

Настасенко В.А. Заявка № 98116838/28 от 08.09.98. // БИ. 2003. № 7. 6. Настасенко В.А. Основные типы гиперболоидных червяков и способы их производства // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2012. Вип. 44. – С. 181–188. 7. Иноземцев Г.Г. Червячные фрезы с рациональными геометрическими и конструктивными параметрами. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1961. – 224 с. 8. Настасенко В.А. Новый вид червячных зуборезных инструментов и их САПР // Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века: Мат-лы V Междунар. научн.-техн.конф. – Донецьк: ДонГТУ, 1998. Т2. – С. 248–251.

УДК 621.9(075.8)

**В.В. Ступницький**

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра технології машинобудування

## **ВИКОРИСТАННЯ САФ-СИСТЕМИ ЯК ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО ОРІЄНТОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ МАШИНОБУДІВНОГО ВИРОБНИЦТВА**

© Ступницький В.В., 2012

Наведено умови та наслідки використання принципу функціонально-технологічного проектування виробничих процесів машинобудування. Для реалізації концепції паралельного інжинірингу, впровадження CALS-технологій запропоновано використання системи реологічного імітаційного моделювання процесів різання (САФ-системи). Це дасть можливість прогнозувати основні кваліметричні експлуатаційні властивості виробу вже на стадії технологічної підготовки машинобудівного виробництва.

The article presents the conditions and consequences of the use of the principle of functional process design engineering production processes. To implement the concept of parallel engineering, implementation CALS-technologies proposed use of rheological simulation of cutting (CAF-system). This will allow the prediction of key performance properties qualimetric product at the stage of functional process design parameters of the structure and operations processing machine products manufacturing.

**Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень.** Узагальнений аналіз тенденцій розвитку сучасної комплексної автоматизованої технологічної підготовки машинобудівного виробництва (CAD/CAPP/CAM/PDM – системи) дає можливість зазначити такі особливості.

1. Для всіх найефективніших машинобудівних САПР середнього і верхнього рівня (Pro/Engineer (Parametric Technology Corporation), Unigraphics (Unigraphics Solutions), CATIA (Dassault Systèmes), SolidWorks (SolidWorks Corp.); Nastran (MCS Inc.), Solid Edge (Siemens PLM Software)) характерна системна інтеграція програмних продуктів (оптимально – створення гібридних CAD/CAE/CAPP/CAM програмних продуктів) з метою ефективнішого обміну конструкторсько-технологічною інформацією в єдиних уніфікованих форматах та прототипах репозиторія даних (MIL-STD-2549 Configuration Management Data Interface).

2. Впровадження PLM (CALS)-технологій вимагає проектування функціонально-орієнтованих технологій машинобудівного виробництва, тобто врахування вже на стадії технологічної підготовки виробництва не тільки параметрів точності розмірів та шорсткості оброблюваних поверхонь, але й комплексу нових кваліметричних показників, що значно впливатимуть на експлуатаційні, ремонтні, утилізаційні та інші функціональні властивості виробів.

3. Швидкі темпи впровадження нових матеріалів загальномашинобудівного та інструментального призначення, новітніх технологій оброблення у поєднанні з тенденцією зменшення серійності машинобудівної продукції ставить на основне місце у технології машинобудування такі показники, як оперативність та оптимальність підготовки виробництва нових виробів.

4. Адекватності та оптимальності автоматизованого технологічного проектування високошвидкісних методів оброблення (особливо для жароміцних та важкооброблюваних матеріалів) складно досягти, оскільки модель різання у цьому випадку характеризується адіабатичністю термодинамічних процесів, замість класичної дуотермічної моделі, яку покладено в основу програмно-методичного модулю CAPP-системи.

Впровадження функціонально орієнтованого технологічного проектування, що реалізує концепцію PLM, ґрунтується на принципово відмінному підході паралельного проектування (S-технологія). В основу цієї технології покладено поєднання проектування виробу, а також планування його виготовлення і супроводу, що координуються спеціально призначеним для цього розподіленим інформаційним середовищем. Така технологія дає змогу використати проектні дані з ранньої стадії одночасно різними групами фахівців. Фактично при використанні S-технології вдається досягти перекриття практично усіх стадій життєвого циклу виробів. Розвиток технологій паралельного проектування пов'язаний передусім з підвищенням для споживача таких нецінових чинників конкурентоздатності, як якість функціональних та споживчих якостей виробу, здатність швидкого виконання індивідуального замовлення. У цьому випадку реалізується якісно новий методологічний підхід у проектуванні технологічних процесів, що полягає у формуванні технологічних дій і властивостей виробу залежно від особливостей експлуатації функціональних елементів виробу. При цьому забезпечується можливість повної адаптації виробу до умов його експлуатації, а також виконання заданого, необхідного або граничного експлуатаційного потенціалу цього виробу в машині або технологічній системі [1, 2].

Відмінність функціонально орієнтованого проектування технологічного процесу від об'єктно-орієнтованого полягає в тому, що первинним у формуванні структури технологічних переходів є забезпечення комплексу функціонально-експлуатаційних властивостей виробу (мікротопологія та якість поверхневого шару, залишкові напруження тощо) та вимог ефективного проходження процесу різання (стружкоутворення, тепловідведення, вібростійкість тощо). Потім спроектовані так технологічні переходи за формалізованими правилами об'єднуються в технологічні операції, що системно формують технологічний маршрут. Тобто замість низхідного принципу проектування, реалізується висхідний принцип.

Технологія паралельного проектування реалізується на основі інтегрованих інструментальних засобів прогностичного оцінювання і аналізу альтернативних проектних рішень з подальшим вибором базового проектного рішення на основі специфічних критеріїв, відмінних від тих, що використовують для об'єктно-орієнтованого проектування [3,4].

Прогностичне оцінювання може робитися як відносно усього проекту (тоді ми говоримо про етап аван-проектування), так і відносно окремих етапів проектування. Крім того, принциповою відмінністю паралельного проектування від наскрізного проектування є те, що усі етапи починають виконуватися одночасно і інформація надходить як на усі попередні, так і на усі подальші етапи проектування.

**Викладення основного матеріалу.** Враховуючи всі ці чинники, можна зробити головний висновок про те, що загальноприйнята схема інтегрованої комплексно-автоматизованої системи технологічної підготовки автоматизованого виробництва (ICAM – *Integer Computer Aided Manufacturing*), наведена на рис. 1, а потребує вдосконалення.

Основною відмінністю запропонованої системи (рис. 1, б) є наявність автоматизованої технологічної підсистеми аналізу формоутворення (CAF-системи – *Computer Aided Forming*), в основу якої покладено аналіз імітаційної реологічної моделі окремих технологічних переходів та комплекс аналітично-прикладних програм формування точнісних, термічно-деформаційних, мікрогеометричних, структурних та фазових параметрів оброблюваних поверхонь, можливість їх імітаційного моделювання та встановлення залежності основних кваліметричних показників виробу

від структури та параметрів технологічного процесу. Наповнення репозиторія даних шляхом вдосконалення цифрового макета виробу відбувається вже на стадії підготовки виробництва, а не в результаті експериментального дослідження результатів виготовлення дослідного взірця.

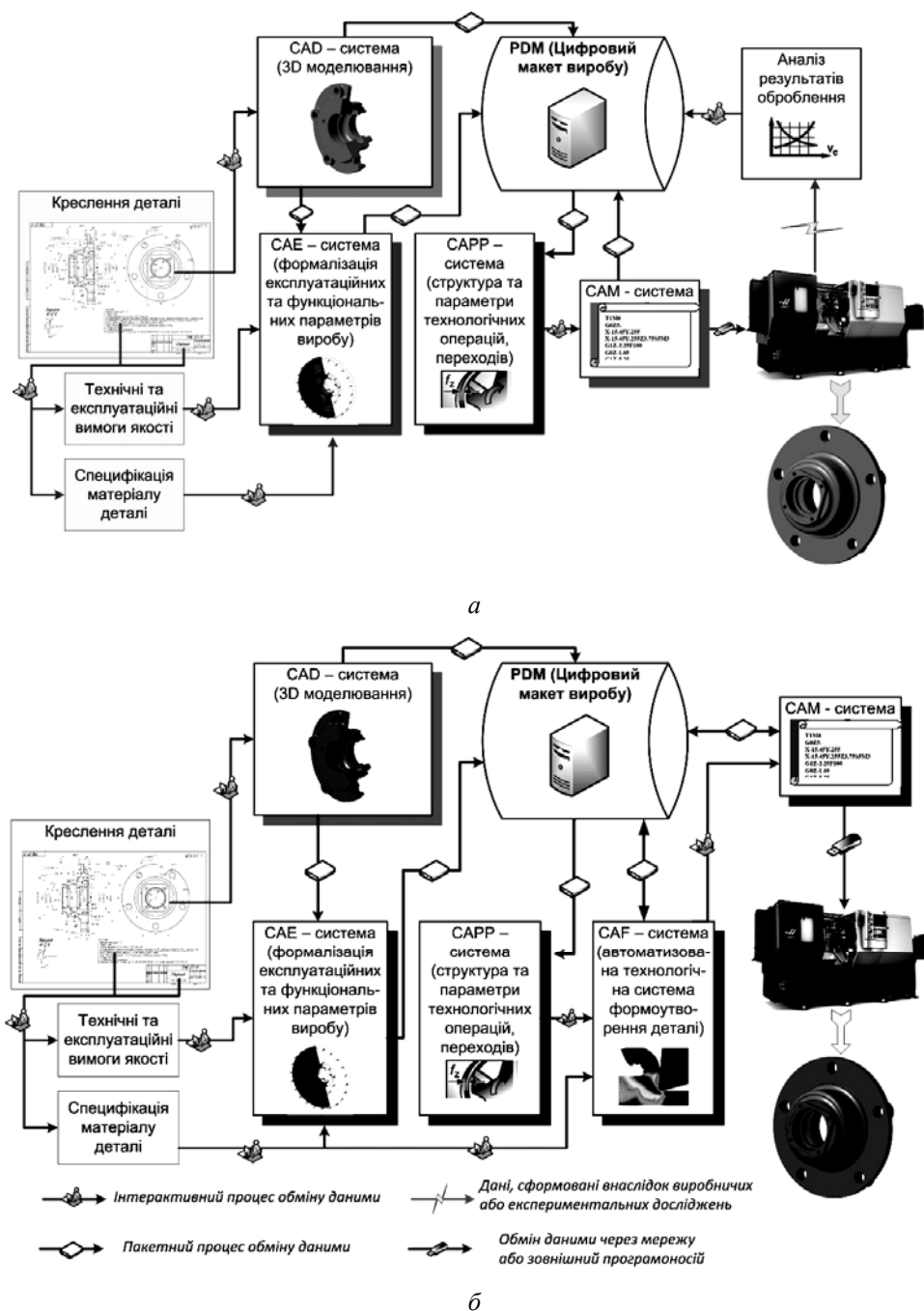


Рис. 1. Схема інтегрованої автоматизованої системи технологічної підготовки автоматизованого виробництва: а – існуюча, б – модернізована

Тераформуючими програмними продуктами САЕ-системи можуть бути такі відомі програмні комплекси, як DEFORM-3D (Scientific Forming Technologies Corp.), ABAQUS (Dassault Systèmes Corp.), AdvantEdge (EnginSoft Corp.), LS-DYNA (Livermore Software Technology Corp.). Всі ці системи є багатоцільовими програмами МКЕ аналізу і призначені для вирішення тривимірних динамічних нелінійних завдань механіки деформованого твердого тіла, а також пов'язаних з цим процесом завдань. У них реалізовані явний і неявний метод кінцевих елементів з можливістю побудови лагранжевої, ейлерової і гібридної сітки, багатокомпонентна гідродинаміка, метод згладжених ґраток, оснований на методі Галеркіна. Програми мають вбудовані процедури

автоматичної перебудови і згладжування звичайноелементної сітки при виродженні елементів, високоефективні алгоритми рішення контактних завдань, широкий набір проблемно-орієнтованих специфікацій матеріалів, можливості користувацького програмування.

Узагальнений алгоритм функціонування CAF системи у структурі CAD/CAPP/CAM системи наведено на рис. 2.

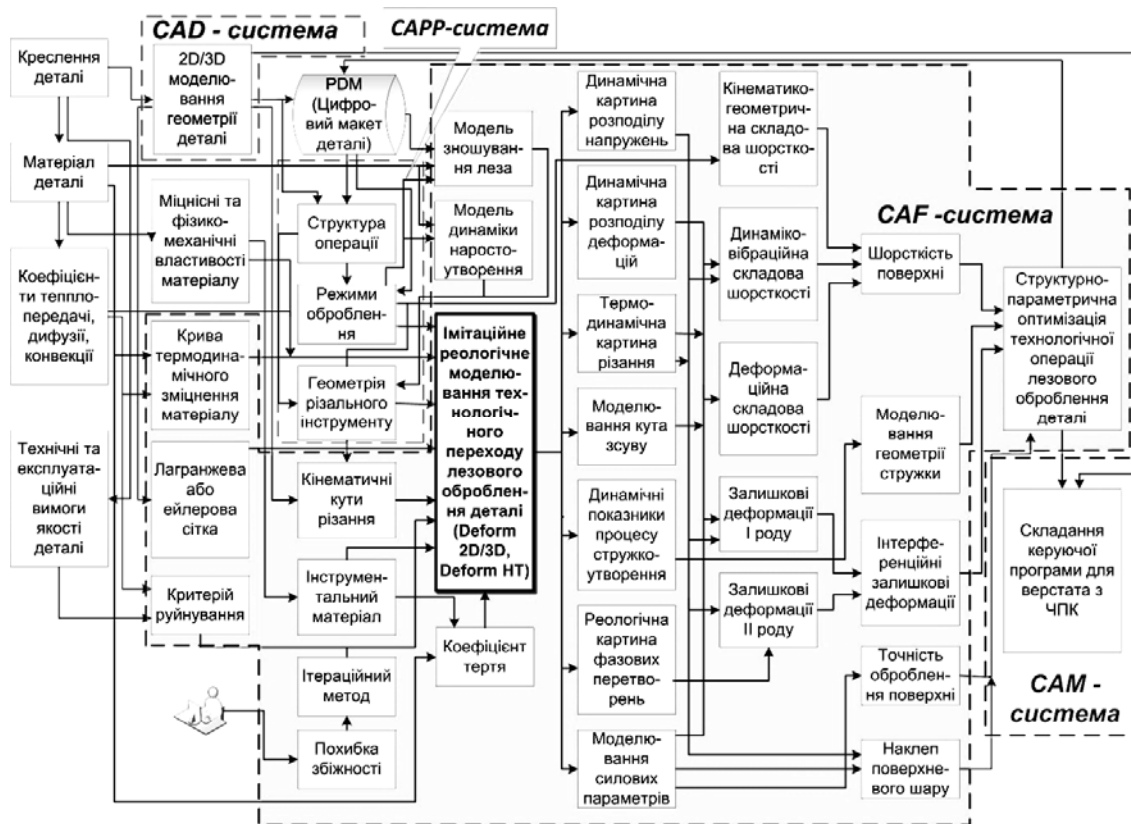


Рис. 2. Схема CAD/CAPP/CAF/CAM системи

Вихідними даними для роботи CAF-системи є:

- 2D або 3D модель деталі (впливає на формування кінематичних кутів різання, формування лагранжевої або ейлерової сітки). Джерело надходження інформації – CAD система.
- Структура технологічного переходу (безпосередньо впливає на формування реологічної моделі різання). Джерело надходження інформації – CAPP система.
- Геометрія різального інструменту (впливає на формування динаміко-геометричних параметрів технологічного переходу). Джерело надходження інформації – CAPP система.
- Інструментальний матеріал (безпосередньо впливає на формування реологічної моделі технологічного переходу).
- Режими оброблення. Джерело надходження інформації – CAPP система. Джерело надходження інформації – CAPP система.
- Міцнісні, фізико-механічні, теплофізичні характеристики оброблюваного матеріалу (впливає на вибір кривої термодинамічного зміцнення, коефіцієнт тертя та вибір критерію руйнування). Джерело надходження інформації – CAD система.
- Моделі зношування леза інструменту та динаміки наростування (безпосередньо впливає на формування реологічної моделі технологічного переходу). Джерело надходження інформації – аналітичне моделювання.
- Похибка збіжності результатів моделювання за силовим вектором та вектором швидкості та допустимою геометричною похибкою, вибір типу задачі (Lagrangial Incremental або Steady-State Machining), вибір ітераційного методу (прямий ітераційний чи Ньютон-Рафсена), вибір розрахункового ядра (метод розріджених матриць або метод Skyline). Джерело надходження інформації – інтерактивний режим з проєктантом.

Результатом роботи САФ-системи є комплекс напружено-деформаційних, силових та термодинамічних параметрів різання, динаміка зміни кута зсуву та картина фазових перетворень на обробленій поверхні матеріалу. Все це дає змогу спрогнозувати такі важливі експлуатаційні параметри, як мікрорельєф поверхні, залишкові напруження 1-го і 2-го роду, фізико-хімічний стан поверхневого шару тощо.

Запропонований проф. А.Н. Михайловим підхід до реалізації принципу паралельного інжинірингу шляхом впровадження композиційних технологій ґрунтується на багаторівневому проектуванні структури технологічного процесу [1]. Між окремими рівнями діють ітераційні та рекурентні зв'язки, що дає змогу синтезувати і коректувати структуру технологічного процесу на основі принципів комбінованих технологій; макро-, мікро- і нанотехнологій та функціонально-орієнтованих технологій. Ітераційні і рекурентні зв'язки між окремими етапами проектування технологій дають змогу, по-перше, послідовно виконувати синтез структури технологічного процесу на основі всіх етапів композиційних технологій; по-друге, виконувати повернення процесу проектування на попередні етапи і коригувати розроблену раніше структуру технологічного процесу, і по-третє, при синтезі технології обходити окремі етапи проектування як в прямому, так і в зворотному напрямках.

Отже, зв'язок між функціональними властивостями виробу та технологією їх забезпечення повинен мати прогностичний характер. Очевидно, що експериментальні дослідження у випадку необхідності прийняття оперативного технологічного рішення є вкрай небажаними через значну трудомісткість та відсутність можливості диференційованого аналізу впливу окремих чинників на результат проектування. Наприклад, аналіз впливу геометрії різального інструменту, його коливань у всіх напрямках, деформаційні явища (зокрема залишкові) значно впливають на мікротопографію поверхні. Проте проаналізувати їх вплив диференційовано можна, лише використавши можливості комплексного імітаційного реологічного та аналітичного моделювання, а експериментальним шляхом можна лише підтвердити адекватність їх сукупного впливу на формування мікрогеометрії остаточно.

Для врахування особливостей експлуатації окремих деталей у машині або технологічній системі і забезпечення заданого, необхідного або граничного їх експлуатаційного потенціалу, необхідно реалізувати алгоритм прийняття рішень щодо вибору структури та параметрів технологічного процесу, враховуючи прогностичні можливості САФ-системи [5].

Результатом роботи САФ-системи є комплекс напружено-деформаційних, силових та термодинамічних параметрів різання, динаміка зміни кута зсуву та картина фазових перетворень на обробленій поверхні матеріалу. Все це дає змогу спрогнозувати такі важливі експлуатаційні параметри, як мікротопологія обробленої поверхні, залишкові напруження 1-го і 2-го роду, фізико-хімічний стан поверхневого шару тощо.

На рис. 3 наведено алгоритм синтезу технологій, що ґрунтується на ітераційних і рекурентних зв'язках. Процес проектування цих технологій має такі етапи:

- формування цифрового макета виробу;
- формалізація та моделювання умов забезпечення ефективного функціонування виробів;
- імітаційне реологічне моделювання напружено-деформованого, термодинамічного та структурно-фазового стану найвідповідальніших поверхонь деталі в процесі їх формоутворення;
- моделі прогнозування функціонально орієнтованих властивостей виробу;
- пресинтез структури та параметрів технологічного процесу і технологічного забезпечення об'єктно-орієнтованої технології;
- коригування і синтез структури технології за принципами функціональноорієнтованих технологій;
- забезпечення заданих, необхідних або граничних властивостей виробу в залежності від особливостей його експлуатації в машині або технологічній системі.

Виконання окремих етапів проектування розподілено та пов'язано рекурентними зв'язками між такими автоматизованими системами, як CAD, CAE, CAPP, CAF та CAM.



Рис. 3. Структурно-логічна схема технологічної підготовки виробництва за функціонально-орієнтованим принципом

**Висновок.** Отже, впровадження функціональноорієнтованих технологій дає можливість ефективніше реалізувати концепцію PLM у машинобудуванні за принципом паралельного проектування. Головною особливістю такого проектування є те, що первинним у формуванні структури та параметрів технологічних переходів є забезпечення комплексу функціонально-експлуатаційних властивостей виробу (точність, якість поверхневого шару, залишкові напруження тощо) та вимог ефективного проходження процесу різання (стружкоутворення, тепловідведення, вібростійкість тощо). Використання САФ-системи, що органічно доповнює існуючу інтегровану CAD/CAE/CAPP/CAM систему, є прогностична можливість імітаційного моделювання та встановлення залежності основних кваліметричних показників виробу від структури та параметрів технологічного процесу, що є основою функціональноорієнтованого проектування.

1. Михайлов А.Н. Основы синтеза функциональноориентированных технологий. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с. 2. Михайлов А.Н. Общий подход в создании функциональноориентированных макро-, микро- и нанотехнологий для изделий машиностроения / Машиностроение и техносфера XXI века: Сборник трудов XVIII Междунар. научн.-техн. конф. в г. Севастополе 12–17 сентября 2011 г.: в 4 т. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – Т. 2. – С. 209 – 217. 3. Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Оптимизация технологических процессов механической обработки. – К.: Наук. думка, 1989. – 192 с. 4. Капустин Н.М. Автоматизация машиностроения / Н. М. Капустин, Н. П. Дьяконова, П. М. Кузнецов; под ред. Н. М. Капустина. – М.: Высшая школа, 2007. – 223 с. 5. Stupnytskyu V. Use of the CAF-system (Computer Aided Forming) in Integer Computer Aided Manufacturing// Papers of the XX Ukrainian-Polish Conference on CAD in Machinery Design. Implementation and Educational Issues – CADMD 2012. – Lviv. – P. 45–48.