

УДК

В.Я.Ворошук, к.т.н.; А.В.Деркач, к.т.н.

Тернопільський національний технічний університет ім. І.Пулюя, Україна

ІНТЕГРАЦІЯ РЕВЕРС-ІНЖИНІРИНГУ З МЕТОДАМИ 3D СИМУЛЯЦІЇ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ КОНДИТЕРСЬКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

V. Ya. Voroshchuk, Ph.D.; A.V. Derkach, Ph.D.

INTEGRATION OF REVERSE ENGINEERING WITH 3D SIMULATION METHODS IN THE OPERATION OF CONFECTIONERY EQUIPMENT

Сучасна кондитерська промисловість характеризується високим рівнем механізації та автоматизації виробничих процесів із тенденцією до зростання. Значну частину технологічного парку становить зняте з виробництва, порівняно недороге вживане обладнання зарубіжних фірм, яке ще не вичерпало свій ресурс. Проте використання такого обладнання створює складнощі з технічним обслуговуванням та ремонтом. Відсутність запасних частин, тривалі терміни постачання та висока вартість призводять до простоїв виробництва й економічних втрат.

Інтеграція технологій реверс-інжинірингу з методами 3D-симуляції та адитивного виробництва відкриває інноваційні можливості для вирішення цих проблем. Застосування такого комплексного підходу дозволяє оперативно відтворювати необхідні компоненти обладнання без оригінальної конструкторської документації та проводити їхнє віртуальне випробування перед виготовленням.

У кондитерській промисловості особливої уваги потребують компоненти формувального, фасувального та транспортувального обладнання, які зазнають різноманітних механічних навантажень і контактують із харчовими середовищами. Визначення оптимальних структурно-конструктивних параметрів таких компонентів для забезпечення їхньої міцнісної достатності при адитивному виготовленні є актуальним науково-практичним завданням.

Реверс-інжиніринг у контексті підтримки експлуатації обладнання передбачає сканування та оцифрування існуючої деталі, створення цифрової 3D-моделі, інженерний аналіз, оптимізацію геометрії та підготовку до 3D-друку. Для кондитерського обладнання характерна наявність деталей складної геометрії, що взаємодіють із харчовими продуктами. Використання контактних та безконтактних методів сканування забезпечує точність відтворення геометрії в межах 0,05-0,1 мм. Аналіз механічних навантажень ефективно проводиться за допомогою системи SolidWorks Simulation з відхиленням до 8% від реальних показників.

Комп'ютерне моделювання дозволяє прогнозувати поведінку деталей під навантаженням та оптимізувати конструкцію без виготовлення фізичних прототипів. Для компонентів кондитерського обладнання найбільш важливими є: аналіз напружено-деформованого стану методом скінченних елементів, гідродинамічний аналіз для компонентів, що взаємодіють з рідкими та в'язкопластичними середовищами, аналіз термічних навантажень та моделювання контактної взаємодії.

3D-друк надає унікальні можливості для виготовлення запасних частин, особливо у випадках, коли оригінальні компоненти недоступні, потрібне швидке виготовлення деталі або економічно недоцільно замовляти малі партії традиційними методами.

Для формувального обладнання, що включає матриці, пуансони та валки з формуючими елементами, ефективними є технології Selective Laser Sintering (SLS) та Stereolithography (SLA). Надруковані формувальні елементи демонструють задовільну довговічність при роботі з твердими кондитерськими масами за умови правильного підбору матеріалів та параметрів друку.

Компоненти фасувального обладнання мають підвищені вимоги до точності та повторюваності розмірів. Для них доцільно застосовувати Fused Deposition Modeling (FDM) з

використанням ABS, PET-G або Multi Jet Fusion (MJF). Відхилення розмірів деталей, виготовлених методом FDM, становлять $\pm 0,2$ мм, що прийнятно для більшості компонентів.

Елементи транспортувальних систем (шків, ролики, напрямні) піддаються значним циклічним навантаженням та зношуванню. Для них рекомендовано FDM з використанням армованих полімерів або Direct Metal Laser Sintering (DMLS) для металевих компонентів. Експериментальні дослідження доводять, що шків з ABS-пластику, виготовлений з оптимізованими параметрами структури, зберігають працездатність протягом щонайменше 1000 годин експлуатації.

Механічні властивості адитивно виготовлених деталей залежать від параметрів процесу друку та внутрішньої структури. Для технології FDM ключовими параметрами є відсоток та структура заповнення, товщина стінок, кількість периметрів та орієнтація шарів. Оптимальним з точки зору співвідношення міцності та економічності матеріалу є заповнення за структурою "gyroid" або "triangular" з щільністю 40-60%. При цьому орієнтація шарів перпендикулярно до напрямку основного навантаження може знижувати міцність виробу на 30-40%.

Температурні параметри процесу істотно впливають на адгезію між шарами та міцність деталі. Для ABS-пластику оптимальними є: температура екструзії 240-255°C, температура робочої платформи 100-110°C та температура в камері друку 45-60°C. Дотримання цих режимів підвищує міжшарову міцність на 15-25%.

Для підвищення міцності та зносостійкості адитивно виготовлених компонентів застосовуються методи постобробки: термічна обробка, інфільтрація епоксидними смолами та хімічна обробка. Термічна обробка ABS-пластику при температурі 80-90°C протягом 2-3 годин підвищує міцність на розрив на 10-15%.

Запропонована методика оцінки придатності адитивно виготовлених компонентів включає визначення критичних навантажень, створення комп'ютерної моделі та проведення симуляції, оптимізацію параметрів та випробування зразків. Критерієм достатності міцнісних характеристик є коефіцієнт запасу міцності, рекомендований у межах від 1,5 до 2,2.

Для верифікації запропонованої методики проведено експериментальні дослідження на прикладі шківів конвеєрної системи кондитерського підприємства. Шків діаметром 120 мм з ABS-пластику працюють при швидкості обертання до 150 об/хв та передають крутний момент до 5 Н·м. Результати випробувань показали, що зразок із заповненням 60%, структурою "gyroid" та 3 периметрами відпрацював 1200 годин без видимих змін.

Аналіз економічної ефективності впровадження технології адитивного виготовлення запасних частин показав скорочення часу простою обладнання на 60-75%, зниження вартості запасних частин на 30-45% та зменшення складських запасів на 25-30%.

Отже, інтеграція технологій реверс-інжинірингу та 3D-симуляції з адитивним виробництвом є ефективним підходом до забезпечення експлуатаційної надійності обладнання кондитерської промисловості. Найперспективнішими для адитивного виготовлення є компоненти формувального, фасувального та транспортувального обладнання. Структурно-конструктивні параметри адитивно виготовлених компонентів критично впливають на їхні міцнісні характеристики та мають бути оптимізовані з урахуванням умов експлуатації.