

УДК 624.014.2

DOI <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2026.40.7>

ОСОБЛИВОСТІ ГЕНЕРАЦІЇ ДВОТАВРОВИХ БАЛОК ЗМІННОЇ ВИСОТИ З ПЕРФОРОВАНОЮ СТІНКОЮ З ВИКОРИСТАННЯМ СКРИПТОВОГО ПІДХОДУ

Годзинський Іван Ігорович

аспірант кафедри комп'ютерних технологій будівництва,
Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна,
e-mail: ivan.godzynskyi@gmail.com, orcid: 0009-0007-5667-2286

Анотація. Мета. Підсвітити особливості скриптової генерації двотаврової балки з перфорованою стінкою для подальшого імпорту в програмний комплекс ЛІРА-САПР з можливістю дослідження напружено-деформованого стану балок з різними конфігураціями різів перфорованої стінки.

Методологія. В дослідженні застосовано скриптовий підхід до написання коду генерації об'ємної моделі балки з перфорованою стінкою, заданої чотири-вузловими пластинчастими елементами. Цей підхід включає аналіз форматів для імпорту в ЛІРА-САПР, створення поліліній, полігональних сіток, з'єднань стінки з полицями, частин стінки між собою, ребрами жорсткості, додавання в'язей, навантажень. Це полегшить створення великої кількості конструктивно схожих, але різних за параметрами розрахункових схем.

Результати. Створено програмний скрипт на мові програмування Python, який за лічені секунди створює модель шарнірно-опертої двотаврової балки змінної висоти з перфорованою стінкою за наступними параметрами: довжина балки, ширина балки, товщини полиць і стінки, висота балки на опорі, висота балки посередині прольоту, аплітуда кривої різі, кількість періодів кривої різі, радіус заокруглення переходів від горизонтаної до вертикальної ланки кривої різі, повздожня проєкція похилої ланки кривої різі.

Наукова новизна. Використані сучасні підходи до проектування сталевих двотаврових балок з перфорованою стінкою для створення скрипту генерації моделей потенційно ефективних балок з урахуванням впливу форми, розмірів і розташування отворів на напружено-деформований стан конструкції.

Практична значущість. Скрипт для генерації двотаврових балок змінної висоти з перфорованою стінкою дозволяє значно полегшити процес підбору оптимальних форм і конфігурацій балок з перфорованою стінкою, що підвищить доступність та доцільність використання двотаврів з перфорованою стінкою в реальних об'єктах будівництва.

Ключові слова: сталеві балки, перфорована стінка, полігональна сітка, полілінія різі двотавру, скриптовий підхід, імпорт в ЛІРА-САПР.

ВСТУП

Ідея використання балок з перфорованою стінкою не покидає науковців ще з середини XIX сторіччя. З одного боку, стало зрозуміло, що збільшення висоти балки збільшує момент інерції перерізу, відповідно і несну здатність на згин. Проте з іншого боку, послаблює

несну здатність на зсув, і збільшує витрати на додаткову обробку балок у вигляді розрізання з подальшим зварюванням (рис. 1). Економічне обґрунтування використання балок з перфорованою стінкою залежить від співвідношення ціни зекономленого металу в порівнянні зі звичайними балками до вартості додаткової

обробки. Це співвідношення постійно змінюється в умовах ринкової економіки, і дослідження економічної ефективності таких робіт буде відрізнятися в залежності від часу розрахунку і країни виготовлення прокату. Проте напружено-деформований стан балок не залежить від ціни металопрокату і вартості робіт. Саме тому дослідження напружено-деформованого стану буде актуальним, і кількісний показник приросту несної здатності балки з перфорованою стінкою створить гарне підґрунтя для подальших економічних розрахунків в конкретний момент часу.

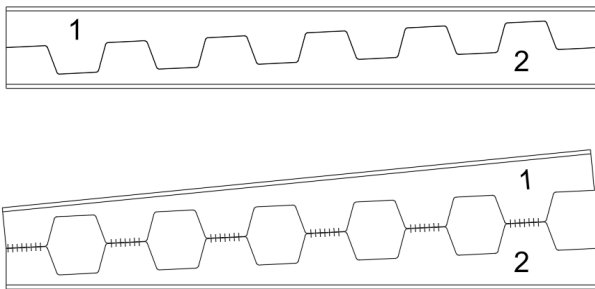


Рис. 1. Формування півбалки з перфорованою стінкою (зверху двотаврова балка до розрізання по стінці, знизу – після розрізання по стінці з подальшим перегортанням однієї частини і зварюванням по стінці)
Джерело: сформовано автором.

З появою можливості лазерної різки двотаврових балок по стінці на станках з числовим програмним управлінням (ЧПУ), задача пошуку оптимального різку балки для утворення балки більшої висоти все менше обмежується технічними можливостями, і дає змогу відтворення точної розрахункової форми, яка впливає як на концентратори напружень, так і на напружено-деформований стан в цілому.

МЕТА

Для пошуку оптимальної конфігурації двотаврової балки з перфорованою стінкою, важливим аспектом є можливість відносно простої генерації великої кількості різних скінченно-елементних моделей заздалегідь заданої конфігурації, для подальшого розрахунку в програмних комплексах, таких як ЛІРА-САПР, SCAD, ANSYS тощо. Для полегшення цього процесу пропонується розглянути скриптовий підхід генерації моделі скінченних елементів двотаврової балки. За допомогою скриптової мови програмування є можливість створити файл, який має зрозумілий формат для програмного комплексу, в якому можна вказати всі вузли з просторовими координатами, всі елементи полігональної сітки (mesh), визначені цими вузлами, вказати в'язі в визначених

вузлах, та навантаження на вузли. Після генерації такого файлу залишиться лише імпортувати модель в програмний комплекс, виконати розрахунок, та проаналізувати напружено-деформований стан.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

На основі попередніх досліджень [1; 3–24] можна зробити наступні висновки:

- в кутах різку перфорованої стінки виникають концентратори напружень, які можна нівелювати радіусним заокругленням кутів [23]

- зварювання саме першого від опори отвору призводить до значного покращення несної здатності [6; 14; 17]

- крок і форма перфорацій мають значний вплив на несну здатність [3; 5; 10; 24].

Для пошуку оптимальної готової балки з перфорованою стінкою при заданих початкових параметрах заготовки двотавра (довжини, висоти, ширини, товщини стінки і полиць до обробки), можна задатись невеликою кількістю параметрів, які однозначно опишуть конфігурацію перфорованої балки після обробки. Знаходження оптимальних параметрів різку стінки балки визначають ефективність даного методу обробки балок. Іншими словами, можна знайти наскільки збільшується максимальне вертикальне навантаження виготовленого двотавру з перфорованою стінкою в порівнянні з двотавром-заготовкою.

Параметри, які можуть однозначно описати двотаврову балку з перфорованою стінкою при заданих початкових умовах двотавру-заготовки, є співвідношення висоти балки на опорі та в прольоті, кількість перфорацій, радіус заокруглення переходу від горизонтального проміжку до вертикального, та кут нахилу вертикальної ланки різку.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Програмний комплекс ЛІРА-САПР дозволяє проводити розрахунки напружено-деформованого стану сталевих балок методом скінченних елементів, заданих трьох- та чотирьох-вузловими пластинчастими елементами. Тобто стінку і полиці балки можна представити як сітку три- та чотиривузлових пластин. В такій системі встановлюються в'язі, які обмежують переміщення для імітації шарнірних або жорстких опор, та задаються вузлові навантаження, після чого можна проводити статичний розрахунок для подальшого аналізу напружень та деформацій. Для прикладу, наведено ізополіа поздовжніх напружень шарнірно опертої балки при вертикальному вузловому навантаженні посередині

балки градієнтом від синього (стиск) до жовтого (розтяг) на рисунку 2.

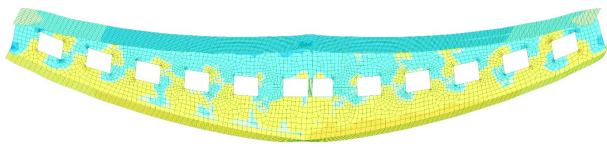


Рис. 2. Ізополю поздовжніх напружень двотаврової балки з перфорованою стінкою, заданої чотиривузловими пластинами

Джерело: сформовано автором за даними програми LIRA-SAPR.

Створення моделі в ЛІРА-САПР може бути виконане декількома шляхами, зокрема використовуючи User Interface (UI), імпортом зі сторонніх програм, таких як AutoCAD, програмно, створивши скрипт однією із сучасних мов програмування, або комбінованим шляхом, тобто створенням частини схеми за допомогою сторонніх засобів з додатковими змінами схеми вручну через UI.

В даній статті детально описано створення генерації моделі двотаврової балки з перфорованою стінкою за допомогою скриптової мови програмування Python для подальшого імпорту балки в програмний комплекс ЛІРА-САПР.

Перш за все, потрібно визначитись з інтерфейсом взаємодії ЛІРА-САПР зі сторонніми програмами. Для цього можна скористатись технікою зворотної розробки (reverse engineering), тобто дослідження роботи програми та часткове створення схожої за функціональністю, не знаючи всіх вимог та можливостей протоколів взаємодії. В даному випадку за допомогою UI було створено просту модель з невеликою кількістю вузлів, три- та чотиривузлових пластинчастих елементів, заданням двох різних жорсткісних характеристик (одна для полиць, інша для стінки), в'язей в різних напрямках, та заданням декількох завантажень у вузлах (рис. 3). Методом перебору всіх можливостей експорту з програми ЛІРА-САПР, було знайдено формат розмітки, придатний для читання людиною в xml форматі. Перевіривши, що даний файл, експортований з ЛІРА-САПР, так само легко імпортується в ЛІРА-САПР без втрати інформації (часто може втрачатись інформація про навантаження, або в'язі), було прийняте рішення використовувати саме *.slr формат. Цей файл має деревовидну структуру, в якій назви говорять самі за себе, наприклад, в xml схему входять такі вузли, як NodeCoordsArray, який зберігає в собі вузли типу NodeCoords з параметрами NdX, NdY, NdZ, в яких вказуються координати вузлів скінченно-елементної моделі; RestrictionsArray з масивом в'язей, ElementsArray, який зберігає в собі вузли типу Element з вказанням номерів

Nodes, які формують кожен чотиривузловий елемент тощо.

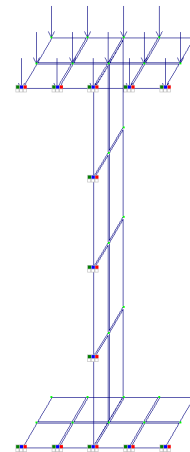


Рис. 3. Схема для аналізу експортованого файлу з ЛІРА-САПР

Джерело: сформовано автором.

Загальний сценарій генерації балки

можна звести до наступного алгоритму на високому рівні абстракції:

- генерація кривої різь, яка складається з горизонтальних ліній, похилих, та дуг визначеного радіусу в якості заокруглень переходів (рис. 4);

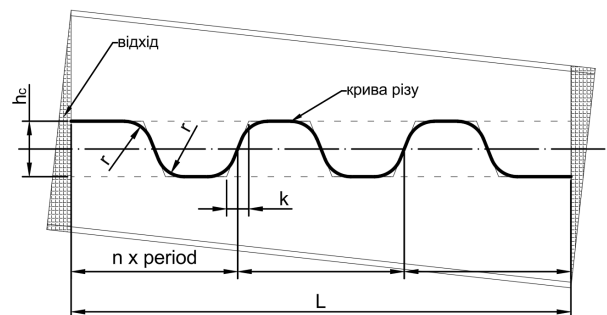


Рис. 4. Крива різь по стінці балки

Джерело: сформовано автором.

- створення закритого контуру півстінки балки, що базується на кривій різь з попереднього кроку (рис. 5);

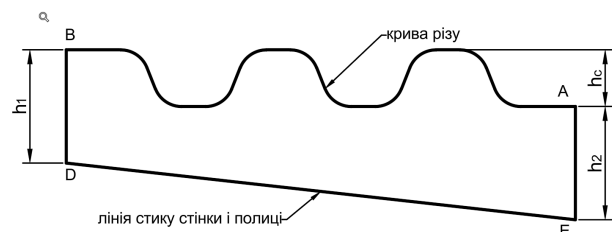


Рис. 5. Закритий контур півстінки балки

Джерело: сформовано автором.

– генерація плоскої полігональної сітки півстілки за даним контуром за допомогою існуючих бібліотек Python (рис. 6);

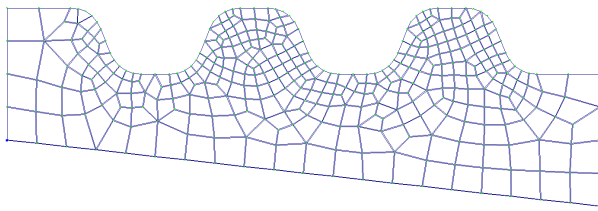


Рис. 6. Полігональна сітка півстілки.
Джерело: сформовано автором.

– знаходження вузлів полігональної сітки, які знаходяться на лінії стику полиці та стінки;
– генерація полігональної сітки полиці по вузлам стику з попереднього кроку (рис. 7);

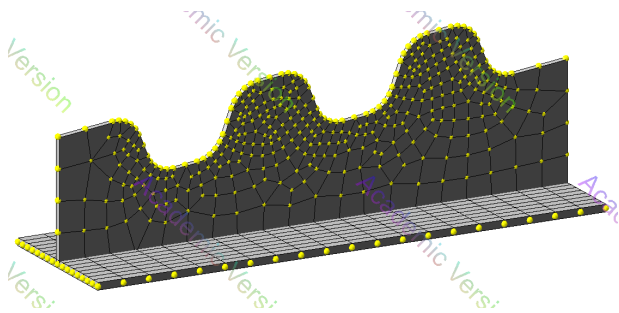


Рис. 7. Півстілка та полиця зі спільними вузлами.
Джерело: сформовано автором.

– дзеркальне копіювання полігональних сіток півстілки та полиці відносно поздовжньої осі балки (рис. 8);

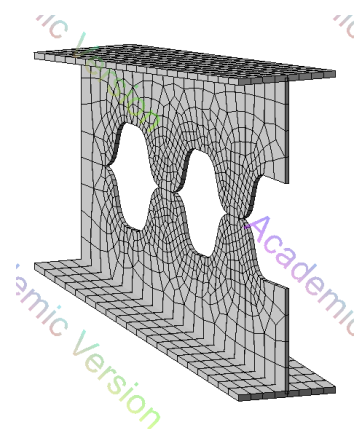


Рис. 8. Півбалка, утворена методом дзеркального копіювання півстілки та полиці
Джерело: сформовано автором.

– дзеркальне копіювання полігональних сіток утвореної півбалки відносно середини балки (рис. 9);

– додавання полігональної сітки, імітуючої ребро жорсткості по середині балки (рис. 9);
– додавання в'язей на опорах (рис. 9);
– додавання вузлового навантаження (рис. 9);

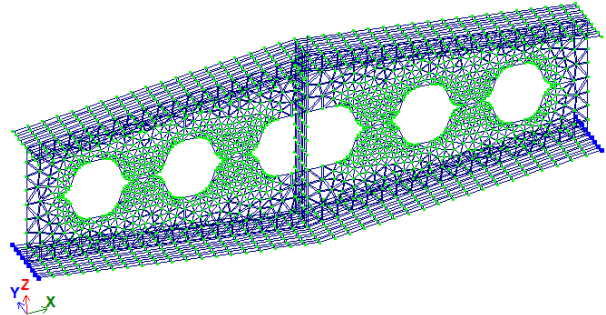


Рис. 9. Схема готової балки з в'язями та навантаженням
Джерело: сформовано автором.

– нормалізація схеми і приведення місцевих осей координат елементів до уніфікованої схеми;
– маршалінг об'єкту моделі з оперативної пам'яті в *.sli файл.

Для спрощення використання генератора балок з перфорованою стінкою, всі параметри у вигляді констант знаходяться в окремому файлі, наприклад, config.py. В конфігураційному файлі будуть зберігатись необхідні константи для генерації, такі як довжина балки, висота на опорі, висота в прольоті, ширина полиці, товщина полиці, кількість перфорацій, радіус кривизни різі, горизонтальна проекція похилої частини різі стінки тощо. Кожного разу перед запуском скрипту константи в цьому класі можна змінити вручну, щоб згенерувався новий файл з новою конфігурацією балки.

Таким чином, задача розрахунку балки будь-якої конфігурації зведеться до наступних відносно легких кроків:

- встановлення параметрів балки в окремому конфігураційному файлі,
- запуску python-скрипту,
- імпорту утвореного скриптом файлу в програмний комплекс ЛІРА-САПР,
- запуску статичного розрахунку в ЛІРА-САПР,
- в результатах розрахунку отримано деформації та поля напружень даної балки для подальшого аналізу напружено-деформованого стану.

Пропонується розглянути особливості кожного з кроків алгоритму детальніше.

Генерація кривої різі з заокругленнями.

За основу лінії розрізу стінки двотаврової балки беремо ламану, утворену зубчастим

косим розрізанням вздовж двотаврової балки по стінці, з подальшим переворотом одної зі сторін і приварюванням по лінії симетрії. Дану ламану лінію можна описати невеликою кількістю параметрів, наприклад, довжиною, кількістю періодів хвилі, амплітудою коливання хвилі, радіусом заокруглення переходів, та горизонтальною проекцією похилого проміжку. Кут нахилу напрямних різів в градусах буде менш інформативним, значно простіше і точніше описати нахил різів за допомогою напів-висот h_1 та h_2 на опорі та в середині прольоту відповідно. Балку можна обрізати в розмір перпендикулярно напрямним різів, в такому випадку лінія з'єднання стінки по осі симетрії буде горизонтальною, тобто мати координати $z=0$, що дозволить віддзеркалювати четвертини балки з простою зміною знаку, без накопичення похибки, викликані неточністю значення синусу кута нахилу напрямної різів (див. рис. 4).

Попередні дослідження балок з перфорованою стінкою показали, що в кутах різів виникають концентратори напружень, які можна зменшити конструктивно за допомогою заокруглення переходів ламаної. Для цього я створив функцію `fillet`, яка приймає координати трьох точок A, B, C, і радіус заокруглення, і повертає об'єкт `Fillet`, який складається з координат точок R_1 на відрізку AB, R_2 на відрізку BC, та R_c , що позначає центр дуги скруглення переходу (рис. 10).

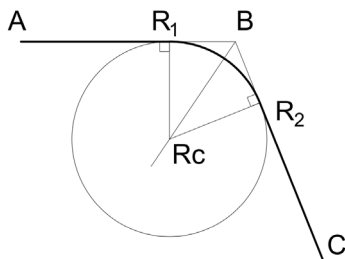


Рис. 10. Геометрична побудова заокруглень переходів ламаної лінії

Джерело: сформовано автором.

Функцією в програмуванні вважається ізольована підпрограма, яка отримує набір вхідних параметрів, і повертає набір вихідних параметрів. Чистою функцією називається така функція, яка при однакових вхідних параметрах повертає однакові вихідні значення, і не має побічних ефектів. Саме такі ізольовані функції полегшують написання, тестування і розуміння коду, чим простіші функції, і чим чистіші вони, тим легше змінювати та переви-користовувати код.

Наступним кроком було створено чисту функцію `compute_fillets`, яка приймає масив точок (X, Y) і радіус заокруглення, і повертає замість всіх проміжних точок об'єкти типу

`Fillet`. Цей метод для кожного елемента від другого до передостаннього рахує `fillet`, і підставляє в результуючу колекцію об'єктів.

Створено функцію `generate_meandr`, яка приймає довжину півбалки, висоту перепаду, кількість періодів, та горизонтальну проекцію похилого елемента, і повертає колекцію точок (X, Y) , які описують зубчасту лінію різів.

Передавши результат функції `generate_meandr` в функцію `compute_fillets`, отримуємо достатні дані для утворення полілінії різів стінки балки для утворення балки з перфорованою стінкою.

Створення закритого контуру пів-стінки балки

Використавши результат попереднього кроку, (а саме перша точка (X, Y) , проміжні `Fillet`(R_1, R_2, R_c), та остання точка), можна створити полілінію, з'єднавши послідовно першу точку з точкою R_1 першого `Fillet`, потім з аркою, однозначно описаною об'єктом `Fillet`, об'єднуючи R_2 кожного попереднього `Fillet` з R_1 наступного `Fillet`, повторювати для всіх `Fillet`, і замикаючи останньою точкою.

Дану полілінію можна доповнити відрізками BD, DE, EA, утворивши плоский замкнутий контур (див. рис. 5).

Генерація плоскої полігональної сітки півстінки за допомогою існуючої бібліотеки Python

Маючи готову плоску замкнуту полілінію, яку було згенеровано на попередньому кроці, за допомогою готової Python-бібліотеки `gms` можна згенерувати mesh-сітку, яка буде складатись з вузлів (`Node`) та елементів (`Tri`, `Quad`) (див. рис. 6).

Дана бібліотека має достатньо багато налаштувань, від розміру сітки, до алгоритму розбивки замкнутого контуру на полігональну сітку (рис. 11).

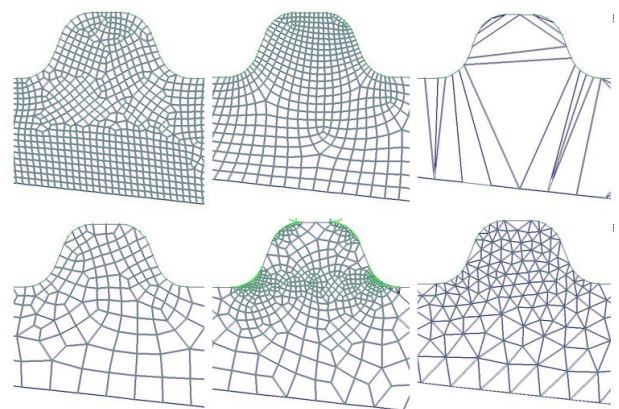


Рис. 11. Варіанти розбиття замкнутого полігону на полігональну сітку

Джерело: сформовано автором.

Результатом виконання даного методу є об'єкт, який зберігає в собі набір вузлів (nodes), елементів (quad), які сформовані на цих вузлах, послідовність вузлів (edge_line), які належать замкнутому контуру, де перший елемент - це старт полілінії замкнутого контуру, яку ми будували, а останній елемент - кінець цієї полілінії.

Знаходження вузлів полігональної сітки, які розміщені на лінії стику полиці та стінки.

Оскільки функціонал gmsh дозволяє отримати edge_line, тобто послідовність всіх вузлів, які лежать на контурі згенерованої полігональної сітки, задача пошуку вузлів на лінії стику полиці та стінки (DE) зводиться до знаходження номерів елементів початку (D) та кінця (E) лінії стику полиці та стінки. Це можна зробити порівнянням координат вузлів кожного елемента колекції з координатами шуканих вузлів, пробігаючись по кожному елементу в циклі. Саме ця підколекція елементів edge_line від i-того до j-того елемента буде задіяна для побудови полігональної сітки полиці. Для подальшого перевикористання логіки знаходження вузлів на проміжку полілінії, виносимо цю логіку в окрему чисту функцію, яка приймає послідовність вузлів на полілінії, координати початку та кінця проміжку, і повертає частину послідовності вузлів, обмежену початковим та кінцевим вузлом. Ця функція буде використовуватись для знаходження вузлів примикання стінки до полиці, а також для знаходження вузлів на поперечній осі симетрії балки для подальшого встановлення ребра жорсткості посередині балки.

Генерація полігональної сітки полиці по існуючим вузлам стінки.

Важливо зауважити, що у вузлах примикання стінки до полиці має бути забезпечена сумісна робота всієї балки. В протилежному випадку двотавр буде сприйматись програмним комплексом як набір з трьох окремих пластин (полиця, стінка, полиця), і якщо навантаження буде прикладене до вузлів полиці, то все навантаження буде сприйматись лише полицею, і напружено-деформований стан балки буде невірним. Для забезпечення сумісної роботи стінки і полиці двотавра, необхідно, щоб в місцях примикання полиці до стінок вузли співпадали, тобто пластинчасті елементи полиці і стінок були сформовані на спільних вузлах. Відповідно, крок і форма полігональної сітки полиці обумовлені існуючою сіткою стінки. Також підступним і візуально непомітним може бути можливість програмних комплексів створювати вузли з абсолютно

однаковими координатами. Якщо декілька пластинчастих елементів сформовані на різних вузлах, навіть якщо вони мають абсолютно однакові координати, їх сумісна робота не буде забезпечена. Саме тому важливо або об'єднати вузли з однаковими координатами, або "опирати" елементи на спільні вузли.

В даному випадку, маючи вже згенеровану сітку стінки балки, найпростішим способом буде скопіювати готові вузли на відрізок DE зі зміщенням в сторони звів полиці, і з утворених пар відрізків створити чотиривузлові пластинчасті елементи (див. рис. 7). В такому випадку буде забезпечено сумісну роботу стінки і полиці. Більш або менш детального розбиття сітки полиці задача не потребує.

Симетричне копіювання полігональних сіток півстінки та полиці відносно поздовжньої осі балки.

Оскільки балка симетрична відносно площини XoY (напрямки осей на рис. 9), достатньо створити нові вузли так, щоб кожен існуючий вузол N_i мав вузол-відповідник N_{si} , який має координати $(x_{Ni}, y_{Ni}, -z_{Ni})$. В процесі створення вузлів-відповідників, зберігаємо відповідності в колекції mirrored_map так, щоб викликавши mirrored_map(N_i) отримати N_{si} . Важливо зауважити, що для вузлів, у яких $z=0$, вузлом-відповідником буде той самий вузол, тобто mirrored_map(N_j) = N_j . Це зроблено для того, щоб зімітувати зварний шов по поздовжній осі балки, відповідно, забезпечити сумісну роботу двох таврів.

Маючи колекцію вузлів-відповідників, створення віддзеркалених елементів всім існуючим елементам зводиться до того, щоб для кожного існуючого елемента взяти вузли, на які він опирається, знайти вузли-відповідники цим вузлам, і створити новий елемент, який формується на вузлах-відповідниках. Цю операцію потрібно проробити для кожного існуючого елемента в циклі (див. рис. 8).

Симетричне копіювання полігональних сіток утвореної півбалки відносно середини балки.

Відображення півбалки відносно площини YoZ (напрямки осей на рис. 9) виглядає аналогічно відображенню відносно площини XoY , тільки кожен існуючий вузол N_i має вузол-відповідник N_{si} , який має координати $(-x_{Ni}, y_{Ni}, z_{Ni})$. Вся інша логіка аналогічна.

Додавання полігональної сітки, імітуючої ребро жорсткості посередині балки.

Описаними вище методами знаходимо вузли, які належать стінці балки в перерізі посередині балки, розбиваємо вільний проміжок

на рівні співставні з розміром сітки проміжки, всі ці точки мають координату $x=0$ (напрямки осей на рис. 9). Знаючи крок сітки на полиці, створюємо матрицю вузлів в площині YoZ , і додаємо чотиривузлові елементи для створення ребра жорсткості. Це ребро значно підвищує несну здатність балки, тому воно обов'язково має бути присутнім в розрахунковій схемі.

Додавання в'язей на опорах утвореної балки.

Для імітації шарнірно-опертої балки, у всіх вузлів нижнього поясу балки на одній опорі обмежуємо переміщення по осям x , y , z (напрямки осей на рис. 9). На іншій опорі створимо імітацію рухомого шарніру - обмежуємо переміщення всіх вузлів нижнього поясу по осям y , z . Якщо обмежити переміщення по осі x з обох боків, на балку будуть діяти додаткові поздовжні навантаження, які мають вплив на напружено-деформований стан балки, і можуть негативно вплинути на висновки дослідження.

В'язі обмежують переміщення вузлів, тому для подальшої генерації файлу в форматі *.sli необхідно і достатньо мати масив номерів вузлів, в яких будуть встановлені ті чи інші в'язі.

Додавання навантаження.

Для розрахунку напружено-деформованого стану необхідно прикласти хоча б якусь силу. Найпростішою, і в той же час інформативною схемою буде прикладання вузлового вертикального навантаження в одну точку посередині балки по центру верхньої полиці. Цього буде більш ніж достатньо для валідації правильності схеми і подальшої генерації розрахункових схем. Створюємо змінну для зберігання номеру вузла для прикладання навантаження. В подальшому цю логіку можна розширити або змінити, наприклад, прикладати рівномірно-розподілене навантаження по всій довжині балки, або завантажити лише половину прольоту для аналізу напружено-деформованого стану з несиметричним навантаженням.

Нормалізація схеми.

На цьому етапі створено достатньо детальну розрахункову схему, яка складається з вузлів, чотиривузлових пластинчастих елементів, в'язей, навантажень. Для спрощення аналізу напружено-деформованого стану варто привести місцеві осі координат схожих елементів до спільного напрямку. Це особливо помітно на елементах біля осей симетрії, де в одній половині балки можуть виникати напруження N_x , а на сусідньому елементі таке саме за значенням напруження N_y , таким чином побудова полів напружень виглядає

“рвано” і неінформативно (рис. 12). В програмному комплексі LIRA-SAPR напрямок місцевих осей елементів залежить від послідовності вказання вузлів.

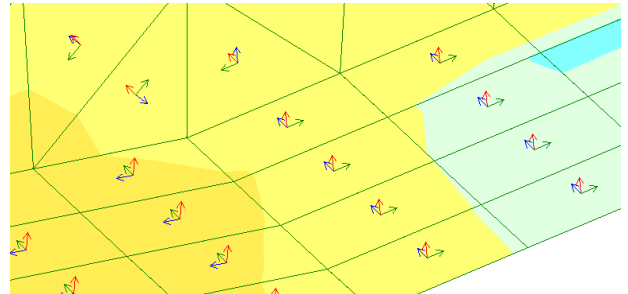


Рис. 12. Приклад різнонаправлених місцевих осей координат елементів і полів напружень в них.

Джерело: сформовано автором за даними програми LIRA-SAPR

Для нормалізації утвореної схеми створюємо чисту функцію, яка приймає масив всіх елементів і вузлів, і повертає масив елементів з вже упорядкованими вузлами так, щоб місцеві осі майже горизонтальних елементів співпадали (якщо знехтувати кут нахилу полиць до горизонталі). Ця функція буде виконуватись безпосередньо перед маршалінгом моделі в *.sli формат.

Маршалінг моделі в *.sli файл.

Маршалінгом (marshalling) називається процес перетворення об'єктів в оперативній пам'яті програм в придатний для передачі або зберігання формат. Для широко відомих форматів, таких як JSON, або XML, існують Python-бібліотеки для маршалінгу та демаршалінгу об'єктів. Файл в форматі *.sli має xml структуру. Тобто можна створити об'єкт, який має відповідні поля, наприклад, масив елементів типу NodeCoord під назвою NodesCoordArray, масив елементів типу Element (з полями Nodes, Type, Material) під назвою ElementsArray тощо, саме так як вимагає схема формату *.sli, і перетворити цей об'єкт в оперативній пам'яті на файл необхідного формату в файлової системі комп'ютера. Цей файл в подальшому можна імпортувати в ЛІРА-САПР за допомогою рядка меню Файл - Імпорт - *.sli.

ВИСНОВКИ

Враховуючи можливості сучасних програмних комплексів розрахунку будівельних конструкцій, скриптовий підхід до генерації розрахункових схем має як свої переваги, так і деякі недоліки.

В першу чергу, скрипт дозволяє створювати схеми на порядки швидше в порівнянні з створенням схем за допомогою UI. Деякі функції скрипту можна перевикористати для

генерації інших схем. Також варто зазначити, що для генерації моделей схем в інші програмні комплекси, зокрема SCAD або Ansys, необхідно змінити лише маршалінг схеми в необхідний формат, більшість логіки залишиться незмінною.

З іншої сторони, цей підхід потребує базових навичок програмування, значно більше часу в порівнянні зі створенням однієї моделі, навіть досить детальної. І основним мінусом в роботі цього підходу є мала візуальна наглядність коду в порівнянні з імпортом з CAD-систем, і зміна коду в разі потреби через деякий час буде здаватись дуже важкою задачею.

Створено інструмент, який дозволяє проводити статичний розрахунок різних балок з перфорованою стінкою, що пришвидшить пошук оптимальних значень конфігурації лінії різку балки, відповідно і можливість ширшого використання двотаврових балок змінної висоти з перфорованою стінкою в будівельних конструкціях.

ЛІТЕРАТУРА

[1] Биків Д. З. Дослідження напружено-деформованого стану сталевих балок з синусоїдальною перфорацією : дис. ... канд. техн. наук: 192. Тернопіль, 2023. 80 с.

[2] ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування : чинний від 01.01.2015. Київ : Мінрегіонбуд України, 2014. 181 с.

[3] Abbas J. L. Behaviour of Steel I Beams with Web Openings. *Civil Engineering Journal*. 2023. Vol. 9, № 3. P. 596-617. DOI: <https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-03-08>

[4] Ahmed A., Said A. The Effect of Expansion Ratio, Opening Size, and Prestress Strand on the Flexural Behavior of Steel Beams with Expanded Web using FEA. *Engineering, Technology and Applied Science Research*. 2024. Vol. 27, № 2. P. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.48084/etasr.7254>.

[5] Ahmed A., Said A. The Effect of Opening Size and Expansion Ratio on the Flexural Behavior of Hot Rolled Wide Flange Steel Beams with Expanded Web. *Engineering, Technology and Applied Science Research*. 2024. Vol. 14, № 1. P. 13033-13040. DOI: <https://doi.org/10.48084/etasr.6698>.

[6] ArcelorMittal Europe – Long Products. *Sections and Merchant Bars. ACB and Angelina beams: a new generation of beams with large web openings* [брошура] / ArcelorMittal. – Luxembourg: ArcelorMittal, 2021. – 64 с.

[7] Carvalho A., Santos V.B., Rossi A., Martins C.H. Nonlinear inelastic stability behavior of high-strength stainless steel I-beams with sinusoidal web openings. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2023. Vol. 24, № 7. P. 1-39. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0219455424500809>.

[8] De'nan F., Hashim N.S Stress analysis of I-beam with web opening via finite element analysis and experimental study. *World Journal of Engineering*. 2022.

Vol. 20, № 5. P. 974-988. DOI: <https://doi.org/10.1108/WJE-11-2021-0627>

[9] El-Dehemy H. Static and Dynamic Analysis Web Opening of Steel Beams. *World Journal of Engineering and Technology*. 2017. №5, P. 275-285. DOI: <https://doi.org/10.4236/wjet.2017.52022>.

[10] Lawson R.M., Hicks S.J. Design of Composite Beams with Large Web Openings; London: The Steel Construction Institute. 2011. 355 с.

[11] Morkhade S., Jagtap K.R., Ghorpade P.S., Ahiwale D.D. Buckling performance evaluation of steel cellular beams strengthened with flange cover plate. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2022. Vol. 22, P. 1277-1290. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42107-022-00483-3>.

[12] Morkhade S., Martins CH. Effect of Web Post Width on Strength Capacity of Steel Beams with Web Openings: Experimental and Analytical Investigation. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2022. Vol. 27, № 2. P. 1-9. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000688](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000688).

[13] Morkhade S. et al. Structural behaviour of castellated steel beams with reinforced web openings. *Journal of Civil Engineering*. 2020. Vol. 27. P. 1067-1078. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42107-020-00262-y>.

[14] Nseir J. et al. Lateral Torsional Buckling of Cellular Steel Beams. Annual Stability Conference Structural Stability Research Council Grapevine, Texas. 2012.

[15] Osmani A. et al. Deflection Predictions of Tapered Cellular Steel Beams Using Analytical Models and an Artificial Neural Network. *Buildings*. 2025, Vol. 15. № 992. P. 1-23. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15060992>.

[16] Pawar K., Kumbhar P. Performance Analysis of Castellated Steel I-Beam using FRP Stiffeners. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2022. Vol. 10, № 2. P. 1134-1142. DOI: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.38596>.

[17] Samadhan M., Gupta L. Critical study of steel beams with web openings, *Australian Journal of Structural Engineering*. 2023. Vol. 24. № 1. P. 24-35. DOI: <https://doi.org/10.1080/13287982.2022.2117319>.

[18] Silwal P., Parvin A., Alhusban M. Numerical Investigation on Strengthening of Steel Beams for Corrosion Damage or Web Openings Using Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets. *MDPI, Buildings*. 2024. Vol. 14. № 1069. P. 1-22. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14041069>.

[19] Saternus P Cellular Beams with Closely Spaced Web Openings – A Review of Analytical Calculation Models for Web-Post Buckling, *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2022. Vol. 16, № 1. P. 213-230. DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/144146>.

[20] Sehwal M., Celikag M. Investigation on Failure Mechanisms of Symmetric and Asymmetric Cellular Steel Beams, *Special Issue:EUROSTEEL 2021 Sheffield – Steel's coming home*. 2021. Vol. 4, № 2-4. P. 2308-2314. DOI: <https://doi.org/10.1002/cepa.1554>.

[21] Sehwal M., Celikag M. Load Carrying Capacity of Hot-Rolled Hybrid Cellular Steel Beams: Experimental Investigations. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2022. Vol. 47. № 10. P. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06508-4>.

[22] Shamass R. et al. Web-Post Buckling Prediction Resistance of Steel Beams with Elliptically-Based Web Openings using Artificial Neural Networks (ANN); *Thin-Walled Structures*, London, UK. 2022. Vol. 180. P. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109959>.

[23] Tsavdaridis K. D., D'Mello C. Vierendeel Bending Study of Perforated Steel Beams with Various Novel Web Opening Shapes, through Non-linear Finite Element Analyses. *Journal of Structural Engineering*, 2012. Vol. 138, № 10. P. 1214-1230. ISSN 0733-9445.

[24] Tsavdaridis K. D., D'Mello C. Web Buckling Study of the Behaviour and Strength of Perforated Steel Beams with Different Novel Web Opening Shapes. *Journal of Constructional Steel Research*. 2011. Vol. 67, № 10. P. 1605-1620. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.04.004>.

REFERENCES

[1] Bykiv, D. Z. (2023). Doslidzhennia napruzhenno-deformovanoho stanu stalevykh balok z synusoidalnoiu perforatsiieiu [Investigation of the stress-strain state of steel beams with sinusoidal perforation]. Master's thesis, Ternopil Ivan Puluj National Technical University. Ternopil, Ukraine [in Ukrainian].

[2] DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruktsi (2014). [Ministry for Regional Development, Construction, and Housing of Ukraine. DBN V.2.6-198:2014 Steel structures]. Design code. With amendment No. 1 [Effective from 2015-01-01]. Kyiv, Ukraine: Minregionbud of Ukraine [in Ukrainian].

[3] Abbas JL (2023). Behaviour of Steel I Beams with Web Openings. *Civil Engineering Journal*, 9(3), 596-617. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-03-08> [in English].

[4] Ahmed A., Said A. (2024). The Effect of Expansion Ratio, Opening Size, and Prestress Strand on the Flexural Behavior of Steel Beams with Expanded Web using FEA. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 27(2), 1-9. <https://doi.org/10.48084/etasr.7254> [in English].

[5] Ahmed A., Said A. (2024). The Effect of Opening Size and Expansion Ratio on the Flexural Behavior of Hot Rolled Wide Flange Steel Beams with Expanded Web. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 14(1), 13033-13040. <https://doi.org/10.48084/etasr.6698> [in English].

[6] ArcelorMittal (2021). Beams with large web openings. *ArcelorMittal* [in English].

[7] Carvalho A., Santos V.B., Rossi A., Martins C.H. (2023). Nonlinear inelastic stability behavior of high-strength stainless steel I-beams with sinusoidal web openings. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 24(7), 1-39. <https://doi.org/10.1142/S0219455424500809> [in English].

[8] De'nan F., Hashim N.S (2022). Stress analysis of I-beam with web opening via finite element analysis and experimental study. *World Journal of Engineering*, 20(5), 974-988. <https://doi.org/10.1108/WJE-11-2021-0627> [in English].

[9] El-Dehemy H. (2017). Static and Dynamic Analysis Web Opening of Steel Beams. *World Journal of*

Engineering and Technology, (5), 275-285 <https://doi.org/10.4236/wjet.2017.52022> [in English].

[10] Lawson R.M., Hicks S.J. (2011). Design of Composite Beams with Large Web Openings, P355 ed.; *The Steel Construction Institute*: London, UK [in English].

[11] Morkhade S. et al. (2022). Buckling performance evaluation of steel cellular beams strengthened with flange cover plate. *Asian Journal of Civil Engineering*, 22, 1277-1290. <https://doi.org/10.1007/s42107-022-00483-3> [in English].

[12] Morkhade S., Martins CH. (2022). Effect of Web Post Width on Strength Capacity of Steel Beams with Web Openings: Experimental and Analytical Investigation. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 27(2), 1-9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000688](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000688) [in English].

[13] Morkhade S. et al. (2020). Structural behaviour of castellated steel beams with reinforced web openings. *Journal of Civil Engineering*, 27, 1067-1078. <https://doi.org/10.1007/s42107-020-00262-y> [in English].

[14] Nseir J. et al. (2012). Lateral Torsional Buckling of Cellular Steel Beams. *Annual Stability Conference Structural Stability Research Council Grapevine, Texas* [in English].

[15] Osmani A. et al. (2025). Deflection Predictions of Tapered Cellular Steel Beams Using Analytical Models and an Artificial Neural Network. *Buildings*, 2025, 15(992), 1-23. <https://doi.org/10.3390/buildings15060992> [in English].

[16] Pawar K., Kumbhar P. (2022). Performance Analysis of Castellated Steel I-Beam using FRP Stiffeners. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 10(2), 1134-1142 <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.38596> [in English].

[17] Samadhan G. M. and Gupta L. M. (2022). Critical study of steel beams with web openings, *Australian Journal of Structural Engineering*, 24(1), 24-35. <https://doi.org/10.1080/13287982.2022.2117319> [in English].

[18] Silwal P., Parvin A, and Alhusban M. (2024). Numerical Investigation on Strengthening of Steel Beams for Corrosion Damage or Web Openings Using Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets, *MDPI, Buildings*, 14(1069), 1-22. <https://doi.org/10.3390/buildings14041069> [in English].

[19] Saternus P (2022). Cellular Beams with Closely Spaced Web Openings – A Review of Analytical Calculation Models for Web-Post Buckling. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 16(1), 213-230. <https://doi.org/10.12913/22998624/144146> [in English].

[20] Sehwal M., Celikag M. (2021). Investigation on Failure Mechanisms of Symmetric and Asymmetric Cellular Steel Beams. *Special Issue:EUROSTEEL 2021 Sheffield – Steel's coming home*, 4(2-4), 2308-2314. <https://doi.org/10.1002/cepa.1554> [in English].

[21] Sehwal M., Celikag M. (2022). Load Carrying Capacity of Hot-Rolled Hybrid Cellular Steel Beams: Experimental Investigations. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(10), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06508-4> [in English].

[22] Shamass R. et al. (2022). Web-Post Buckling Prediction Resistance of Steel Beams with Elliptically-

Based Web Openings using Artificial Neural Networks (ANN); *Thin-Walled Structures*, 180, (1-11), London, UK. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109959> [in English].

[23] Tsavdaridis K. D., D'Mello C. (2012). Vierendeel Bending Study of Perforated Steel Beams with Various Novel Web Opening Shapes, through Non-linear Finite Element Analyses. *Journal of Structural*

Engineering, 138(10). 1214 – 1230. ISSN 0733-9445 [in English].

[24] Tsavdaridis K. D., D'Mello C. (2011). Web Buckling Study of the Behaviour and Strength of Perforated Steel Beams with Different Novel Web Opening Shapes. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(10), 1605-1620. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.04.004> [in English].

ABSTRACT

Godzynski I. Features of Generating I-Beams of Variable Height with a Perforated Web Using a Scripting Approach

Purpose – to highlight the features of script-based generation of an I-beam with a perforated web for subsequent import into the LIRA-SAPR software package, enabling the analysis of the stress-strain state of beams with various perforated web cut configurations.

Methodology. The study employs a scripting approach to developing code for generating a three-dimensional beam model with a perforated web, defined by four-node plate elements. This approach encompasses the analysis of import formats compatible with LIRA-SAPR, the construction of polylines and polygonal meshes, the connection of the web to the flanges and web segments to one another, the incorporation of stiffening ribs, and the assignment of boundary conditions and loads. This significantly streamlines the creation of large sets of structurally similar yet parametrically distinct computational models.

Results. A Python script has been developed that generates a model of a simply supported I-beam of variable height with a perforated web, parameterized by the following inputs: beam span, beam width, flange and web thicknesses, web height at the support, web height at mid-span, cut curve amplitude, number of cut curve periods, fillet radius at transitions between horizontal and vertical cut segments, and the horizontal projection of the inclined cut segment.

Scientific novelty. Contemporary design approaches for steel I-beams with perforated webs have been applied to develop a model generation script for potentially efficient beam configurations, accounting for the influence of hole geometry, dimensions, and placement on the structural stress-strain state.

Practical relevance. The script for generating variable-height I-beams with perforated webs substantially facilitates the selection of optimal beam forms and configurations, thereby enhancing the accessibility and practical viability of perforated-web I-beams in real construction projects.

Keywords: steel beams, perforated web, polygonal mesh, I-beam cut polyline, scripting approach, LIRA-SAPR import.

AUTHOR'S NOTES:

Godzynski Ivan, Postgraduate Student at the Department of Computer Technologies in Construction, State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, Ukraine, e-mail: ivan.godzynski@gmail.com, orcid: 0009-0007-5667-2286.

Дата першого надходження статті до видання: 31.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії
відкритого доступу CC BY 4.0

