

УДК 624.072.014.2

Микола Підгурський¹, д.т.н., проф.; Наталія Макаренко², д.т.н., проф.; Микола Сташків¹, к.т.н., доц.; Іван Підгурський¹, к.т.н., доц.; Денис Биків¹, Віталій Сенчишин¹

¹Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

²Донбаська державна машинобудівна академія, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНЬ НАВКОЛО ПІДСИЛЕНИХ ОТВОРІВ В ПРИОПОРНІЙ ЗОНІ ПЕРФОРОВАНИХ ДВОТАВРОВИХ БАЛОК

Анотація. Моделюванням за допомогою МСЕ визначені місця з максимальними еквівалентними напруженнями у перфорованих сталевих двотаврових балках. Наведені методи підсилення приопорних ділянок та визначено які з них ефективніше зменшують напруження навколо отворів.

Ключові слова: перфоровані балки, підсилення отворів, еквівалентні напруження

Mykola Pidgurskyi, Nataliia Makarenko, Mykola Stashkiv, Ivan Pidgurskyi, Denys Bykiv, Vitalii Senchyshyn

INVESTIGATION OF STRESSES AROUND REINFORCED OPENINGS IN THE SUPPORT ZONE OF PERFORATED I-BEAMS

Abstract. Using the finite element method (FEM), the regions of maximum equivalent stresses in perforated steel I-beams were identified. Methods for strengthening the support zones were presented, and their effectiveness in reducing stresses around the openings was evaluated.

Keywords: perforated beams, opening reinforcement, equivalent stresses

Перфоровані двотаврові балки широко застосовуються у багатьох сферах інжинірингу (машинобудуванні, суднобудуванні, будівництві, приладобудуванні, тощо). Завдяки різним методам їх виготовлення вони можуть мати меншу вагу і бути ефективнішими за суцільні балки такого ж перерізу [1, 2].

Для деяких сфер найголовнішим показником є зменшення ваги конструкції, тому при виготовленні отворів безпосередньо в стінці балки їх загальна ефективність збільшується (відношення міцності/жорсткості до ваги), при цьому значення напружень і прогинів зростають у порівнянні з суцільною балкою.

В інших сферах перфоровані балки застосовують для збільшення характеристик міцності та жорсткості конструкцій, що досягається збільшенням висоти самого перерізу балки. У цьому випадку прогини та напруження в полицях двотавра зменшуються (в порівнянні із первісною балкою), проте напруження навколо отворів можуть суттєво зрости в декілька разів в порівнянні із напруженнями в полицях. Тому саме навколо отворів виникають пластичні деформації та тріщини.

Так, у роботі (Романюка В. та ін., 2024) [3] досліджені напруження, що виникають навколо отворів перфорованих аркових балок із поперечною затяжкою. Встановлено, що напруження навколо отворів безпосередньо біля кріплення затяжки є максимальними, а встановлення ребер жорсткості чи заварювання даних отворів покращують експлуатаційні властивості конструкції.

У роботі (Zeytinci В. М. та ін. 2021) [4] виконано дослідження напружено-деформівного стану в нелінійній постановці для перфорованих сталевих балок із підсиленими круглими отворами. Визначено зсувну та нормальну міцність балок для трьох типів перфорації із підсиленням.

У роботі (Підгурського М. та ін., 2026) [5] розглянуто розподіл еквівалентних напружень навколо отворів у сталевих перфорованих двотаврових балках. Виявлено,

що застосування «вут» зменшують напруження навколо крайніх отворів. Проте для інших отворів напруження залишаються такими ж, як і для випадку без «вут», а подекуди і більшими.

У даній роботі проведено чисельне моделювання перфорованих балок в програмному комплексі ANSYS методом скінченних елементів із дослідженням еквівалентних напружень у балках та навколо отворів. Середній розмір скінченного елемента становив 20 мм.

Досліджено три варіанти балок: горизонтальні, двосхилі з ухилом 5° та аркові (з відповідним підйомом як у двосхилих) за граничних умов – жорстке защемлення обох країв балок із розпором. Перфоровані балки отримано методом зигзагоподібного розрізання двотавра вздовж стінки та послідовного зварювання виступів двох частин. За початкову балку прийнято двотавр ІРЕ 400, отвори перфорації круглі з діаметром 518 мм та кроком 570 мм. Загальна висота перфорованої балки становила 657,6 мм. Моделювались балки довжиною 24 м при рівномірно розподіленому навантаженні 6,6 кН/м.

Оскільки найбільших напружень зазнають три перші отвори перфорації, то в роботі досліджено підсилення саме крайніх отворів. Розглядалось підсилення одиничного отвору та комбінацій отворів. Для підсилення використано два методи: 1-й – повне заварювання отвору пластиною відповідного діаметру товщиною 8,6 мм, що відповідає товщині стінки двотавра та 2-й – обварювання отвору трубчастою обоймою відповідного діаметра, шириною 58 мм, що утворює виступи по обидва боки стінки на 25 мм. Товщина трубчастої обойми – 5 мм (мінімальна товщина труби для діаметру відповідного сортаменту).

На рисунку 1 представлені поля напружень навколо крайніх отворів перфорації горизонтальних, двосхилих та аркових балок без підсилення та з підсиленням заварюванням чи круглою обоймою.

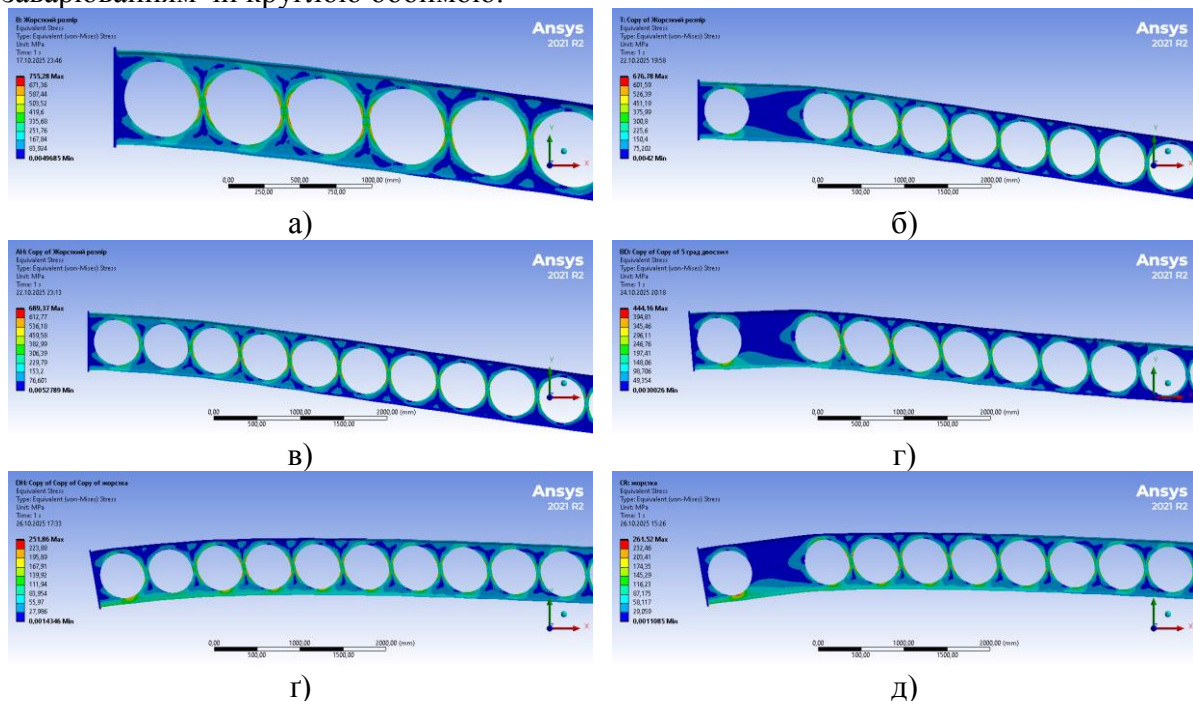


Рисунок 1 – Поля напружень в перфорованих балках навколо крайніх отворів:

- а) – горизонтальна без підсилення; б) – горизонтальна із заварюванням 2-го отвору; в) – горизонтальна із обоймою навколо 2-го отвору; г) – двосхила із заварюванням 2-го отвору; ґ) – аркова із обоймою навколо 2-го отвору; д) – аркова із заварюванням 2-го отвору

На рисунку 2 представлено діаграми зміни максимальних напружень навколо отворів вздовж балок (на рис. 2 (а) представлені результати напружень до середини балки, на рис. 2 (б-д) представлені результати до 8-го отвору включно, оскільки інші зазнають мінімальних змін). Варто зазначити, що у процесі чисельного моделювання в зонах навколо перфорацій отримано еквівалентні напруження, що перевищують границю текучості сталі, що зумовлено значною концентрацією напружень та особливостями скінчено-елементного аналізу. Отримані результати мають порівняльно-аналітичний характер і використовувались насамперед для оцінки ефективності різних способів підсилення перфорованих балок.

Для всіх видів балок заварювання одного отвору збільшувало вагу балки на 1,9%, двох – на 3,7%, трьох – на 5,5%, тоді як обрамлення одного отвору обоймою збільшувало вагу на 0,5%, двох – на 1,0% , трьох – на 1,5%.

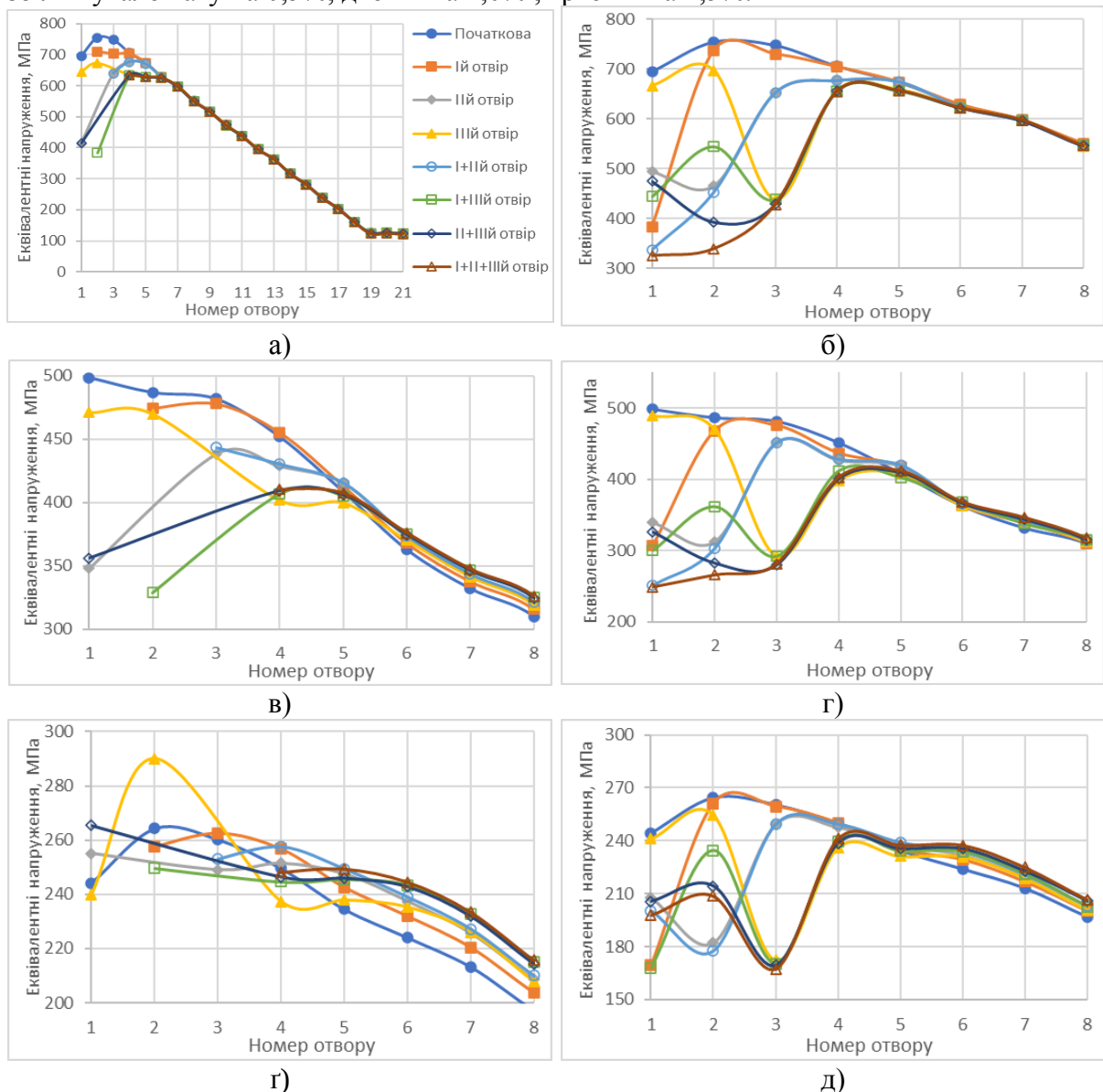


Рисунок 2 – Зміна максимальних значень еквівалентних напружень навколо отворів перфорації при їх підсиленні:

а) – горизонтальна балка із заварюванням; б) – горизонтальна із обоймою; в) – двосхила балка із заварюванням; г) – двосхила із обоймою; г) – аркова балка із заварюванням; д) – аркова із обоймою

Для горизонтальних балок встановлено, що найбільш ефективним способом підсилення при заварюванні (див. рис. 2(а)) є одночасне заварювання I та III отворів або II та III отворів, що забезпечує зменшення максимальних еквівалентних напружень до 16,0% при збільшенні маси балки на 3,7%. При цьому заварювання лише III-го отвору дозволяє знизити напруження на 11,1% при мінімальному збільшенні ваги на 1,9%. Обрамлення отворів круглою обоймою (див. рис. 2(б)) виявилось більш раціональним з точки зору матеріалоемності, оскільки підсилення двох отворів (а саме I і III) забезпечує зниження напружень до 13,1% при збільшенні ваги лише на 1,0%.

Для двосхилих балок отримано найбільшу ефективність при комбінованому підсиленні двох отворів. Заварювання I та III отворів (див. рис. 2(в)) забезпечує зменшення максимальних напружень на 18,4%, тоді як обрамлення II та III отворів (див. рис. 2(г)) круглою обоймою знижує напруження на 17,8% при збільшенні ваги балки лише на 1,0%. Встановлено, що підсилення трьох отворів не забезпечує суттєвого додаткового ефекту у порівнянні з підсиленням двох, однак супроводжується помітним збільшенням матеріаломісткості.

Для аркових балок ефективність заварювання отворів (див. рис. 2(г)) виявилась значно нижчою. Максимальне зниження напружень при заварюванні трьох отворів становить лише 5,6% при збільшенні ваги балки на 5,5%. Крім того, заварювання окремих отворів у деяких випадках призводить до зростання напружень, зокрема заварювання III-го отвору викликало збільшення напружень на 9,7%. Натомість підсилення круглими обоймами (див. рис. 2(д)) показало кращу ефективність: обрамлення II та III отворів забезпечило зниження максимальних напружень на 9,7% при збільшенні ваги балки лише на 1,0%.

Встановлено, що обрамлення отворів круглими обоймами є більш ефективним способом локального підсилення перфорованих балок порівняно із заварюванням, оскільки забезпечує близький або співставний рівень зниження напружень при значно меншому збільшенні маси конструкції. Найбільш раціональним є підсилення двох приопорних отворів, тоді як підсилення трьох отворів у більшості випадків не покращує НДС конструкції при збільшенні матеріаломісткості. Важливо зазначити, що безконтрольне заварювання отворів в деяких випадках може погіршити характеристики міцності конструкції.

Перелік посилань

1. Pidgurskyi I., Slobodian V., Bykiv D., Pidgurskyi M. (2021) Investigation of the stress-strain state of beams with different types of web perforation. Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol 103, no 3, pp. 79–87.
2. Методи виготовлення сталевих перфорованих двотаврових балок з регулярною та нерегулярною структурою отворів / Денис Биків, Андрій Кос, Олег Підлужний, Іван Підгурський, Микола Підгурський // Матеріали I МНТК „Прикладна механіка“, 6-7 червня 2024 р. — Т. : ТНТУ, 2024. — С. 76–79.
3. Romaniuk V., Bezniuk L., Supruniuk V., Kononchuk O., Meshcheryakova O., Sorochak A. (2024) Features of the work of continuous perforated beams near intermediate supports. Procedia Structural Integrity 59, 471–478.
4. Zeytinci B., Sahin M., Güler M., Tsavdaridis K. (2021) A practical design formulation for perforated beams with openings strengthened with ring-type stiffeners subject to Vierendeel actions. Journal of Building Engineering 43, 102915.
5. Pidgurskyi M., Bykiv D., Pidgurskyi I., Stashkiv M., Senchyshyn V., Pidlyzhnyi O., Kos A. (2026) Assessment of the Stress-Strain State around Circular Openings in Double-Pitched and Arched Perforated Beams. Procedia Structural Integrity 81, 439–446.