладками. Ціль роботи – дослідження впливу параметрів накладок та орієнтації отвору (розташування більшої та меншої сторін отвору відносно напрямку навантаження) на зменшення інтенсивності напружень та деформацій у пластині в місцях розташування локальних концентраторів напружень. Матеріал підкріплюючих елементів відрізняється від матеріалу пластини. Комп'ютерне моделювання і розрахунки проведені з використанням варіаційно-сіткового методу скінченних елементів. У результаті проведеного дослідження виявлені найбільш прийнятні геометричні і механічні характеристики підкріплень та місця їх розташування. У цілому продемонстровано, що вдалий вибір параметрів підкріплень може зменшити концентрацію напружень у пластині. Отримані в роботі результати можуть бути використані для підвищення міцності конструкцій, складовими яких є тонкостінні пластини з прямокутними отворами, з малими витратами матеріалу для включень.

Рассмотрено напряженно-деформированное состояние упругой квадратной пластины с прямоугольным продолговатым отверстием, подкрепленным на боковых сторонах прямоугольными накладками. Цель работы – исследование влияния параметров накладок и ориентации отверстия (расположение большей и меньшей сторон отверстия относительно направления нагрузки) на уменьшение интенсивности напряжений и деформаций в пластине в местах расположения локальных концентраторов напряжений. Материал подкрепляющих элементов отличается от материала пластины. Компьютерное моделирование и расчеты проведены с использованием вариационно-сеточного метода конечных элементов. В результате проведенного исследования определены наиболее приемлемые геометрические и механические характеристики подкреплений и места их расположения. В целом продемонстрировано, что удачный выбор параметров подкреплений может уменьшить концентрацию напряжений в пластине. Полученные в работе результаты могут быть использованы для повышения прочности конструкций, составляющими которых являются тонкостенные пластины с прямоугольными отверстиями, при малых затратах материала для включений.

This paper considers the stress and strain field in an elastic square plate with an elongated rectangular opening whose sides are reinforced with rectangular inserts. The aim of this work is to study the effect of the insert parameters and the opening orientation (the orientation of the major and the minor sides of the opening relative to the load direction) on the reduction of the stress and strain intensity in the plate at stress concentration sites. The material of the reinforcing inserts differs from that of the plate. Using the variational grid finite-element method, computer simulation and calculations were conducted to determine the most suitable geometric and mechanical characteristics of the reinforcing inserts and their locations. It was shown that the proper choice of the reinforcing insert parameters reduces the stress concentration in the plate. The results obtained may be used in increasing the strength of structures that include thin-walled plates with rectangular openings at low material consumption for reinforcing inserts.

Ключові слова: пружна пластина, прямокутний видовжений отвір, підкріплення, напружено-деформований стан, коефіцієнт концентрації напружень, метод скінченних елементів.

Вступ. Підкріплення отворів принципово впливає на напружено-деформований стан пластинчато-оболонкових елементів конструкцій шляхом значної зміни концентрації напружень. Досягнення у цьому напрямку пов'язані, у першу чергу, з дослідженнями українських вчених [1, 4 – 6, 11].

Перші дослідження підкріплених отворів належать С. П. Тимошенку і Дж. Лессельсу [12], які звели задачу визначення напружень біля отвору до знаходження напружень у кривому брусі, навантаженому по зовнішньому контуру.

© В. С. Гудрамович, Е. Л. Гарт, С. В. Панченко, 2018

Техн. механіка. – 2018. – № 1.

Вивчення впливу підкріплених отворів ставить питання про оптимізацію елементів конструкцій. До перших досліджень в цьому напрямку слід віднести [6].

У [3] досліджується питання про можливість зниження концентрації напружень в околі кутових точок прямокутного отвору пластини за рахунок його підкріплення трикутними накладками з іншого матеріалу. При цьому проведено комп'ютерне моделювання деформування пластини в залежності від орієнтації отвору, механічних властивостей матеріалу та розмірів накладок. Виявлено, що підбір оптимальних параметрів підкріплень може зменшити концентрацію напружень.

Деякі питання впливу підкріплень на деформування елементів конструкцій з отворами вивчено у [8]. У даній роботі проводиться комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану (НДС) пружної квадратної пластини з прямокутним підкріпленим видовженим отвором за допомогою пакету прикладних програм. Мета дослідження – вплив параметрів накладок та орієнтації отворів на зменшення інтенсивності напружень та деформацій у пластині в місцях розташування локальних концентраторів напружень.

Постановка задачі. Дана пружна квадратна тонка пластина зі стороною довжини a , яка послаблена видовженим прямокутним отвором розміром $b \times c$.

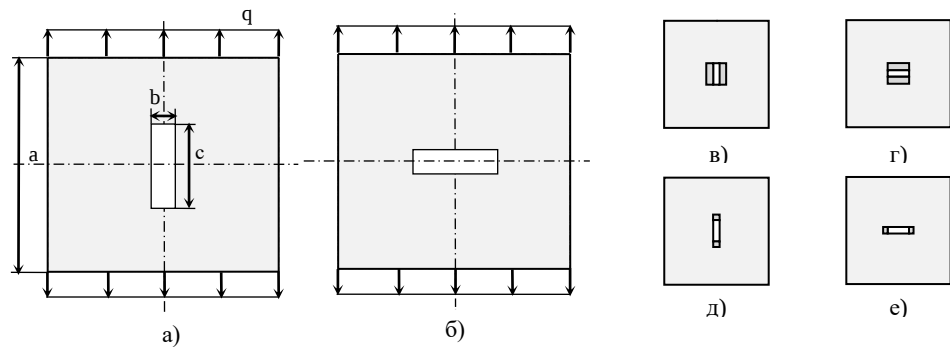


Рис. 1 – Схема навантаження пластини (а, б) та варіанти підкріплень (в–е)

Пластина знаходиться під дією розтягуючих зусиль q (рис. 1). Масовими силами нехтуємо. Більша сторона отвору розташована вздовж напрямку прикладеного навантаження (рис. 1, а)) або перпендикулярно до нього (рис. 1, б)). Проводиться дослідження НДС пластини в місцях концентрації напружень з урахуванням впливу накладок біля отвору (рис. 1, в) – рис. 1, е)). Накладки будемо моделювати включеннями, що розташовані у площині пластини і на границях яких з матрицею задані умови жорсткого зчеплення. Задачу визначення НДС пластини (рис. 1, а)) надалі будемо називати задача А, а за схемою рис. 1, б) – задача Б.

Розглянемо варіанти включень різного розміру, механічних властивостей та розташування. Необхідно з'ясувати, включення якої ширини буде давати найкращий результат з точки зору зменшення деформацій в околі локального концентратора напружень та витрат матеріалу.

Аналіз отриманих результатів. Комп'ютерне моделювання і розрахунки проведені з використанням варіаційно-сіткового методу скінченних елементів [7, 10] в складі стандартного пакету МСЕ-аналізу на ПК з процесором

Intel core i3, 4 core – 2.3 GHz, 4 GB RAM. Час розрахунків у середньому дорівнює 15 хв за використанням 20 млн. скінченних елементів.

На рис. 2, а) наведено розподіл інтенсивності напружень σ_i у пластині з прямокутним отвором без включень при вертикальному розташуванні отвору (задача А), при цьому коефіцієнт концентрації напружень (ККН) дорівнює 6,5. При розташуванні отвору з поворотом на 90° (задача Б) ККН дорівнює 11 (рис. 2, б)).

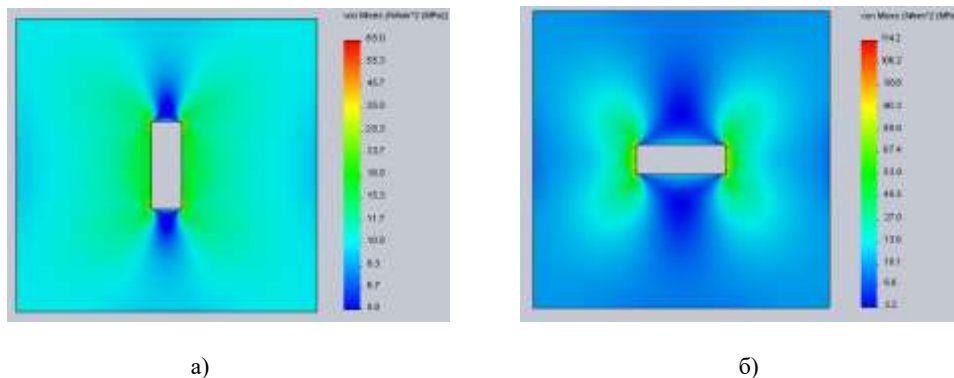


Рис. 2 – Розподіл інтенсивності напружень σ_i [МПа] у пластині з прямокутним отвором без включень

З метою зниження концентрації напружень у пластині отвір було підкріплено включеннями з іншого матеріалу. Зміна матеріалу пластини розглядається як зміна модуля пружності у деякому перехідному шарі [3].

Задача А. На рис. 3 представлено розподіл відносної інтенсивності напружень σ_i/q у перерізі D_1 – D_4 пластини у випадку рис. 1, в). Здійснимо порівняння результатів для різних співвідношень модуля пружності пластини та включень.

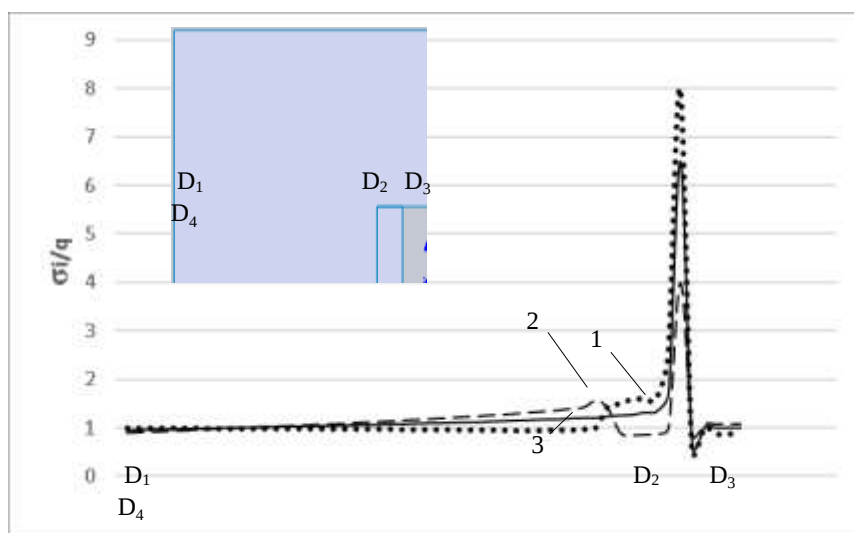


Рис. 3 – Розподіл σ_i/q у перерізі D_1 – D_4 : 1 – пластина без включень; 2 – співвідношення модуля пружності включень та пластини 1:3; 3 – 3:1

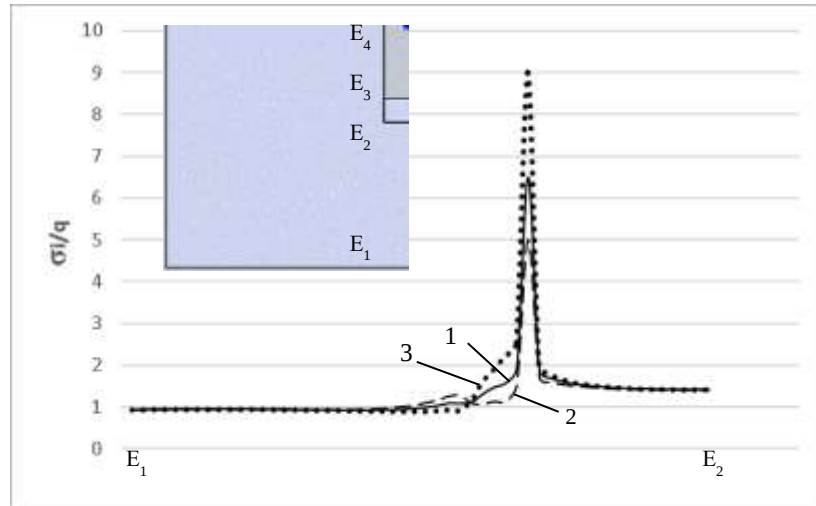


Рис. 4 – Розподіл σ_i/q у перерізі $E_1 - E_4$: 1 – пластина без включень; 2 – співвідношення модуля пружності включень та пластини 1:3; 3 – 3:1

Наявність менш жорстких, ніж основний матеріал, підкріплень у розглянутому випадку призвела до зменшення ККН на $\sim 35\%$.

Для випадку підкріплень, зображених на рис. 1, д), маємо результати, подані у вигляді розподілу σ_i/q у перерізі $E_1 - E_4$ (рис. 4).

В обох випадках розташування підкріплень (рис. 1, в), рис. 1, д)) ККН зменшується при співвідношенні модуля пружності пластини та підкріплень, рівному 3:1. У випадку, зображеному на рис. 1, в), концентрацію напружень вдалось зменшити на $\sim 23\%$ (рис. 5, лінія 2). При зміні ширини підкріплень у межах від $b/2$ до b ККН майже не змінюється, тому доцільно використовувати підкріплення меншої ширини, що дає можливість знизити напруження за малих витрат матеріалу для підкріплень.

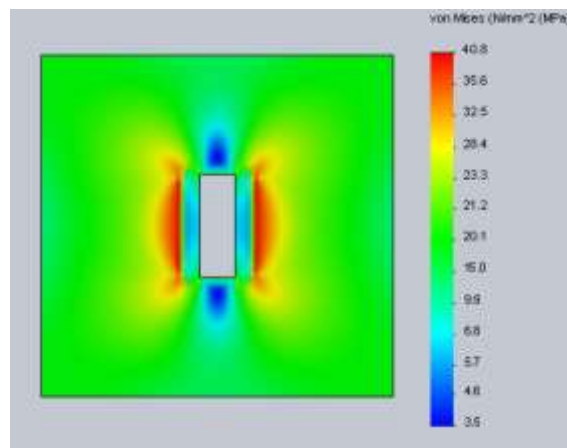


Рис. 5 – Розподіл інтенсивності напружень σ_i [МПа] для співвідношення модуля пружності включень та пластини 1:3

Задача Б. На рис. 6 представлено розподіл відносної інтенсивності напружень σ_i/q у перерізі $L_1 - L_4$ пластини у випадку включень, зображених на рис. 1, г).

У цьому випадку концентрація напружень зменшується на $\sim 21\%$ (рис. 6, лінія 2) у порівнянні з пластиною без підкріплень.

На рис. 7 подано розподіл σ_i/q у перерізі $K_1 - K_4$ пластини для випадку розташування включень, зображеного на рис. 1, е). У цьому випадку концентрація напружень зменшилась на $\sim 24\%$ (лінія 2).

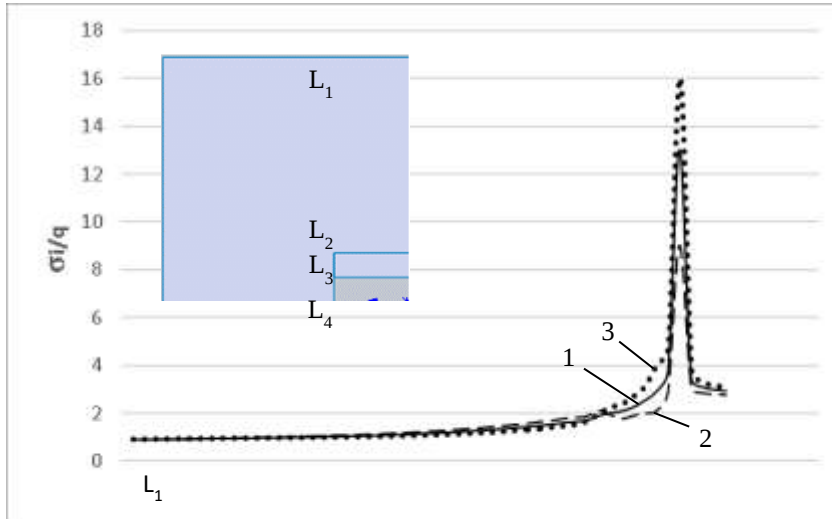


Рис. 6 – Розподіл σ_i/q у перерізі $L_1 - L_4$: 1 – пластина без включень;
2 – співвідношення модуля пружності включень та пластини 1:3;
3 – співвідношення модуля пружності включень та пластини 3:1

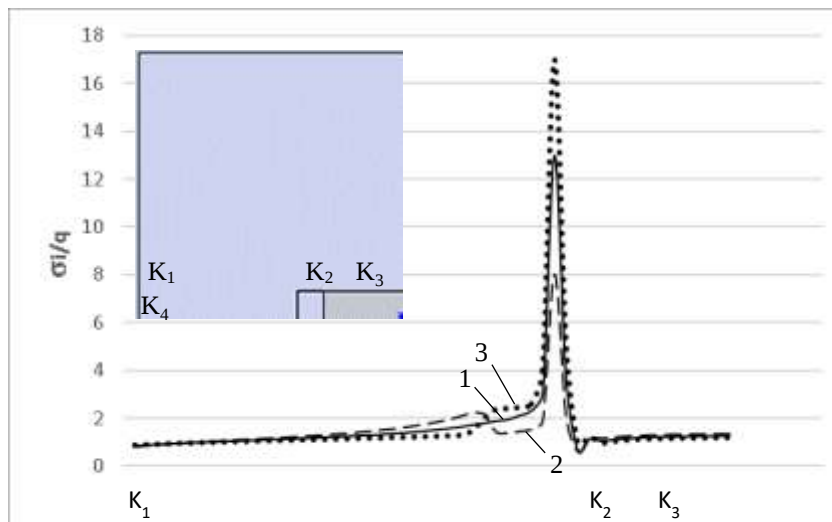


Рис. 7 – Розподіл σ_i/q у перерізі $K_1 - K_4$: 1 – пластина без включень;
2 – співвідношення модуля пружності включень та платини 1:3;
3 – співвідношення модуля пружності включень та пластини 3:1

Із рис. 6 і рис. 7 видно, що навіть при розташуванні підкріпленого отвору більшою стороною перпендикулярно напрямку навантаження виникають більші напруження, ніж при розташуванні підкріпленого отвору вздовж напрямку навантаження.

На рис. 8 зображено розподіл інтенсивності напружень для найкращого з розглянутих варіантів пластини з підкріпленням отвором, більша сторона якого розташована перпендикулярно напрямку дії навантаження (рис. 1, е)). Аналіз результатів, поданих на рис. 5 і рис. 8, показує, що концентратори напружень з'явилися також по краях підкріплень, але величина максимальних напружень зменшилась.

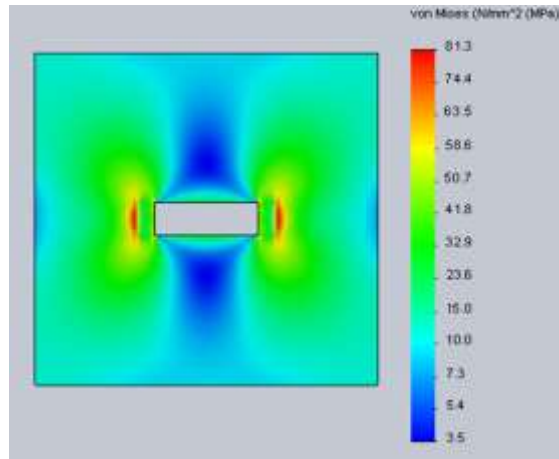


Рис. 8 – Розподіл інтенсивності напружень σ_i [МПа] для співвідношення модуля пружності пластини та включень 3:1

Висновки. Визначено НДС пластини, послабленої прямокутним отвором, що підкріплюється включеннями з іншого матеріалу. За результатами визначення ККН для усіх розглянутих випадків було виявлено:

- 1) при розташуванні повздовжнього отвору більшою стороною вздовж напрямку навантаження виникають менші максимальні за величиною напруження, ніж при розташуванні отвору більшою стороною перпендикулярно напрямку дії навантаження;
- 2) підкріплення отвору включеннями з іншого матеріалу дало змогу зменшити напруження у місцях їх концентрації на ~35 %;
- 3) при зміні ширини включень від $b/2$ до b ККН майже не змінюється.

Отже, з точки зору зменшення напружень у пластині, найкращим варіантом у проведених дослідженнях виявилась пластина з отвором, більша сторона якого розташована вздовж напрямку дії навантаження, з підкріпленням шириною $b/2$. Це дає змогу підвищити міцність тонкостінних конструкцій, складовими яких є пластини з прямокутними отворами, з малими витратами матеріалу для включень.

1. Вайнберг Д. В. Концентрация напряжений в пластинах около отверстий и выкружек: справочное пособие. К.: Техніка, 1969. 220 с.
2. Гарт Э. Л., Панченко С. В. Компьютерное моделирование напряжённо-деформированного состояния упругой пластины с прямоугольным отверстием, подкреплённым в углах. Математичні проблеми технічної механіки – 2015: Матеріали міжнародної наукової конференції (Дніпропетровськ, 14–17 квітня

- 2015 р.). Дніпродзержинськ, Дніпропетровськ: Дніпродзерж. держ. техн. ун-т, Нац. металург. Акад. України, 2015. С. 81.
3. Гарт Э. Л., Панченко С. В. Численный анализ напряженно-деформированного состояния пластины с прямоугольным отверстием, подкрепленным треугольными накладками. Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. Дніпропетровськ: Ліра, 2015. Вип. 24. С. 35–47.
 4. Гудрамович В. С. Влияние отверстий на предельные состояния элементов тонкостенных металлических оболочечно-пластинчатых конструкций. Вісник Дніпропетр. ун-ту. Сер.: Механіка. 2014. Вип. 18. Т. 2. С. 47–60.
 5. Гудрамович В. С., Гарт Е. Л., Рябоконь С. А. Моделювання та дослідження впливу підкріплень прямокутних отворів на напружено-деформований стан пластини. Математичні проблеми механіки неоднорідних структур: матеріали IX міжн. наук. конф. під заг. ред. І. О. Луковського, Г. С. Кіта, Р. М. Кушніра (Львів, Україна: вересень 2014 р.). Львів: Ін-т прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАНУ, 2014. С. 43–46.
 6. Гузь А. Н. Методы расчета оболочек. В 5 т. Т. 1. Теория оболочек, ослабленных отверстиями. К. : Наук. думка, 1980. 636 с.
 7. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 541 с.
 8. Мавлютов Р. Р. Концентрация напряжений в элементах авиационных конструкций. М.: Наука, 1981. 141 с.
 9. Москаковський В. И., Кваша О. М. Конструкція та розрахунок люків, які не викликають концентрації напружень у сферичних оболонках. Прикладна механіка. 1959. Т. 5, № 4. С. 371–378.
 10. Оден Дж. Т. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. М.: Мир, 1976. 464 с.
 11. Преображенский И. Н., Цурпал И. А. Вырезы в несущих конструкциях. М.: Машиностроение, 1984. 112 с.
 12. Тимошенко С. П., Лессельс Дж. Прикладная теория упругости. М.; Л.: ОНТИ, 1931. 340 с.

Получено 23.01.2018,
в окончательном варианте 15.02.2018