

УДК 621.01

А. М. Сліпчук

## ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ CAE-СИСТЕМ

*Розглянуто сучасний стан CAE-систем, які зараз використовуються конструкторами на підприємствах. У статті основну увагу зосереджено на впливі шорсткості поверхні на експлуатаційні показники та на довготривалість деталі в цілому. Врахування цього параметра у майбутніх CAE-системах дасть більш точні результати життєвого циклу виробу вже на стадії технологічної підготовки машинобудівного виробництва.*

*Ключові слова:* CAE-системи, PLM технології, концепція PLM, функціональне призначення, втомна міцність деталей, процес зношування.

А. Н. Сліпчук

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ CAE-СИСТЕМ

*Рассмотрено современное состояние CAE-систем, которые сейчас используются конструкторами на предприятиях. В статье основное внимание сосредоточено на влиянии показателей шероховатости поверхности на эксплуатационные показатели и на продолжительность детали в целом. С учетом этого параметра в будущих усовершенствованных CAE-системах даст более точные результаты жизненного цикла изделия уже на стадии технологической подготовки машиностроительного производства.*

*Ключевые слова:* CAE-системы, PLM технологии, концепция PLM, функциональное назначение, усталостная прочность деталей, процесс износа.

A. M. Slipchuk

## DEVELOPMENT OF CAE-SYSTEMS IN THE FUTURE

*The paper described CAE-systems, which are now used by designers in the plants. In this paper the focus concentrated on the effects of surface roughness on the performance indicators and the long-term parts in general. Requirements for surface roughness should be established based on the functional purpose surface for a given quality products. Consideration of this option in the future CAE-systems will give more accurate results of the life cycle of the product at the stage of technological preparation of production engineering. The principal feature is the ability not only to describe the structure of manufactured products, but also manufacturing technology, and more - to accumulate at these stages all the information about each production of parts and components manufactured repairs and replacements, etc.*

*Keywords:* CAE-systems, PLM technology, the concept of PLM, functionality, fatigue strength of details, wear process.

**Постановка проблеми.** За останні роки у тематичній літературі по САПР все частіше використовується абревіатура PLM. Деякі постачальники рішень автоматизації інженерних процесів, в першу чергу Dassault Systems, просто використовують тільки цей термін. Проте, слід зазначити, що користувачі САПР, часом просто не знають, що саме за цим стоїть.

PLM – англійська абревіатура від Product Lifecycle Management, в перекладі «Управління життєвим циклом виробу». Таку технологію можна сприйняти як назву для комплексу програмних засобів проектування (CAD), підготовки виробництва на ЧПУ (CAM) та інженерних розрахунків (CAE), об'єднаних в єдине ціле системою управління документообігом (PDM). Всі ці компоненти - невід'ємна частина комплексу PLM, але лише частина, хоча і основна. Можна сказати, що це філософія життя виробництва. Як з'явився PLM?

Вся інформація про виріб, починаючи з креслень і закінчуючи кріпленням при складанні, до найменших дрібниць вноситься до електронної бази даних, де простежується життєвий цикл виробу й кожної деталі: де і хто виготовив, з якого металу і яким способом штампували, на яких верстатах фрезерувати і т.д. Принциповим особливістю є можливість не тільки описати структуру виробленого виробу, а й технології виготовлення, і більше того – накопичувати на наступних етапах всю інформацію про виготовлення кожної деталі і вузла, вироблених ремонтах і замінах і т.д. Інформація в достатній мірі деталізується, щоб при необхідності можна було відновити повну історію кожної деталі, виявити причини відмов і швидко внести необхідні зміни. Інформаційною базою користуються не тільки конструкторські та технологічні служби, але також служби технічної підготовки і управління виробництвом підприємства-виробника, оскільки формується повна інформаційна модель виробу, починаючи від конструкторської специфікації і закінчуючи даними про фактичне виготовлення.

Концепція PLM – це створення єдиної інформаційної бази, яка описує три головні компоненти: Продукт – Процеси – Ресурси та взаємозв'язки між ними. Наявність такої об'єднаної моделі забезпечує можливість швидко, ефективно пов'язувати всі ці три компоненти, оптимізуючи рішення під вимоги бізнесу. Робота всіх проектантів, конструкторів, технологів з єдиною моделлю забезпечує зниження витрат на численні узгодження, неминучі при традиційній технології роботи,

і виключає наявність дублюючих або взаємовиключних документів. На практиці це дозволяє значно скоротити матеріальні та часові витрати на створення продукту і запуск його у виробництво, минаючи численні налагоджувальні варіанти, що втілюються в реальності, тобто отримати проект продукту, готового буквально з перших екземплярів до відправки споживачеві.

PLM значно збільшує ефективність праці підприємства.

Отже, основне завдання PLM – це об'єднання окремих ділянок автоматизації в єдиному інформаційному просторі та реалізація наскрізного конструкторського, технологічного та комерційного циклу, від підготовки проекту до утилізації. Такий підхід обіцяє підприємствам чималі вигоди, головні з яких:

- Прискорення випуску нових продуктів;
- Посилення контролю за якістю;
- Скорочення витрат заміною фізичних макетів віртуальними;
- Економія за рахунок багаторазового використання проектних даних;
- Розширення можливостей оптимізації виробів;
- Економія завдяки скороченню відходів виробництва;
- Зниження витрат за допомогою повної інтеграції інженерного документообігу.

Проте, щоб скористатися усіма цими перевагами даної концепції, необхідно подолати серйозні технічні труднощі. Основна проблема, що стоїть перед користувачами і розробниками полягає в необхідності об'єднання різнорідних систем автоматизації на підприємстві та забезпеченні колективної роботи персоналу.

Зазвичай кожен підрозділ має своє програмне забезпечення і по-своєму її обробляє. Зокрема, відділи проектування (що використовують CAD), і аналізу продукції (CAE) можуть використовувати зовсім різні специфікації і стандарти і приймати рішення незалежно один від одного. Тому перед впровадженням PLM повинні насамперед бути встановлені корпоративні стандарти на формати даних. Наразі цю проблему можна частково вирішити шляхом застосування засобів перетворення даних з одного формату в інший, що нерідко викликає помилки і погіршує якість інформації. Найбільш очевидний спосіб уникнути цього - впроваджувати PLM-продукти одного постачальника. Однією із складових PLM-технології є CAE-система, яка безпосередньо пов'язана з CAD-системою або інколи навіть є інтегрованою у них, в цьому випадку виходять гібридні CAD / CAE-системи.

Однак лише деякі постачальники пропонують весь набір засобів PLM, та й підприємства навряд чи захочуть змінювати звичні САПР на нові. Єдиний вихід – це створення відкритого формату даних. Такий спосіб вже реалізовано, але, на жаль, з певними обмеженнями. Організація ISO випустила стандарт STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data) для опису тривимірних CAD-моделей.

**Невирішені проблеми.** CAE (англ. Computer-aided engineering) - загальна назва для програм і програмних пакетів, призначених для вирішення різних інженерних завдань: розрахунків, аналізу та симуляції фізичних процесів, як поведе себе комп'ютерна модель виробу в реальних умовах експлуатації. Допомагають переконатися в працездатності виробу, без залучення великих витрат часу і коштів. Розрахункова частина пакетів найчастіше заснована на чисельних методах вирішення диференціальних рівнянь (метод кінцевих елементів, метод кінцевих об'ємів, метод кінцевих різниць та ін.). Засоби CAE виконують найрізноманітнішу роботу з розрахунку напружень, деформацій, теплообміну, розподілу магнітного поля, потоку рідин та інших параметрів суцільних середовищ. Наприклад, програми для кінематичних розрахунків здатні визначити траєкторії руху і швидкості ланок у механізмах. Програми динамічного аналізу можуть використовуватися для визначення навантажень і зсувів в складних складених пристроях типу автомобілів.

Тому ключовим моментом для поліпшення процесу проектування є тісна інтеграція CAD і CAE (в найкращому випадку це повинен бути продукт однієї компанії). Перетворення моделей залежить також від наявності різних властивостей у CAD-моделі. Якщо CAD-модель не містить інформацію про властивості, які необхідні для CAE, тоді проводиться визначення цих властивостей, шляхом аналізу твердотільної моделі. В іншому випадку необхідні властивості конвертуються в властивості CAE-моделі. У разі якщо властивості CAD-моделі повністю ідентичні властивостям CAE-моделі, ніякої конвертації не проводиться. Можливість тісної інтеграції залежить від наступних факторів: масштабу, меж і цілей CAE-аналізу; природи і якісних характеристик CAD-моделі; ступеня деталізації, необхідної для CAE-систем.

Існують чотири основні підходи до інтеграції CAD і CAE [6]:

- 1) CAD-орієнтований;
- 2) CAE-орієнтований;
- 3) CAD / CAE-орієнтований;
- 4) Використання технології управління інформацією про виріб протягом його життєвого циклу (Product Lifecycle Management, PLM).

Практично у всіх сучасних CAD-системах передбачені додаткові модулі аналізу та імітації, тісно інтегровані з системою моделювання. Ці модулі дозволяють вирішувати завдання кінематичного моделювання, аналізу методом скінченних елементів (МСЕ), генерації сітки і подальшої обробки безпосередньо в системі моделювання.

Таким чином МСЕ стає найбільш популярним методом для аналізу. На жаль, часто моделі створені в CAD непридатні для МСЕ. Проте, в більшості випадків необхідна якась абстрактна модель, в той час як CAD-система забезпечує створення деталізованої твердотільної моделі. Отже, для отримання МСЕ-специфічної моделі необхідний процес перетворення, який видаляє деякі елементи, і навіть змінює розміри вихідної моделі. Видалення елементів полягає в тому, що маленькі геометричні елементи, що містяться в моделі, ігноруються або не показуються.

Проте у всіх CAE-системах не враховується вплив параметрів шорсткості поверхні деталі (а таких параметрів у нашому ДСТУ є шість), залишкова напруженість, зносостійкість, особливо це важливо для тих поверхонь, які зазнають тертя.

**Мета статті** є направлення майбутнього розвитку CAE-систем таким чином, щоб у подальшому такі системи враховували шорсткість поверхні особливо у контактних парах, що зазнають тертя на інженерні розрахунки довготривалості та надійності машини.

**Основний матеріал.** Якість поверхневого шару деталей машин має істотний вплив на їх експлуатаційні властивості. Однією з найважливіших експлуатаційних характеристик деталей є зносостійкість двох поверхонь тертя. Недостатня зносостійкість деталей в значній мірі визначає ресурс машин в цілому. При цьому інтенсивність зношування залежить не тільки від виду матеріалу і його механічних властивостей, але і від стану поверхневого шару деталей. Тому підвищення зносостійкості виконавчих поверхонь деталей є одним з найважливіших завдань технології машинобудування. Деталі машини переміщуються одна відносно одної, а це супроводжується тертям і зношуванням. Зносостійкість деталей визначається здатністю її поверхневого шару чинити опір руйнуванню під дією сил тертя.

Є роботи [2,4], де досліджується тільки шорсткість, яка утворюється в процесі припрацювання, і підтверджується правомірність використання терміну «рівноважна шорсткість». Дослідження зміни мікротвердості в процесі припрацювання [1-3] показали, що вона закінчується після досягнення поверхнею певною мірою наклепу.

Міцність деталей також залежить від шорсткості поверхні. Руйнування деталі, особливо при змінних навантаженнях, більшою мірою пояснюється концентрацією напружень, внаслідок наявності нерівностей. Чим менше шорсткість, тим менше можливість виникнення поверхневих тріщин від втоми металу. Обробка деталей (доведення, полірування і т. п.) забезпечує значне підвищення межі їх втомної міцності. Зменшення шорсткості поверхні значно покращує антикорозійну стійкість деталей. Це має особливо важливе значення в тому випадку, коли для поверхонь не можуть бути використані захисні покриття (поверхні циліндрів двигунів та ін.)

Шорсткість поверхні також впливає і на втомну міцність деталей. Явище втоми виникає при циклічних, тобто знакозмінних навантаженнях. Від якості обробленої поверхні в деякій мірі залежить і її корозійна стійкість. Причиною втрати працездатності багатьох деталей машин є втома матеріалу деталей. Наявність на поверхні деталі, що працює в умовах змінних навантажень, окремих дефектів і мікронерівностей, сприяє виникненню тріщин.

Довговічність деталей, що працюють в різних експлуатаційних середовищах, багато в чому залежить від їх корозійної стійкості. Корозійне руйнування деталей, як правило, починається з поверхні. У зв'язку з цим шорсткість поверхні робить істотний вплив на корозійну стійкість деталей машин. З пониженням параметра шорсткості корозійна стійкість поверхні підвищується. Речовини, що викликають корозію, осідають в западинах і заглибленнях. За наявності сил тертя процес корозії істотно зростає. Очевидно, чим менше висота нерівностей, тим повільніше буде протікати корозія. Фізико-механічні параметри якості поверхні також впливають на втомну міцність і корозійну стійкість.

У відповідальних випадках конструктор повинен обумовлювати спрямованість слідів обробки на поверхні деталі. Це може виявитися необхідним, наприклад, у зв'язку з направленням відносного ковзання сполучених деталей або з напрямком руху по деталі струменя рідини чи газу.

Вимоги до шорсткості поверхні повинні встановлюватися виходячи з функціонального призначення поверхні для забезпечення заданої якості виробів. Якщо в цьому немає необхідності, то вимоги до шорсткості поверхні не встановлюються і шорсткість цієї поверхні контролюватися не повинна. Вимоги до шорсткості поверхні не включають вимог до дефектів поверхні (раковини і пр.), тому при контролі шорсткості поверхні вплив дефектів поверхні повинно бути виключено. У деяких випадках допускається встановлювати вимоги до шорсткості окремих ділянок однієї поверхні, які можуть бути різними.

На додаток до кількісних параметрів в деяких випадках доцільно нормувати напрямки нерівностей, наприклад у зв'язку з направленням відносного переміщення поверхонь або струменя рідини, або газу відносно поверхні, а також для забезпечення необхідної вібростійкості і міцності при циклічних навантаженнях. При необхідності конструктором встановлюється також спосіб або послідовність способів отримання (обробки) поверхні, якщо вони є єдиними для забезпечення її заданої якості. При призначенні параметрів шорсткості поверхні слід перевірити можливість їх досягнення у зв'язку з раціональними методами обробки деталей.

Як правило, слід застосовувати найбільшу шорсткість, допустиму конструктивними вимогами. В іншому випадку може значно збільшитися вартість обробки, що може бути компенсовано лише підвищенням якості виробу. У деяких же випадках підвищення вимог до шорсткості може виявитися не тільки не рентабельним, але і неприпустимим. Наприклад, при занадто гладких сполучених поверхнях може виникнути явище «схоплювання», при якому частки металу відриваються від поверхневого шару поверхонь. Для таких поверхонь слід нормувати оптимальну вихідну шорсткість, яка повинна бути близькою до отриманої в процесі припрацювання

Розвинена за останні роки теорія контактування, тертя і зношування твердих тіл дозволяє встановити зв'язок між деякими параметрами шорсткості поверхні і найважливішими експлуатаційними властивостями. [2-5]

Теорія подібності і моделювання розглядається як база наукової постановки дослідів і узагальнення експериментальних даних. З аналізу диференціальних рівнянь, що характеризують загальні функціональні зв'язки між основними чинниками, та умов однозначності, що включають характеристики геометрії, фізичних властивостей і крайові умови (початкові і граничні), отримуємо передумови до експериментально-теоретичного вивчення процесів. У вирішенні поставлених завдань доводиться зустрічатися з різними за складністю явищами. У деяких випадках теоретичне вирішення завдань дозволяє отримати загальні якісні зв'язки параметрів, наприклад у визначенні коефіцієнта тертя при вирішенні контактної-гідродинамічної задачі. При аналізі ж вельми складного процесу зношування твердих тіл на даний час не вдається отримати досить загальних математичних описів явищ. [4]

**Висновки.** Все викладене свідчить про те, що в процесі експлуатації відбувається взаємопов'язане зміна параметрів якості поверхневого шару деталей машин і тільки технологічне забезпечення оптимального значення комплексного параметра дозволяє значною мірою підвищити їх довговічність. Все це напряму пов'язане з концепцією PLM-технологією, яка слідкує за всім періодом життя продукту - від його ідеї створення і до утилізації.

Тому я бачу у перспективі розвиток CAE-система, саме у врахуванні впливу ще більшої кількості параметрів, зокрема параметрів шорсткості, залишкових напружень після обробки та інших технологічних параметрів.

Цей параметр ще не достатньо досліджений на теоретичному рівні, тому "ввести" його у CAE-продукт буде дуже складно. Проте це значно удосконалив розрахунки тривалості роботи деталі і машини в цілому.

1. Кульгавый Э. А. Трибология характеристики и их применени е// Проблемы трибологии. – Вып.№3. – 2003. – С. 51–61.
2. Денисова Н. Е., Шорин В. А., Гонгарь И. Н., Волчихина Н. И., Шорина Н. С. Триботехническое материаловедение и трибология: учеб пособие/ Под общей редакцией Денисовой Н. Е. – Пенза: Изд-во Пенз., 2006. – 248 с.
3. Ящерицин П. И. Технологическая наследственность в машиностроении/ – Минск: Наука и техника, 1977. – 221 с.
4. Дроздов Ю. Н. Обобщенные характеристики для оценки износостойкости твердых тел // Трение и износ. Т.1. - 1980. – №3. – С.417–424.
5. Закалов О. В., Закалов І. О. Основи тертя і зношування в машинах // Навчальний посібник . – Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. – 322 с.
6. <http://network-journal.mpei.ac.ru/cgi-bin/main.pl?l=ru&n=9&pa=11&ar=1>

Стаття надійшла до редакції 30.03.2015.