

УДК 004.92:62-9

DOI <https://doi.org/10.32782/uad.2026.3.9>**Головачук Ігор Павлович,**

кандидат технічних наук,  
доцент кафедри архітектури та дизайну  
Луцького національного технічного університету  
ORCID ID: 0000-0003-0811-6107  
[golovachuk.igor@gmail.com](mailto:golovachuk.igor@gmail.com)

**Мирошніченко Іванна Володимирівна,**

асистент кафедри архітектури та дизайну  
Луцького національного технічного університету  
ORCID ID: 0000-0003-3287-5808  
[myroshnychenko.i@lntu.edu.ua](mailto:myroshnychenko.i@lntu.edu.ua)

**Шмельов В'ячеслав Михайлович,**

асистент кафедри архітектури та дизайну  
Луцького національного технічного університету  
ORCID ID: 0009-0008-8977-8893  
[s.chetverzuk@lutsk-ntu.com.ua](mailto:s.chetverzuk@lutsk-ntu.com.ua)

**Бурчак Ігор Несторович,**

доцент кафедри архітектури та дизайну  
Луцького національного технічного університету  
ORCID ID: 0000-0003-2662-6442  
[i.burchak@lntu.edu.ua](mailto:i.burchak@lntu.edu.ua)

## МЕТОДИ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ ГРАФІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ НА ВИРОБАХ СКЛАДНОЇ ФОРМИ

*Метою дослідження є розробка та обґрунтування методів 3D-моделювання графічних зображень на виробі складної форми з використанням САД-систем для подальшого проектування прес-форм.*

*У статті розглянуто методи 3D-моделювання графічних зображень на виробі складної форми в середовищі сучасних САД-систем з метою їх подальшого використання при проектуванні прес-форм. Проаналізовано особливості формування рельєфних та заглиблених елементів на криволінійних поверхнях, визначено обмеження стандартних інструментів моделювання та запропоновано алгоритм побудови параметричних моделей з урахуванням технологічних вимог до виготовлення формуютьовальної оснастки. Отримані результати дозволяють підвищити точність геометричного відтворення графічних елементів, скоротити час проектування прес-форм та забезпечити відповідність моделей вимогам виробництва. Досліджено інструментальні можливості параметричного моделювання для формування рельєфних та гравійованих елементів. Розроблено алгоритм побудови 3D-моделі виробу з інтегрованим графічним зображенням.*

*Визначено особливості формування геометрії, придатної для подальшого конструювання прес-форми. Вдосконалено методики 3D-моделювання графічних зображень на поверхнях складної просторової форми з урахуванням вимог до конструювання прес-форм для виготовлення мила, встановленні залежностей між параметрами рельєфу графічного зображення та конструктивними особливостями формуютьовальної оснастки.*

*Також проаналізовано вплив типів поверхні на якість та чіткість відтворення графічних елементів у процесі формуютьовання. Обґрунтовано доцільність застосування адаптивних параметрів згладжування та контролю кутів ухилу, що дозволяє якісніше відокремити виріб від прес-форми.*

**Ключові слова:** 3D-моделювання, графічні зображення, САД-системи, параметричне моделювання, прес-форми, виробі складної форми.

## Holovachuk Igor, Myroshnychenko Ivanna, Shmelov Viacheslav, Burchak Ihor. METHODS OF 3D MODELING OF GRAPHIC IMAGES ON PRODUCTS OF COMPLEX SHAPE

*The aim of the study is to develop and substantiate methods for 3D modeling of graphic images on complex-shaped products using CAD systems for subsequent mold design.*

*The article examines methods of 3D modeling of graphic images on complex-shaped products in modern CAD environments for their further application in mold design. The features of forming relief and recessed elements on curved surfaces are analyzed, the limitations of standard modeling tools are identified, and an algorithm for constructing parametric models is proposed, taking into account technological requirements for the manufacture of forming tooling. The obtained results make it possible to improve the accuracy of geometric reproduction of graphic elements, reduce the time required for mold design, and ensure compliance of models with production requirements. The capabilities of parametric modeling tools for creating relief and engraved elements are investigated. An algorithm for constructing a 3D model of a product with an integrated graphic image is developed.*

*The features of forming geometry suitable for further mold design are determined. The methods of 3D modeling of graphic images on surfaces of complex spatial shape are improved, taking into account the requirements for designing molds for soap production, and relationships between the parameters of the graphic relief and the design features of forming tooling are established.*

*The influence of surface types on the quality and clarity of graphic element reproduction during the forming process is also analyzed. The feasibility of using adaptive smoothing parameters and controlling draft angles is substantiated, which allows for improved separation of the product from the mold.*

**Key words:** 3D modeling, graphic images, CAD systems, parametric modeling, molds, complex-shaped products.

**Вступ.** У сучасному промисловому дизайні цифрові технології формоутворення відіграють ключову роль у процесі створення конкурентоспроможної продукції. Інтеграція графічних зображень у тривимірну структуру виробу є важливим засобом формування візуальної ідентичності, підвищення впізнаваності бренду та створення доданої естетичної цінності продукту. Рельєфні логотипи, декоративні композиції, орнаментальні структури та типографічні елементи дедалі частіше стають невід'ємною складовою об'ємно-просторового рішення виробів серійного виробництва.

На відміну від площинної графіки, інтеграція зображень у криволінійні поверхні виробів потребує врахування складної геометрії, пластичних характеристик форми та технологічних обмежень виготовлення. Особливо це актуально для продукції, що виготовляється методом лиття або пресування, де формоутворювальна оснастка повинна забезпечувати точне відтворення дрібних деталей рельєфу, коректні кути нахилу. У таких умовах дизайнерське рішення безпосередньо пов'язане з інженерною реалізацією.

Сучасні CAD-системи відкривають широкі можливості для параметричного моделювання рельєфних та заглиблених графічних елементів [2, 10]. Проте їх застосування у практиці промислового дизайну часто обмежується

стандартними інструментами без системного врахування технологічних вимог майбутнього виробництва. Відсутність узгодженої методики може призводити до спотворення графіки при перенесенні на складну поверхню, втрати композиційної цілісності або ускладнення процесу виготовлення прес-форм.

У контексті розвитку цифрового прототипування особливого значення набуває формування алгоритмів моделювання, які поєднують художню виразність із технологічною доцільністю. Дизайнер має працювати не лише з пластикою форми, а й із параметрами, що впливають на подальший виробничий цикл: глибиною рельєфу, кутами виймання, масштабуванням з урахуванням усадки матеріалу, формуванням лінії рознімання.

Таким чином, дослідження методів 3D-моделювання графічних зображень на виробах складної форми для подальшого проектування прес-форм є актуальним завданням у сфері промислового дизайну. Воно спрямоване на гармонізацію художнього формоутворення та інженерної реалізації в умовах серійного виробництва.

**Матеріали та методи.** М. Р. Groover розглядав технологічні аспекти цифрового виробництва та вплив геометрії виробу на якість формування поверхні [14].

Вагомий внесок у розвиток геометричного моделювання також зробили Christoph

М. Hoffmann, який досліджував математичні основи твердотільного та геометричного моделювання [15], а також Michael Garland і Paul Heckbert, які розробили методи спрощення поверхонь із використанням квадратичних метрик похибки [15]. Крім того, Martin J. Pratt зробив внесок у стандартизацію представлення геометричних моделей через STEP-формат [7].

Саме їхні праці заклали математичний апарат, який використовується у CAD-системах (у тому числі SolidWorks) для побудови складних поверхонь і перенесення графіки на криволінійні оболонки.

Незважаючи на значну кількість досліджень у сфері геометричного моделювання та адитивного виробництва, питання оптимізації художніх векторних зображень для виготовлення прес-форм дрібносерійних виробів (зокрема декоративного мила) залишається недостатньо систематизованим. Запропонована методика інтегрує положення теорії кривих Безьє, алгоритмів редукції складності та принципів технологічності формоутворення.

**Результати.** Основною ідеєю нашої статті було створення графічного зображення з подальшою адаптацією під нанесення на складні криволінійні поверхні.

Ми зупинилися на створенні айдентики для мила – це поєднання брендингу, графічного дизайну та маркетингу, адже продукт належить до категорії щоденного використання, де покупець часто приймає рішення на основі візуального враження.

Як цільову аудиторію ми обрали людей з чутливою шкірою, любителів натуральної косметики та дітей. Ми плануємо розробити графічне зображення призначене для натурального мила ручної роботи з м'якими кольорами, рослинними елементами, «еко»-естетикою у силі мінімалізму, зі стриманими кольорами та витонченою типографікою.

Нам підходить колірна палітра: жовтий чи помаранчевий (зерна злаків) та зелений (натуральність, трави, екологія).

Для забезпечення читабельності тексту оберемо шрифт, що формує характер бренду, а саме класичний.

Серед графічних елементів використано рослини (злакові) та елементи сільського пейзажу для підсилення екологічного спрямування.

Так як мило – це продукт, пов'язаний із доглядом, чистотою та приємними відчуттями. Тому дизайн повинен викликати: відчуття свіжості, затишку, натуральності та турботи про себе [16].

Саме емоційний дизайн часто стає ключовим фактором покупки.

У середовищі Corel нами було створено графічну ілюстрацію (рис. 1) адаптовану під нанесення на складну криволінійну поверхню, наприклад мило. Композиція має класичну медальйонну (емблемну) побудову. Основними елементами композиції є: зовнішнє кільце з обрамленням знака, текстове кільце з назвою бренду, декоративні рослинні елементи, центральна ілюстративна сцена. Така структура добре підходить для: штампування, тиснення та рельєфного лиття мила. Кругла композиція природно відповідає формі шматка мила.



Рис. 1. Графічна ілюстрація мила

Композиція має класичну емблемну побудову. Зовнішнє кільце обрамлює знак. Текстове кільце містить назва бренду. Декоративні рослинні елементи утворюють центральну ілюстративну сцену. Така структура добре підходить для: штампування, тиснення, рельєфного лиття мила.

Оскільки кругла композиція природно відповідає формі шматка мила.

Таблиця 1

## Орієнтовні діапазони ентропії

Характер зображення	Ентропія	Придатність графічного зображення до нанесення на криволінійну поверхню
Просте (логотипи)	0–0.5	Відмінно
Середнє	0.5–0.8	Залежить від масштабу
Дуже складне	0.8–1.0	Ризик втрати деталей

Композиція стабільна та врівноважена. Композиційний центр мила це – сільський пейзаж з двома будиночками. Таким чином ми хотіли відтворити: відчуття натуральності, асоціацію з фермерським походженням, образ екологічного продукту. Пейзаж має перспективну глибину. На передньому плані ми зобразили рослини. Середній план відвели для поля й на задньому плані показали пагорби та небо.

Ми виконали зображення у стилі контурної декоративної графіки з рівномірною товщиною ліній, відсутністю тіней, використали штрихування для поля. Це дуже добре підходить для: гравіювання, лазерного різання та 3D-штампів. Для надписів використано класичний антиквений шрифт (serif). Він елегантно виглядає та створює відчуття традиції й добре читається по колу.

Нами було обрано стиль фермерської емблеми, або ж еко-бренду. Акцент було зроблено на: натуральність, ручну роботу, фермерське виробництво та екологічність.

Ми провели аналіз графічного зображення та його композиційної структури. Графіка виконана лінійним контурним стилем без заливок.

Для кількісної характеристики складності зображення використаємо показник ентропії Шеннона, що визначається за формулою:

$$H = -\sum p_i \log_2 p_i,$$

де  $p_i$  – ймовірність появи пікселя з яскравістю  $iii$ ;

$H$  – ентропія.

Проведемо аналіз зображення та визначимо наближену кількість пікселів чорного кольору з показником яскравості до 80. Після підстановки значень у формулу, отримаємо:  $H = -\sum 0.2 \log_2 0.2 \approx 0.54$ .

Орієнтовні діапазони ентропії представлені у табл. 1.

Потрібно враховувати, що на складних поверхнях зображення деформується та дрібні деталі втрачаються швидше, ніж на площині. Чим більша кривизна – тим менша допустима складність. Зображення з великими чорними зонами друкується добре на криволінійній поверхні, а з дрібними

елементами – погано. Наприклад, для FDM-друку мінімальна товщина лінії  $\approx 0,4-0,6$  мм, а для SLA/Resin вона може становити  $0,1-0,2$  мм [1]. Якщо дрібні елементи зображення менші за це значення, тоді вони можуть втрачатися або ж “зливатися”.

Нами було прийнято рішення спростити зображення для усунення загроз поганої якості друку. На емблемі присутні дрібні елементи: штрихування на полях, маленькі рослини, хмари та лінії дахів. При реальному розмірі штампа  $50-70$  мм можливі проблеми з: штрихуванням яке може зливатися, дрібні рослини можуть втрачатися, тонкі лінії можуть не відтиснутись.

Ми вирішили оптимізувати графічну ілюстрацію для виробництва мила. Спростити штрихування. Замість багатьох ліній залишили: 2–3 основні лінії поля, збільшити товщину ліній. Оптимальна товщина ліній для штампа:  $0.6-1.0$  мм.

Зменшили кількість рослин, прибравши кожен другу рослину та зробили їх більшими. Для даху будинків зменшили кількість ліній. Ми розробили декілька варіантів оптимізованих рисунків (табл. 2).

Після ретельного аналізу ми зупинились на четвертому варіанті. Щоб підкреслити призначення продукту ми добавили символ мила до ілюстрації. Маленькі бульбашки, які ніби піднімаються вгору біля хмаринок доповнюють композицію.

Для створення моделі адаптованої під 3D-друк нами було обрано SolidWorks. Ключовою перевагою SolidWorks є параметричне моделювання. Можна швидко адаптувати модель під різні форми. SolidWorks

Sketcher дозволяє працювати з точною геометрією, будувати чіткі 2D-контури логотипу. У цій програмі присутні інструменти для створення рельєфу та проєціювання ескізу на складну криволінійну поверхню, що значно спрощує створення рельєфних зображень (рис. 2). На рисунку представлено етапи 3D-моделювання виробу складної форми у середовищі SolidWorks. Ліворуч зображено базову геометричну форму мила, отриману шляхом побудови ескізу з подальшим застосуванням операцій витягування (Extruded Boss/Base) та згладжування граней за допомогою інструмента Fillet, що забезпечує ергономічність та плавність контурів виробу. Праворуч наведено модель із нанесеним рельєфним графічним зображенням. Графічний елемент, що включає композицію із лінійних та криволінійних примітивів, адаптовано до криволінійної поверхні шляхом проєціювання (Wrap або Project Curve), що дозволяє коректно відобразити зображення на поверхні складної форми.

Моделювання текстової інформації на поверхні виробів складної просторової

форми, зокрема мила овальної геометрії, характеризується низкою специфічних технічних та інструментальних особливостей, обумовлених необхідністю коректної адаптації двовимірного текстового ескізу до криволінійної поверхні.



Рис. 2. Етапи 3D-моделювання виробу

На початковому етапі формується параметричний ескіз тексту із використанням інструмента Sketch Text, що дозволяє задавати гарнітуру, розміри, міжлітерні інтервали та орієнтацію напису. Для узгодження композиції із формою виробу текст, як правило, розміщується вздовж допоміжних кривих

Таблиця 2

### Варіанти оптимізованих графічних ілюстрацій

<p>2</p>  <p>Внесено ряд змін: трохи товстіші лінії, вирівняна товщина контурів та рослини зроблені трохи більшими.</p>	<p>2</p>  <p>Була проведена наступна оптимізація: зменшено кількість рослин, прибрано частину штрихування полів, збільшено будиночки та спрощено дах.</p>
<p>4</p>  <p>Проведено наступні спрощення: мінімум дрібних деталей, залишено лише основні лінії ландшафту, великі чисті форми та декоративні рослини залишені тільки як акценти.</p>	<p>4</p>  <p>На ній зроблено наступні перетворення: основні елементи графічного зображення підняті, лінії поля та деякі лінії будинків утоплені. До того ж округлені переходи.</p>

(дуг або сплайнів), що забезпечує його рівномірне розташування відносно контурів моделі.

Ключовою особливістю є перенесення текстового ескізу на криволінійну поверхню. У середовищі SolidWorks це реалізується за допомогою інструмента Wrap, який забезпечує проєціювання тексту без суттєвих геометричних спотворень. На відміну від стандартних операцій витягування, цей підхід дозволяє зберегти пропорції символів та їхню читабельність навіть на опуклих або складно профільованих поверхнях.

Формування рельєфу здійснюється шляхом вибору режимів Emboss (створення виступаючого тексту) або Deboss (створення заглибленого напису). При цьому важливим є коректний підбір глибини рельєфу, яка повинна забезпечувати візуальну виразність тексту та відповідати технологічним вимогам виготовлення (наприклад, лиття у формах) [5, 6].

Додатковою особливістю є необхідність згладжування переходів між текстовими елементами та базовою поверхнею виробу. Це досягається застосуванням інструментів Fillet та, за потреби, Draft, що дозволяють уникнути різких кромek, підвищити ергономічність виробу та покращити умови виймання з форми.

Отримана 3D-модель демонструє можливості SolidWorks щодо створення виробів складної органічної форми з інтегрованими графічними елементами, а також дозволяє виконувати подальший аналіз технологічності та підготовку до виробництва. У SolidWorks закладено можливість перевірки: мінімальних елементів (відстані між лініями та товщини) та плавність форм (округлення та нахили для виймання з форми).

У програмі можна зберігати файл у форматах: STL (для 3D-друку) або ж STEP (для ЧПУ), що дає можливість одразу передати модель у виробництво.

На рисунку 3 представлено результат 3D-моделювання та фотореалістичного рендерингу прототипу косметичного виробу – мила овальної складної форми

з інтегрованим рельєфним графічним елементом. Модель розроблено у програмному середовищі Autodesk 3ds Max із використанням полігонального моделювання та модифікаторів згладжування поверхні.



Рис. 3. Фінальний рендер

Графічне зображення на поверхні виробу виконане у вигляді тиснення (emboss), що включає стилізований пейзаж із архітектурними елементами та текстовими написами, гармонійно інтегрованими у загальну композицію.

Матеріал моделі імітує матову поверхню мила з легким розсіюванням світла, що досягається за рахунок налаштування шейдерів (Subsurface Scattering). Освітлення сцени реалізовано із застосуванням студійного HDRI-середовища, що дозволяє підкреслити форму об'єкта, глибину рельєфу та текстурні особливості.

Фінальний рендер виконано з урахуванням рекламної подачі: композиція доповнена нейтральним мармуровим фоном та декоративними елементами (квіти), які підсилюють естетичне сприйняття продукту та акцентують увагу на графічному зображенні.

**Висновки.** У результаті дослідження систематизовано методи 3D-моделювання графічних зображень на виробах складної просторової форми з урахуванням подальшого проєктування прес-форм. Встановлено, що ефективність інтеграції графічних елементів значною мірою залежить від параметричного підходу до формування рельєфу та врахування технологічних обмежень ще на етапі цифрового прототипування.

Доведено, що застосування алгоритмізованої послідовності моделювання (підготовка векторного контуру – контрольована проєкція – формування рельєфу – перевірка технологічності) дозволяє зберегти композиційну цілісність графіки та забезпечити її коректне відтворення у формоутворювальній оснастці.

Визначено ключові параметри, що впливають на якість формоутворення: глибина та профіль рельєфу, мінімальна товщина

елементів, кут ухилу та радіуси переходів. Їх узгодження з конструктивними вимогами прес-форми забезпечує зменшення кількості ітерацій у процесі проєктування та підвищує ефективність взаємодії дизайнера й інженера.

Отримані результати можуть бути використані у практиці промислового дизайну при створенні серійної продукції з інтегрованими графічними елементами та у навчальному процесі підготовки дизайнерів.

### Література:

1. Ahn S. H., Montero M., Odell D., Roundy S., Wright P. K. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*. 2002. Vol. 8, No. 4. P. 248–257. DOI: <https://doi.org/10.1108/13552540210441166>
2. Bodein Y., Rose B., Caillaud E. Explicit reference modeling methodology in parametric CAD system. *Computers in Industry*. 2014. Vol. 65, No. 1. P. 136–147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.08.004>
3. Choi S. H., Cheung H. H. A multi-material virtual prototyping approach to product design. *Computer-Aided Design*. 2005. Vol. 37, No. 1. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2004.03.003>
4. Dorst K. The core of “design thinking” and its application. *Design Studies*. 2011. Vol. 32, No. 6. P. 521–532. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.destud.2011.07.006>
5. Favi C., Germani M., Mandolini M. Design for manufacturing and assembly in the product lifecycle management perspective. *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 50. P. 628–633. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.160>
6. Kuo T. C., Huang S. H., Zhang H. C. Design for manufacture and design for “X”: Concepts, applications, and perspectives. *Computers & Industrial Engineering*. 2001. Vol. 41, No. 3. P. 241–260. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(01\)00045-6](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(01)00045-6)
7. Pratt M. J. Introduction to ISO 10303—the STEP standard for product data exchange. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 2001. Vol. 1, No. 1. P. 102–103. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1354995>
8. Rosen D. W. Design for additive manufacturing. *Computer-Aided Design for Additive Manufacturing of Cellular Structures. Computer-Aided Design and Applications*. 2007. Vol. 4, No. 4. P. 585–594. DOI: <https://doi.org/10.1080/16864360.2007.10738493>
9. Shea K., Aish R., Gourtovaia M. Towards integrated performance-driven generative design tools. *Automation in Construction*. 2005. Vol. 14, No. 2. P. 253–264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2004.07.002>
10. Wang H., Yan Y. CAD model simplification for rapid prototyping. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011. Vol. 60. P. 321–331. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3605-5>
11. Ulrich K. T., Eppinger S. D. *Product design and development*. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2016. 432 p.
12. Pahl G., Beitz W., Feldhusen J., Grote K.-H. *Engineering design: A systematic approach*. 3rd ed. London: Springer, 2007. 617 p.
13. Cross N. *Engineering design methods: Strategies for product design*. 4th ed. Chichester: Wiley, 2008. 230 p.
14. Groover M. P. *Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems*. 6th ed. Hoboken: Wiley, 2019. 1025 p.
15. Hoffmann C. M. *Geometric and solid modeling*. San Mateo: Morgan Kaufmann, 1989. 325 p.
16. Norman D. A. *The design of everyday things*. Revised and expanded ed. New York: Basic Books, 2013. 368 p.
17. Ashby M. F., Johnson K. *Materials and design: The art and science of material selection in product design*. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. 336 p.
18. Chua C. K., Leong K. F., Lim C. S. *Rapid prototyping: Principles and applications*. 3rd ed. Singapore: World Scientific, 2010. 512 p.
19. Прусак В. Ф. *Промисловий дизайн: основи проєктування*. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2018. 256 с.
20. Скиба М. Є. Цифрові технології у формоутворенні виробів промислового дизайну. *Вісник Харківської державної академії дизайну і мистецтв*. 2019. № 3. С. 52–58.
21. Garland M., Heckbert P. *Surface simplification using quadric error metrics*. 1997.

### References:

1. Ahn, S. H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., & Wright, P. K. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 8(4), 248–257. <https://doi.org/10.1108/13552540210441166>
2. Bodein, Y., Rose, B., & Caillaud, E. (2014). Explicit reference modeling methodology in parametric CAD system. *Computers in Industry*, 65(1), 136–147. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.08.004>
3. Choi, S. H., & Cheung, H. H. (2005). A multi-material virtual prototyping approach to product design. *Computer-Aided Design*, 37(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2004.03.003>
4. Dorst K. The core of “design thinking” and its application. *Design Studies*. 2011. Vol. 32, No. 6. P. 521–532. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.destud.2011.07.006>
5. Favi C., Germani M., Mandolini M. Design for manufacturing and assembly in the product lifecycle management perspective. *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 50. P. 628–633. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.160>
6. Kuo T. C., Huang S. H., Zhang H. C. Design for manufacture and design for “X”: Concepts, applications, and perspectives. *Computers & Industrial Engineering*. 2001. Vol. 41, No. 3. P. 241–260. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(01\)00045-6](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(01)00045-6)
7. Pratt M. J. Introduction to ISO 10303—the STEP standard for product data exchange. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 2001. Vol. 1, No. 1. P. 102–103. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1354995>
8. Rosen D. W. Design for additive manufacturing. *Computer-Aided Design for Additive Manufacturing of Cellular Structures. Computer-Aided Design and Applications*. 2007. Vol. 4, No. 4. P. 585–594. DOI: <https://doi.org/10.1080/16864360.2007.10738493>
9. Shea K., Aish R., Gourtovaia M. Towards integrated performance-driven generative design tools. *Automation in Construction*. 2005. Vol. 14, No. 2. P. 253–264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2004.07.002>
10. Wang H., Yan Y. CAD model simplification for rapid prototyping. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011. Vol. 60. P. 321–331. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3605-5>
11. Ulrich K. T., Eppinger S. D. *Product design and development*. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2016. 432 p.
12. Pahl G., Beitz W., Feldhusen J., Grote K.-H. *Engineering design: A systematic approach*. 3rd ed. London: Springer, 2007. 617 p.
13. Cross N. *Engineering design methods: Strategies for product design*. 4th ed. Chichester: Wiley, 2008. 230 p.
14. Groover M. P. *Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems*. 6th ed. Hoboken: Wiley, 2019. 1025 p.
15. Hoffmann C. M. *Geometric and solid modeling*. San Mateo: Morgan Kaufmann, 1989. 325 p.
16. Norman D. A. *The design of everyday things*. Revised and expanded ed. New York: Basic Books, 2013. 368 p.
17. Ashby M. F., Johnson K. *Materials and design: The art and science of material selection in product design*. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. 336 p.
18. Chua C. K., Leong K. F., Lim C. S. *Rapid prototyping: Principles and applications*. 3rd ed. Singapore: World Scientific, 2010. 512 p.
19. Prusak V. F. *Industrial design: basics of design*. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2018. 256 p.
20. Skyba M. E. Digital technologies in the formation of industrial design products. *Bulletin of the Kharkiv State Academy of Design and Arts*. 2019. No. 3. P. 52–58.
21. Garland M., Heckbert P. *Surface simplification using quadric error metrics*. 1997.

Дата першого надходження статті до видання: 21.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)