

УДК 69:004.925.84

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.41.1041

АНАЛІЗ ФАЙЛІВ У ФОРМАТІ STL ЯК ОСНОВА МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ 3D-ДРУКУ БУДІВЕЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ

ГУСЄВ В. О.^{1*}, асп.,

НИКІФОРОВА Т. Д.², докт. техн. наук, проф.

^{1*} Кафедра залізобетонних і кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (093) 017-80-81, e-mail: husievvitalii@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6813-9824

² Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (050) 363-46-38, e-mail: nikiforova.tetiana@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0688-2759

Анотація. Постановка проблеми. Інтеграція передових технологій у сфері програмного забезпечення на етапах будівництва стає одним із ключових завдань проєктувальників. Створення об'єктів за допомогою 3D-друку потребує застосування відповідних високотехнологічних рішень. Одне з таких рішень полягає в аналізі процесу перетворення об'ємних моделей на керуючий код для 3D-принтерів, зокрема, аналізу файлів у форматі STL. Від цього аналізу, в першу чергу, залежить ефективність виготовлення будівельних конструкцій і споруд методом 3D-друку. **Мета статті.** Дослідження націлене на глибокий аналіз файлів у форматі STL у світлі росту адитивного виробництва та прогресу цифрових технологій у будівельній сфері. Мета роботи – надання всебічного огляду основної інформації, пов'язаної з використанням цього формату, що включає методи обчислення площі та об'єму сітки STL. Виявлення та аналіз типових помилок, які можуть виникати при роботі з файлами цього формату та визначення ключових критеріїв для оцінення геометричної якості сітки. Розгляд стратегій та альтернативних підходів для подолання можливих недоліків, що можуть виникнути при використанні формату STL. Створення комплексного уявлення про цей формат і надання відповідних рекомендацій для подальшого вдосконалення процесів роботи з ним. **Висновок.** Дослідження файлів у форматі STL відіграє важливу роль у розвитку адитивного виробництва та цифрових технологій у будівельній галузі. Воно має на меті детальний огляд основної інформації, що стосується використання цього формату, включаючи методи розрахунку площі та об'єму сітки STL, які є ключовими для ефективного моделювання та виробництва конструкцій. Під час дослідження виявлено низку помилок та визначено ключові критерії для оцінення геометричної якості сітки. Це включає правильне орієнтування нормалей, виявлення та виправлення перекриття, перетинів та ізольованих граней. Для подальших досліджень пропонується розглянути альтернативні варіанти подолання деяких недоліків формату STL. Наприклад, можна розглянути автоматизовані методи виявлення та виправлення помилок у мережі, розробку нових форматів файлів із більшою функціональністю та підтримкою додаткових властивостей моделей. Дослідження таких альтернатив може сприяти поліпшенню ефективності та точності використання файлів у будівництві та адитивному виробництві.

Ключові слова: 3D-друк; STL-файли; САПР; 3D-моделювання; формат ASCII; метод поширеного напівнаплення

ANALYSIS OF FILES IN STL FORMAT AS THE BASIS OF MODELING FOR 3D PRINTING OF BUILDING OBJECTS

HUSIEV V.O.^{1*}, Postgraduate Student,

NIKIFOROVA T.D.², Dr. Sc. (Tech.), Prof.

^{1*} Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (093) 017-80-81, e-mail: husievvitalii@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6813-9824

² Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (050) 363-46-38, e-mail: nikiforova.tetiana@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0688-2759

Abstract. Problem statement. The integration of advanced technologies in the field of software at the stages of construction becomes one of the key tasks of designers. Creating objects using 3D printing requires the use of

appropriate high-tech solutions. One of these solutions consists in the analysis of the process of converting three-dimensional models into a control code for 3D printers, in particular, the analysis of files in STL format. The efficiency of manufacturing construction structures and structures by 3D printing depends primarily on this analysis. **Purpose of the article.** This study aims at an in-depth analysis of STL files in light of the growth of additive manufacturing and the advancement of digital technologies in the construction industry. The purpose of the work is to provide a comprehensive overview of the basic information related to the use of this format, including methods for calculating the area and volume of the STL grid. Identification and analysis of typical errors that may occur when working with files of this format and definition of key criteria for evaluating the geometric quality of the grid. Consideration of strategies and alternative approaches to overcome possible drawbacks that may arise when using the STL format. Creation of a comprehensive view of this format and provision of appropriate recommendations for further improvement of the processes of working with it. **Conclusion.** The study of STL files plays an important role in the development of additive manufacturing and digital technologies in the construction industry. This study aims to provide a detailed overview of the basic information related to the use of this format, including methods for calculating the area and volume of an STL mesh, which are crucial for efficient modeling and production of structures. During the research, a number of errors were identified and key criteria for assessing the geometric quality of the grid were determined. This includes correctly orienting normals, detecting and correcting overlaps, intersections, and isolated faces. For further research, it is proposed to consider alternative options for overcoming some of the shortcomings of the STL format. For example, you can consider automated methods of detecting and correcting errors in the network, developing new file formats with greater functionality and support for additional model properties. Investigating such alternatives can help improve the efficiency and accuracy of file use in construction and additive manufacturing.

Keywords: *Building objects; 3D printing; STL files; CAD; 3D modeling; ASCII format; fused deposition modeling*

Постановка проблеми. У сучасному адитивному виробництві, такому як 3D-друк, формати файлів відіграють ключову роль у передачі інформації про об'єкт від програмного забезпечення до 3D-принтера. Один із найбільш поширених форматів для передачі геометричних даних об'єктів в адитивному виробництві – формат STL (Stereolithography or Standard Tessellation Language).

Незважаючи на значне поширення, формат STL має свої обмеження та недоліки. У зв'язку з цим виникає необхідність проведення досліджень в області геометричних форматів у адитивному виробництві, особливо в контексті формату STL.

Основні проблеми, які потрібно розглянути та дослідити.

Точність та деталізація. Оцінка можливостей формату STL у передачі геометричної точності та деталізації об'єктів, особливо під час роботи зі складними або великими моделями.

Ефективність зберігання та передачі даних. Аналіз ефективності використання формату STL в контексті обсягу даних, необхідного для опису об'єктів, та можливих методів стиснення даних без втрати якості друку. Підтримка геометричних

особливостей. Дослідження можливостей формату STL обробляти складні геометричні об'єкти, такі як криволінійні поверхні, порожнини та внутрішні порожнини.

Стійкість до помилок та виправлення дефектів. Аналіз методів виявлення та виправлення помилок у файлах формату STL, таких як некоректні трикутники, самоперетини тощо.

Сумісність та переносимість. Дослідження сумісності формату STL з різними програмними та апаратними платформами, а також можливих обмежень при переміщенні файлів між різними системами.

Мета дослідження полягає в підвищенні якості та ефективності адитивного виробництва шляхом більш повного розуміння обмежень та можливостей формату STL та пропозиції відповідних поліпшень або альтернативних рішень.

Мета статті полягає в дослідженні файлів у форматі STL у зв'язку з розвитком адитивного виробництва та цифрових технологій у будівельній галузі. Надання вичерпного опису основної інформації, пов'язаної з використанням цього формату, включаючи методи обчислення площі та об'єму сітки STL. Окреслення типових

помилки та ключових критеріїв для оцінки геометричної якості сітки. Надання альтернативних варіантів подолання деяких недоліків формату STL.

Результати досліджень. Файли у форматі STL, створені системами 3D-моделювання, включають трикутне представлення поверхонь і стали стандартом для введення даних у технологіях швидкого прототипування. У цих технологіях фізичні об'єкти будуються шар за шаром, де кожен шар є двовимірним перерізом тривимірної сітки у форматі STL.

У сучасних системах комп'ютерно-автоматизованого проектування (САПР) мозаїка поверхонь часто містить помилки в структурі даних у вигляді прогалів і дірок, що спричинює відкриті петлі у поперечних перерізах, які неможливо виготовити як шари.

Проте таке представлення у вигляді трикутних сіток, викликає дві основні проблеми. Одна полягає в тому, що багато сучасних твердотільних моделей не генерують топологічно правильних мозаїк. Помилки, такі як прогалів та численні грані, зумовлюють неправильні поперечні перерізи, які не можуть бути виготовлені як шари.

Протягом останнього десятиліття багато дослідницьких груп працювали над спрощенням поверхонь та опублікували багато праць із цієї теми. Алгоритми спрощення сітки зменшують кількість трикутників у даній моделі, мінімально змінюючи її геометричну форму.

Інша проблема полягає у високій складності таких сіток. Моделі з мільйонами трикутників часто вимагають більше, ніж доступне сховище та тривалий час обробки. Тому зменшення складності поверхневих сіток становить обов'язкову вимогу для роботи з такими представленнями моделей.

Під час теселяції в сітці дискретизації можуть виникнути численні проблеми з викривленням форми. Тому розроблення дискретних алгоритмів для трикутних сіток з метою згладжування форми стало ще однією центральною проблемою.

Такі алгоритми використовують результати та методи диференціальної геометрії, варіаційного дизайну поверхні та числового аналізу та знаходять застосування в багатьох галузях. Проте дуже мало робіт стосуються виявлення та виправлення топологічних помилок і побудови відповідних структур даних над трикутною сіткою, які також містять топологічну інформацію.

Проведений аналіз останніх досліджень та публікацій вказує на потребу дослідження таких аспектів загальної проблеми: стандартизація та оптимізація процесів перетворення даних та автоматизація аналізу та оптимізація геометричної якості.

Розширення файла STL реалізоване в більшості програмного забезпечення САПР і використовується в різних галузях для моделювання геометричної інформації деталей або форм. Проте використання файла STL передбачає розуміння його вмісту, методів утворення сітки та правил генерації файлів, а також можливих кодувань даних [1].

Експлуатація такого типу геометричної моделі проста. Файл STL містить поверхневі дані САПР, які дискретно описують геометрію поверхні об'єкта у тривимірному просторі. Поверхня, яка визначена у тривимірному просторі, апроксимується набором трикутників, також відомих як грані. Інші геометричні елементи можуть бути використані для дискретизації поверхні (рис. 1); проте лише дискретизація поверхні за допомогою трикутників дозволяє отримати файл у форматі STL.

На практиці кожна грань (або «facet» англійською) визначається координатами своїх трьох вершин у декартовій системі.

Кожна грань має атрибут напрямку матеріалу, визначений за допомогою орієнтації одиничної нормалі до грані (або «normal» англійською).

Нормаль спрямована зовні від матеріалу (рис. 2).

Наразі, крім втрати інформації, що відбувається через відсутність відповідних метаданих у файлі STL, виникає значний

розріз у цифровому процесі додавання матеріалу. Фактично, модель, створена у CAD 3D, перетворюється на набір трикутних граней (у форматі STL) [2].

Потім, з використанням цього файла, програмне забезпечення САМ автоматично

розбиває об'єкт на тонкі горизонтальні шари, які виготовляються на апаратах для адитивного виробництва (див. рис. 3). Процес перетворення вихідної моделі з CAD на файл STL, необхідний для САМ, спричинює цифровий розрив.



Рис. 1. Візуалізація файлів із дискретними поверхнями

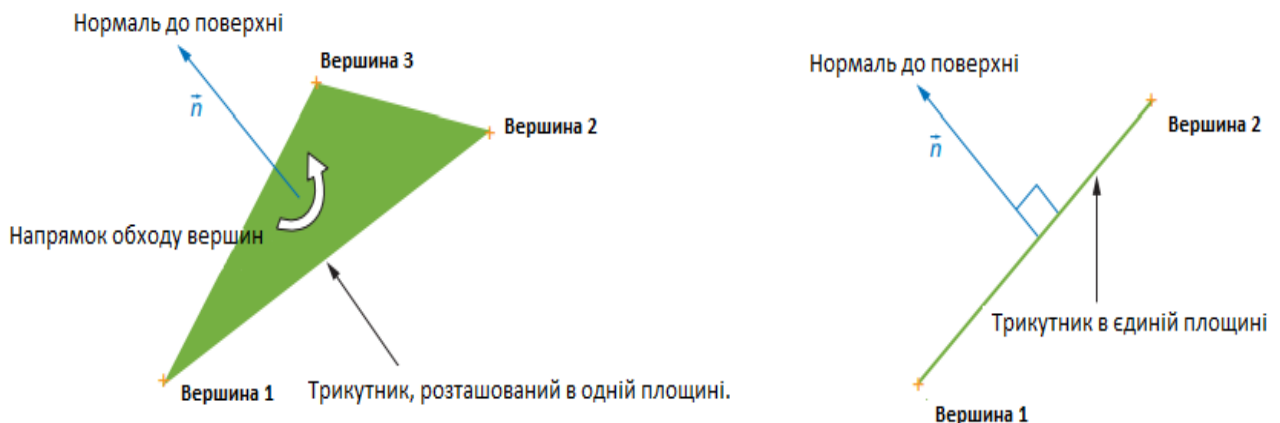


Рис. 2. Схематизація трикутника у форматі STL з указаними вершинами та відповідною нормаллю



Рис. 3. Ілюстрація порушення цифрового ланцюга

Сітку STL формують за допомогою теселяції, що означає розміщення геометричних елементів у формі трикутників на всій поверхні тривимірної моделі таким чином, щоб утворилися безперервні елементи без перекриттів чи

проміжків [3; 4]. Найбільш поширений метод для досягнення цього – використання алгоритму Делонея. Цей підхід дозволяє створювати складні тривимірні об'єкти, збираючи прості геометричні форми, такі як трикутники.

Під час створення файла STL слід дотримуватися кількох правил. Кожен трикутник у файлі STL має спільні дві

вершини із кожним з трикутників (рис. 4). Виходячи з цього правила, правильний файл STL повинен мати парну кількість граней.



Рис. 4. Графічне зображення правила вершин

Правило сортування трикутників рекомендує упорядковувати вершини за зростанням значень координат по осі z для полегшення обробки файла деякими програмами [1]. Однак це правило не завжди строго виконується.

Існує два типи кодування файлів у форматі STL: ASCII (рис. 5) і бінарний (рис. 6). Обидва типи містять однакову інформацію, відмінність полягає лише в організації та зберіганні даних у комп'ютері. Формат STL у вигляді ASCII є текстовим кодуванням і може бути переглянутий за допомогою будь-якого текстового редактора. Формат STL у вигляді бінарного коду не може бути прочитаний звичайним

текстовим редактором, проте він створює файли меншого розміру.

Особливість формату STL полягає в тому, що він безрозмірний. У файлі STL відсутня інформація про масштаб чи довжину. Це означає, що у файлі немає внутрішнього опису одиниць вимірювання, використаних для створення тривимірної моделі. Тому одиниці, що відповідають за розміри, обирає користувач при відкритті або читанні файла (наприклад, мікрометри, міліметри, дюйми, сантиметри і т. д.). Після цього можна обчислити площу граней, які утворюють сітку, а також об'єм, включений всередині сітки [5; 6].

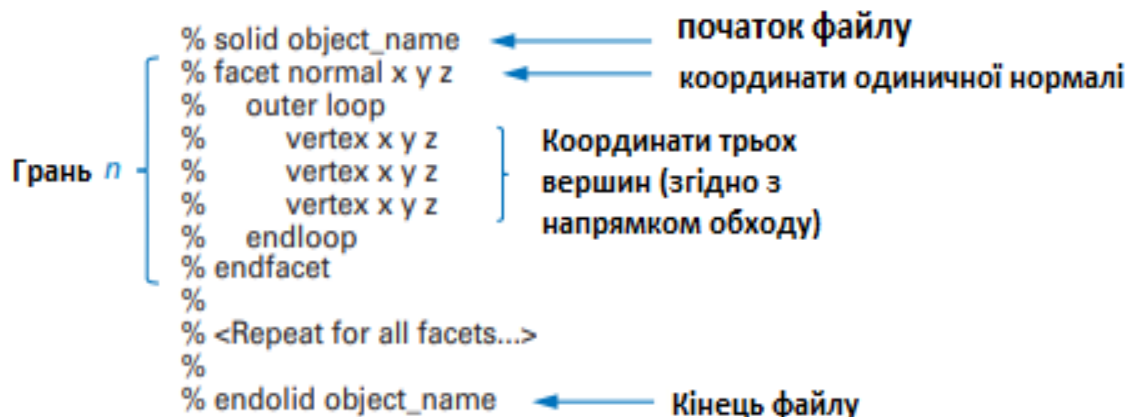


Рис. 5. Структура файла у форматі ASCII STL

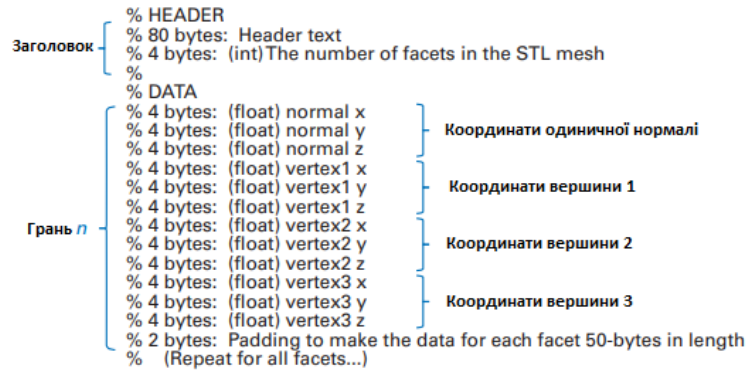


Рис. 6. Структура бінарного файла STL

Розрахунок площі геометрії у форматі STL досить простий. Формула Герона дозволяє обчислити площу трикутника A_i трикутника i у просторі, знаючи довжини трьох сторін l_k i , отже, також півпериметр p_i . Загальна площа поверхні мережі є сумою всіх площових одиниць A_i кожної грані i .

Довжина ребра l_k між двома точками $A(x_A, y_A, z_A)$ і $B(x_B, y_B, z_B)$ отримується з рівняння:

$$l_k = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2}, \quad (1)$$

де $k = 1, 2, 3$.

Півпериметр p_i елементарного трикутника i (грані) задається рівнянням:

$$p_i = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 l_k. \quad (2)$$

Формула Герона дозволяє визначити площу A_i елементарного трикутника i (грані):

$$A_i = \sqrt{p_i(p_i - l_1)(p_i - l_2)(p_i - l_3)}. \quad (3)$$

Загальна площа сітки:

$$\text{Загальна площа} = \sum A_i. \quad (4)$$

Розрахунок об'єму сітки може бути корисним для оцінення обсягу матеріалу, необхідного для виготовлення виробу. Однак обчислення об'єму, включеного всередині сітки STL, – складна задача. Найбільш ефективний метод полягає в обчисленні об'єму кожного тетраедра, який має чотири вершини, при цьому основою є елементарний трикутник i (грань, що складається з трьох точок: А, В, С), а вершиною є точка початку координат (О) (рис. 7).

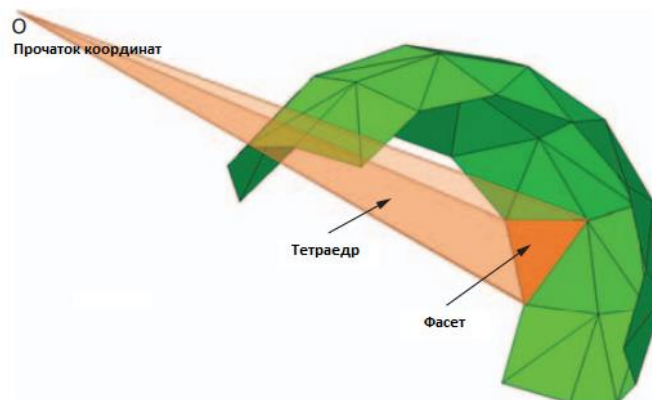


Рис. 7. Графічне зображення створення тетраедра на частині сферичної мережі

Дискретизація поверхні може стати причиною виникнення дефектів, які, у свою чергу, часто викликають проблеми у подальшому виготовленні деталей. Навіть за відсутності дефектів якість дискретизованої поверхні може бути оцінена за допомогою геометричних критеріїв якості.

Після автоматичного створення сітки, на жаль, можуть виникати деякі загальні дефекти на отриманій дискретизованій геометрії.

Вектор нормалі до грані повинен вказувати на зовнішній бік матеріалу, щоб

дозволити розрізняти зовнішню та внутрішню частини об'єму. У деяких випадках можливо, що деякі грані отримують нормалі, спрямовані у протилежний бік. Для таких граней вказівка напрямку матеріалу буде невірною. Наприклад, у випадку червоного трикутника (рис. 8) нормаль спрямована всередину, а не назовні. Така грань має обернену нормаль. Можливо, що геометрія, утворена гранями, має пропуски або отвори на поверхні (рис. 9).

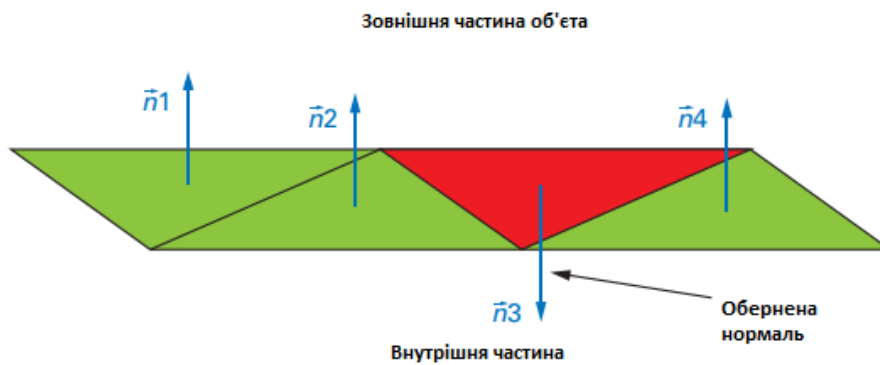


Рис. 8. Нормаль до оберненої грані

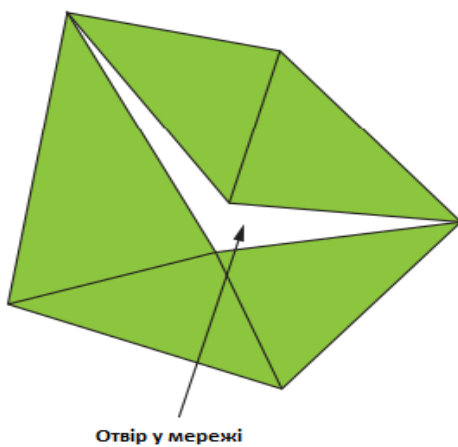


Рис. 9. Незакрита сітка STL

Поверхня, яка була дискретизована, складається з прилеглих граней, де дві сусідні грані мають спільне ребро. Проте існує можливість, що одна грань може перекривати іншу замість того, щоб бути прилегою до неї (рис.10). У такому випадку перекривальна грань не повністю відповідає правилу розміщення вершин.

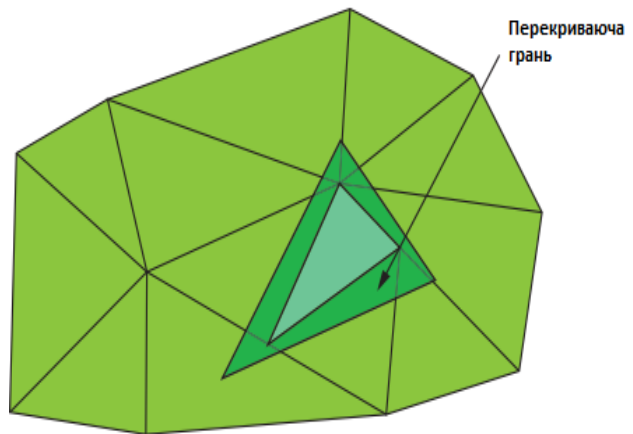


Рис. 10. Випадок перекривальної грані

У певних випадках створення сітки може спричинити появу граней, які перетинаються (рис. 11), що порушує правило розміщення вершин.

У геометрії, яка була дискретизована, можуть існувати окремі грані, частково або повністю відокремлені від решти геометрії (рис. 12). У такому випадку правило

розміщення вершин не дотримується повністю.

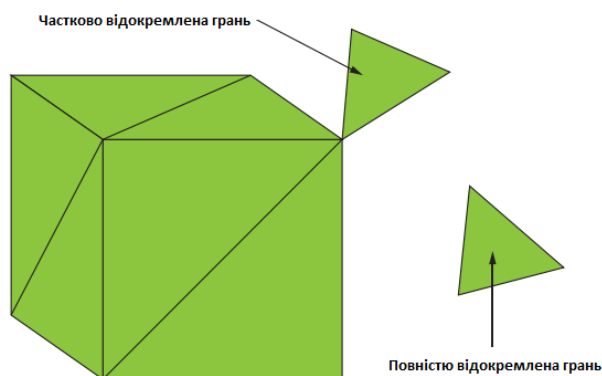


Рис. 11. Випадок із гранями, які перетинаються

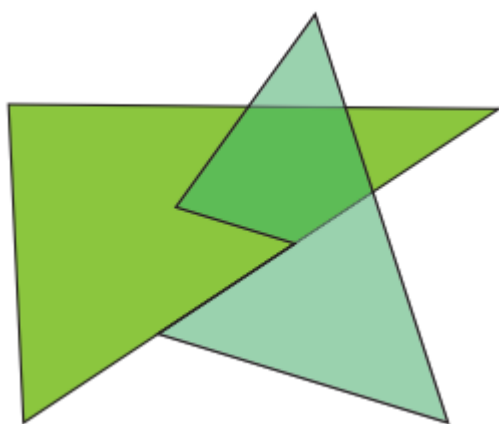


Рис. 12. Випадок з окремими гранями

У програмах комп'ютерно-допоміжного проєктування (САПР) всі ці недоліки зазвичай називаються «неманіфольною геометрією». Щоб виправити ці проблеми максимально ефективно, сучасні програми САПР мають у своєму арсеналі різноманітні інструменти. Наприклад, є інструмент, який дозволяє обертати нормалі граней так, щоб вони коректно вказували на зовнішній бік матеріалу [7; 8].

Також існують інструменти для видалення окремих трикутників або груп трикутників. Ці засоби можуть бути використані для вирішення проблем із перекриттям, перетинами та ізольованими гранями [9; 10].

Також можна вручну створювати додаткові трикутники, наприклад, для заповнення отворів у сітці. Цей ручний підхід придатний для дуже малих отворів. Однак для великих отворів розроблено

багато автоматичних алгоритмів «заповнення отворів».

Серед викликів цих алгоритмів можна відмітити кривизну сусідніх поверхонь та оптимальне відтворення геометрії сусідніх трикутників.

Нарешті, були розроблені інструменти для автоматичного очищення мережі від ізольованих, дубльованих або граней із некоректною орієнтацією.

Висновки та перспектива подальших досліджень

Дослідження файлів у форматі STL має велике значення в контексті розвитку адитивного виробництва та цифрових технологій у будівельній галузі. Надання вичерпного опису основної інформації, пов'язаної з використанням цього формату, включає методи обчислення площі та об'єму сітки STL, що важливо для ефективного моделювання та виробництва деталей.

Під час дослідження виявлено низку помилок та ключових критеріїв для оцінки геометричної якості сітки. Це включає в себе такі аспекти, як правильне орієнтування нормалей, виявлення та виправлення перекриття, перетинів та ізольованих граней.

Для подальших досліджень пропонується розглянути альтернативні варіанти подолання деяких недоліків формату STL, таких як автоматизоване виявлення та виправлення помилок у сітці, розроблення нових форматів файлів із більшою функціональністю та підтримкою додаткових властивостей моделей. Дослідження таких альтернатив може сприяти поліпшенню ефективності та точності використання файлів для 3D-друку будівельних об'єктів та в адитивному виробництві.

Використання більш продуктивних форматів файлів: замість STL можна використовувати більш продуктивні формати, такі як OBJ, PLY або 3MF. Ці формати можуть підтримувати більш широкий спектр функцій, таких як текстури, колірні дані, нормалі та інші.

Використання більш точних форматів: деякі формати, такі як STEP або IGES,

забезпечують більш точне зображення геометрії, що може бути корисним для інженерних застосувань та точних обчислень.

Компресія даних: для зменшення обсягу даних та поліпшення швидкості обробки можна застосовувати методи компресії даних для формату STL або використовувати інші формати з вбудованою підтримкою компресії.

Використання додаткових метаданих: додавання додаткових метаданих до файлів, таких як назви, описи, автори тощо, може

поліпшити організацію та розуміння моделей.

Стандартизація: встановлення стандартів для створення та обміну файлами тривимірних моделей може поліпшити сумісність та спростити роботу з ними між різними програмами та системами.

Ці альтернативні варіанти можуть допомогти усунути деякі недоліки формату STL та поліпшити процес роботи з тривимірними моделями, забезпечуючи кращу якість та продуктивність.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 3D printer g-code commands : full list & tutorial. All3DP. URL: <https://all3dp.com/2/3d-printer-g-code-commands-list-tutorial/> (дата звернення : 07.07.2022).
2. Гусев В., Нікіфорова Т. Дослідження етапів перетворення об'ємної моделі виробу на керуючий код для 3d-принтера в контексті автоматизованого будівництва технології 3d-друку. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 4. С. 38–45. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.250822.38.876%20>
3. Nayyeri P., Zareinia K., Bougherara H. Planar and nonplanar slicing algorithms for fused deposition modeling technology: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 119, № 5-6. Pp. 2785–2810.
4. Hager I., Golonka A., Putanowicz R. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? *Procedia engineering*. 2016. Vol. 151. Pp. 292–299. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357> (дата звернення : 07.07.2022).
5. Гусев В., Нікіфорова Т. Аналіз файлів формату stl як вхідних даних для систем швидкого прототипування. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2022. № 11. С. 77–85. URL: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.11.2022.77-85>
6. Khoshnevis B. Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies. *Automation in Construction*. 2004. Vol. 13, № 1. Pp. 5–19. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012> (дата звернення : 07.07.2022).
7. STL repair (online & offline) : the best software of 2021. All3DP. URL: <https://all3dp.com/2/stl-repair-fixer-tool-online-offline/> (дата звернення : 07.07.2022).
8. STL (stereolithography) file format family. Home Library of Congress. URL: <https://www.loc.gov/preservation/digital/formats/fdd/fdd000504.shtml#useful> (дата звернення : 07.07.2022).
9. Szilvsi-Nagy M., Mátyási G. Analysis of STL files. *Mathematical and computer modelling*. 2003. Vol. 38, № 7–9. С. 945–960. URL: [https://doi.org/10.1016/s0895-7177\(03\)90079-3](https://doi.org/10.1016/s0895-7177(03)90079-3) (дата звернення : 07.07.2022).
10. Гусев В. О., Нікіфорова Т. Д. Технологія 3D-друку у будівництві. Концептуальна схема перетворення 3d-моделі виробу в керуючий код для 3D-принтеру. *Комплексні композитні конструкції будівель та споруд в умовах воєнного стану (CSCS-2022) : зб. наук. пр. за матер. XIV Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Полтава, 20–22 липня 2022 р.)*. Полтава : Національний університет «Полтавська політехніка ім. Юрія Кондратюка», 2022. С. 59–61.

REFERENCES

1. 3D printer g-code commands : full list & tutorial. All3DP. URL: <https://all3dp.com/2/3d-printer-g-code-commands-list-tutorial/> (date of access : 07.07.2022).
2. Husiev V.O. and Nikiforova T.D. *Doslidzhennya etapiv peretvorenniya ob'yemnoyi modeli vyrobu na keruyuchy kod dlya 3d-pryntera v konteksti avtomatyzovanoho budivnytstva tekhnolohiyi 3d-druku* [Study of the stages of conversion of a three-dimensional model of a product into a control code for a 3d printer in the context of automated construction of 3d printing technology]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2022, no. 4, pp. 38–45. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.250822.38.876%20> (in Ukrainain).
3. Nayyeri P., Zareinia K. and Bougherara H. Planar and nonplanar slicing algorithms for fused deposition modeling technology : a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022, vol. 119, no. 5–6, pp. 2785–2810.

4. Hager I., Golonka A. and Putanowicz R. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? *Procedia Engineering*. 2016, vol. 151, pp. 292–299. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357> (date of access : 07.07.2022).
5. Husiev V.O. and Nikiforova T.D. *Analiz fayliv formatu stl yak vkhidnykh danykh dlya system shvydkoho prototypuvannya* [Analysis of stl format files as input data for rapid prototyping systems]. *Budivel'ni konstruktsiyi. Teoriya i praktyka* [Building structures. Theory and practice]. 2022, no. 11, pp. 77–85. URL: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.11.2022.77-85> (in Ukrainian).
6. Khoshnevis B. Automated construction by contour crafting–related robotics and information technologies. *Automation in Construction*. 2004, vol. 13, no. 1, pp. 5–19. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012> (date of access : 07.07.2022).
7. STL repair (online & offline) : the best software of 2021. All3DP. URL: <https://all3dp.com/2/stl-repair-fixer-tool-online-offline/> (date of access : 07.07.2022).
8. STL (stereolithography) file format family. Home Library of Congress. URL: <https://www.loc.gov/preservation/digital/formats/fdd/fdd000504.shtml#useful> (date of access : 07.07.2022).
9. Szilvsi-Nagy M. and Mátyási G. Analysis of STL files. *Mathematical and computer modelling*. 2003, vol. 38, no. 7–9, pp. 945–960. URL: [https://doi.org/10.1016/s0895-7177\(03\)90079-3](https://doi.org/10.1016/s0895-7177(03)90079-3) (date of access : 07.07.2022).
10. Husiev V.O. and Nikiforova T.D. *Tekhnolohiya 3D-druku u budivnytstvi. Kontseptual'na skhema peretvorennya 3d-modeli vyrobu v keruyuchy kod dlya 3D-prynteru. Kompleksni kompozytni konstruktsiyi budivel' ta sporud v umovakh voyennoho stanu (CSCS-2022)* [3D printing technology in construction. Conceptual diagram of the transformation of a 3D product model into a control code for a 3d printer. Complex composite structures of buildings and structures under martial law (CSCS-2022)]. *Zb. nauk. pr. za materialamy XIV Mizhnar. naukovo-tekhn. konf., m. Poltava, 20–22 lypnia 2022 r.* [Collection. of Science Works based on the Materials of the XIV International Scientific and Technical Conf., Poltava, July 20–22, 2022]. Poltava : National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”, 2022, pp. 59–61. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 21.02.2024.