

УДК 621.9(075.8)

Ступницький В.В., к.т.н.

Національний університет «Львівська політехніка»

СТРУКТУРА ТА ФУНКЦІЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ МАШИНОБУДІВНОГО ВИРОБНИЦТВА НА ОСНОВІ КОНЦЕПЦІЇ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОРІЄНТОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ОПЕРАЦІЙ

У статті описується нова концепція проектування структури і параметрів технологічних операцій залежно від особливостей функціонування машинобудівних виробів у машинах або технологічних системах, що забезпечує виконання заданих або граничних умов його роботи. Ця система технологічної підготовки виробництва базується на результатах роботи автоматизованої технологічної системи формоутворення (Computer Aided Forming). У даній статті описана методика технологічного проектування операцій та переходів на основі функціонально-орієнтованого принципу.

Інтегрована система технологічної підготовки виробництва, Integer Computer-Aided Manufacturing, система паралельного інжинірингу, функціонально-орієнтовані технології, CAD/CAM/CAE, Computer Aided Forming System.

Постановка проблеми. Виробничі компанії прагнуть скоротити терміни розробки інноваційних виробів, одночасно зберігаючи високі стандарти якості. Але використання потужних 3D CAD технологій не завжди дозволяє підприємствам оптимізувати процеси розробки і отримати віддачу у вигляді зниження витрат і зменшення термінів розробки виробів. Перетворення процесу розробки виробів починається з моделювання, який визначає весь життєвий цикл виробу-від інженерного аналізу конструктивної та динамічної міцності до розробки інструментів, виробничого і складального процесів, обслуговування та ремонту. Життєвий цикл (ISO 9004-1) – це сукупність процесів, що виконується від моменту виявлення потреб суспільства в певній продукції, включаючи задоволення цих потреб і до їх утилізації [1]. Трудомісткість робіт з технологічної підготовки машинобудівного виробництва і витрати на її проведення значно перевищують витрати на НДДКР. Наприклад, у США таке перевищення становить 11 разів. У Росії, за даними Державного університету управління, це співвідношення дорівнює від 4,6 (в умовах дрібносерійного виробництва) до 8,0 (у великосерійному виробництві) [6].

На даний час Україна суттєво відстає від провідних промислово розвинених країн світу в галузі впровадження сучасних інформаційних технологій у машинобудування. Це відставання вже істотно позначилося негативними макроекономічними наслідками і різким скороченням експортного потенціалу вітчизняних виробників наукомісткої продукції, аж до повного витіснення їх з міжнародного ринку праці. Це, насамперед, стосується обсягів виробництва та номенклатури експорту продукції вітчизняного авіаційного, енергетичного, хімічного машинобудування, військово-промислового комплексу. Світовий ринок повністю ігнорує продукцію машинобудування, не забезпечену електронною документацією і такою, що не має засобів інтегрованої логістичної підтримки поствиробничих стадій життєвого циклу. Більшість іноземних замовників вітчизняної продукції висувають вимоги, задоволення яких неможливе без впровадження PLM-технологій [2]:

- подання конструкторської та технологічної документації в електронній формі;
- подання експлуатаційної та сервісної документації у формі інтерактивного електронного технічного керівництва, забезпеченого ілюстрованими електронними каталогами запасних частин і витратних матеріалів, а також засобами їх дистанційного замовлення;
- організація інтегрованої логістичної та сервісної підтримки виробів на поствиробничих стадіях їх життєвого циклу;
- наявність і функціонування електронної системи каталогізації продукції;
- наявність на підприємствах систем менеджменту якості продукції відповідно до вимог стандартів ISO і т.п.

Аналіз останніх досягнень. Вперше роботи зі створення інтегрованих систем, що підтримують життєвий цикл продукції, були розпочаті ще у 80-х роках в оборонному комплексі США. Нова концепція використовувалась як інструмент вдосконалення управління

матеріально-технічним забезпеченням армії США. Передбачалося, що реалізація нової концепції, що отримала позначення CALS (Computer Aided Logistic Support – комп'ютерна підтримка процесу поставок), дозволить скоротити витрати на організацію інформаційної взаємодії державних установ з приватними фірмами в процесах формалізації вимог, замовлення, поставок і експлуатації військової техніки. З'явилася реальна потреба в організації IBC, що забезпечує обмін даними між замовником, виробниками та споживачами продукції, а також підвищення керованості, скорочення паперового документообігу та пов'язаних з ним витрат. Довівши свою ефективність, концепція послідовно удосконалювалася, доповнювалася і, зберігши існуючу аббревіатуру (CALS), отримала більш широке трактування – Continuous Acquisition and Life Cycle Support – безперервна інформаційна підтримка поставки та життєвого циклу продукції [6].

Перша частина-Continuous Acquisition [Support] (безперервна підтримка поставки) означає безперервність інформаційної взаємодії з замовником у ході формалізації його потреб, формування замовлення, процесу поставки і т.д. Друга частина – Life Cycle Support (підтримка ЖЦ виробів) – визначає системність підходу до інформаційної підтримки всіх процесів ЖЦ виробу, в першу чергу, процесів експлуатації, обслуговування, ремонту та утилізації і т.д. У керівництві по застосуванню CALS в НАТО [6], CALS визначається як "... спільна стратегія держави та промисловості, спрямована на вдосконалення існуючих процесів у промисловості, шляхом їх перетворення в інформаційно-інтегровану систему управління життєвим циклом виробів". Особливо важливою особливістю є можливість обліку умов експлуатації найбільш навантажених деталей у виробі для їх ефективного конструювання, призначення норм точності і проектування технології їх виготовлення. Тобто, засобами паралельного інжинірингу ми можемо реалізувати рекурентний і ітераційний взаємозв'язок крос-функціональних етапів технологічної підготовки виробництва: 3D моделювання виробів (CAD-система), імітації умов їх подальшої експлуатації (CAE-система), проектування структури і параметрів технології їх виготовлення (CAPP-система) і програмування на верстатах з ЧПК (CAM-система). У цьому ланцюзі не вистачає тільки автоматизованої системи, що реалізує взаємозв'язок між технологією формоутворення виробів з умовами їх експлуатації. Основи створення такої системи (Computer Aided Forming – CAF-система) представлені в роботах [3,4,5,9]. Система пропонує інструменти і технології нового покоління, які сприяють перетворенню процесу розвитку виробництва. Якісно нові інструменти дозволяють розробляти технологічні процеси в єдиному керованому середовищі шляхом інтеграції всіх процесів.

Формулювання мети статті. Метою даної наукової публікації є представлення нового методу технологічного проектування операцій механічного оброблення машинобудівних виробів на основі функціонально-орієнтованого принципу, що базується на предиктивних (прогнозуючих) результатах аналізу реологічного моделювання напружено-деформованого та термодинамічного стану деталі в процесі її формоутворення. Формалізація рекурентних зв'язків між структурно-параметричними результатами технологічного проектування та умовами експлуатації виробів дасть змогу забезпечити оптимальний комплекс їх кваліметричних показників засобами паралельного інжинірингу.

Основний зміст і результати роботи. Класичний алгоритм технологічного проектування передбачає виконання ряду послідовних взаємопов'язаних етапів неітераційного низхідного структурно-параметричного синтезу [7]. Технологія низхідного проектування припускає, що технолог починає працювати над проектом на високому рівні абстракції з подальшою деталізацією. Спочатку на основі вихідних даних (макроегеометрична конфігурація деталі, матеріал, її розмірно-вагові характеристики, точність геометричних розмірів і взаєморозташування поверхонь, фізико-механічний стан функціональних поверхонь деталі, тип і організаційна форма виробництва) формується маршрут механічної обробки виробу, потім визначається структура технологічних операцій, переходів, призначаються режими обробки а потім проектується або підбирається технологічне оснащення, інструмент тощо *Така концепція проектування в класифікаційному контексті забезпечення глобальної мети може вважатися об'єктно-орієнтованою.* У цих умовах, основним критерієм формування оптимальної структури і параметрів технологічного процесу є забезпечення мінімальної собівартості виготовлення об'єкта виробництва (виробів) при дотриманні формалізованих показників якості (точності, шорсткості, фізико-механічних властивостей окремих поверхонь) і забезпечення заданих виробничою програмою обсягів виготовлення продукції, з урахуванням технологічної спадковості існуючого виробництва [5]. При цьому, технолог повністю абстрагується від

проблем функціонального (експлуатаційного) характеру об'єкта виробництва, справедливо вважаючи, що призначення норм точності і якості - це прерогатива конструктора! І діалог між конструктором і технологом в даному випадку відбувається виключно з міркувань забезпечення технологічності виробу, але ні в якому разі не в контексті забезпечення умов його майбутньої експлуатації, ремонту, технічного обслуговування і т.п.

В умовах автоматизованого виробництва, джерелом отримання вихідних даних для об'єктно-орієнтованого технологічного проектування (ООП) є проектно-конструкторська документація, що надається системами CAD і MacroCAE. У даному випадку під MacroCAE (Macro Computer Aided Engineering) мається на увазі класична система інженерного аналізу виробу, що дозволяє за допомогою розрахункових методів симуляції макрофізичних процесів оцінити, як поведе себе комп'ютерна модель виробу в імітованих умовах експлуатації, адекватних реальним.

Вважається, що для низхідного проектування найбільш прийнятний алгоритм, заснований на методології аналізу [8]. У даному випадку для ефективної формалізації складних логіко-евристичних процедур використовується проблемно-орієнтований пошук структурного прототипу за конструкторсько-технологічними ознаками з подальшою корекцією його параметрів у відповідності до вихідних даних на проектування. Очевидно, що така традиційна концепція технологічного проектування має ряд переваг, серед яких слід відзначити простоту і адекватність формалізації вихідної інформації; наявність вивченої теоретичної бази знань для прийняття оптимального технологічного рішення; алгоритмічна простота технологічного проектування, а також наявність значної кількості програмних продуктів, що реалізують принцип прототипування технологічних рішень (насамперед - CAPP і CAM систем).

Однак копіювання класичного алгоритму прийняття технологічних рішень істотно обмежує потенціал інтегрованої автоматизованої системи підготовки виробництва, не дає можливості комплексної реалізації PLM-концепції. Тому концепція об'єктно-орієнтованого технологічного проектування найбільш прийнятна в умовах неавтоматизованого проектування. Найбільш значимі недоліки та проблеми об'єктно-орієнтованого проектування полягають, насамперед, у неможливості обліку на етапі технологічного проектування функціональних властивостей виробів в умовах їх майбутньої експлуатації; структурної жорсткості, яка визначається відсутністю ітераційних і рекурентних зв'язків з іншими етапами інтегрованої системи технологічної підготовки виробництва; неповним відповідністю технології PLM проектування і неможливості реалізувати принцип паралельного інжинірингу.

У свою чергу, концепція функціонально-орієнтованого технологічного проектування передбачає пріоритет забезпечення високих експлуатаційних характеристик виробу при дотриманні точнісних, організаційних і техніко-економічних обмежень [8]. В умовах неавтоматизованого проектування, частковий облік експлуатаційних особливостей окремих (найбільш важливих і навантажених) деталей виробу є, як правило, результатом попередньо проведених експериментальних досліджень. Очевидно, що експериментальні дослідження в разі необхідності прийняття оперативного технологічного рішення вкрай небажані внаслідок значної трудомісткості і відсутності можливості диференційованого аналізу впливу окремих факторів на результат проектування. Наприклад, аналіз впливу геометрії різального інструменту, його коливань у всіх напрямках, деформаційні явища (в т.ч. залишкові) мають істотний вплив на мікротопологію поверхні. Однак проаналізувати їх вплив диференційовано можна на підставі аналізу результатів комплексного імітаційного реологічного і аналітичного моделювання [3], а експериментальним шляхом можна лише підтвердити адекватність їх сукупного впливу на формування мікрогеометрії остаточно.

Цікаві також дослідження реологій динаміки адіабатичного зсуву, характерного для оброблення ряду важкооброблюваних сталей і сплавів на основі титану, вольфраму, молібдену та ін. На рис. 1 показано, як зі збільшенням глибини різання змінюється геометрія стружки, а отже і динаміка сил різання, кут зсуву, виникають додаткові джерела автоколивань, залишкові напруження і так далі. Усе це істотно впливає на мікротопологію поверхні, а отже - на експлуатаційні властивості виробу.

Головною причиною адіабатичного зсуву є наявність концентрованих зон пластичної деформації, що у свою чергу сприяє локалізації температурних полів і зміні механічних властивостей оброблюваного матеріалу в цих зонах. Результати моделювання цілком корелюються з аналітичними залежностями Альбрехта. Причини виникнення автоколивань при обробленні заготовки з титанового сплаву в даному випадку показано на слайді. Концентрація

великої кількості теплоти в межах локалізованої ділянки контакту на передній поверхні призводять до переважання крихкого руйнування, як результат розвитку тих, що випереджають подачу інструменту мікро- і макротріщин, утворення локальних концентраторів напружень в місцях сколювання металу.

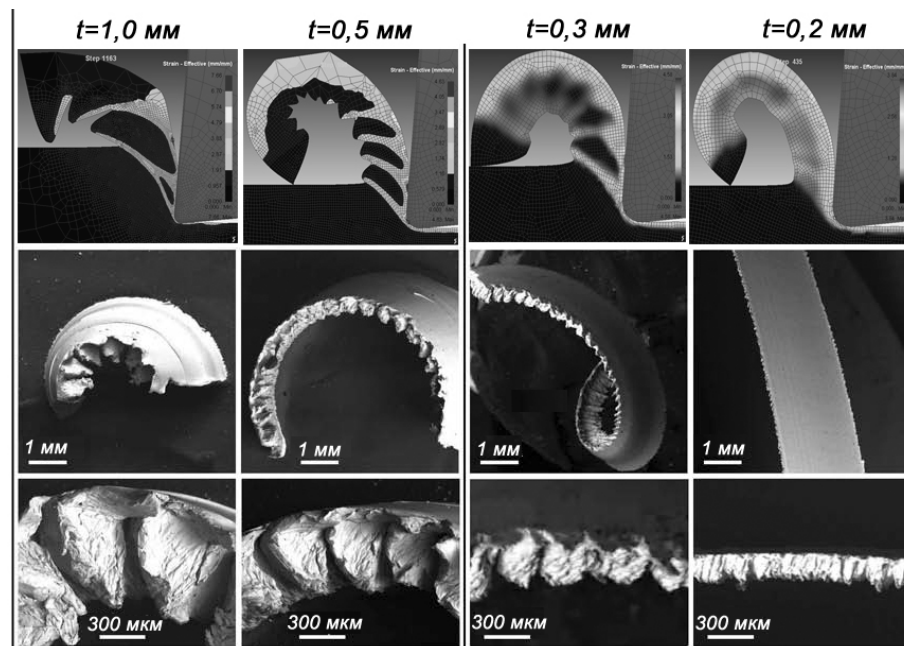


Рис. 1 Характер залежності геометричних параметрів стружки від глибини різання (динаміка адіабатичного зсуву)

Аналіз температурних полів різального інструмента (Рис.) дає можливість надалі моделювати динамічні процеси його зносу, наростоутворення т.п.

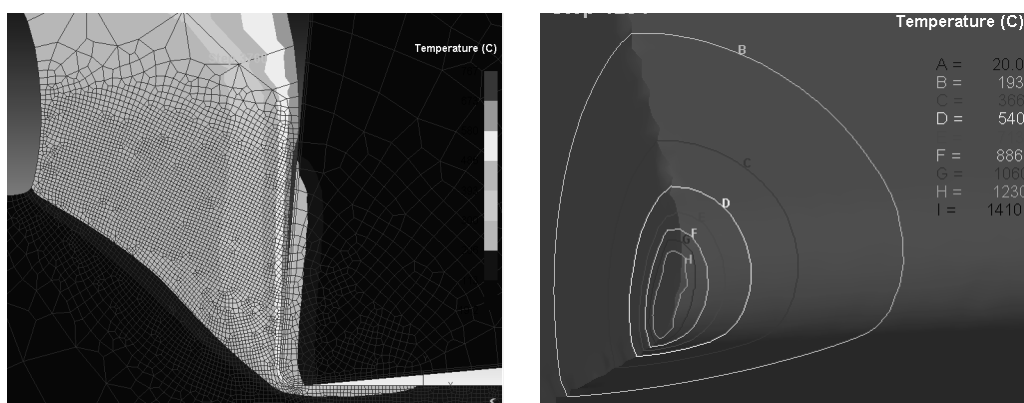


Рис. 2. Моделювання теплових полів різального клина інструмента

Тому очевидно, що в умовах реальної інженерної практики прогнозування функціональних особливостей виробу і пов'язане з ним призначення норм точності і якості окремих поверхонь виконується конструктором апріорно. Однак, навіть досвідчені конструктори не в змозі системно оцінити вплив таких важливих факторів, як мікротопологія поверхонь, залишкові напруги і деформації поверхневого шару на показники зносу, втомну міцність, маслоутримуючі та антикорозійні властивості поверхонь і т.д. Як показує виробничий досвід, 50-70% наявних дефектів готової продукції машинобудування виникають внаслідок помилок у конструкційній роботі, 20-30% через недостатню технологічності виробів і тільки 5-15% - з вини робітників [1].

Алгоритм функціонально-орієнтованого технологічного проектування (ФОП) є класичним прикладом ітераційного висхідного проектування з рекурентними зв'язками. У свою

чергу, технологія паралельного проектування (Concurrent Engineering) є розвитком технології наскрізного проектування. При паралельному проектуванні інформаційні потоки щодо забезпечення проміжних або остаточних характеристик виробу доступні для узгодження на різних стадіях розробки проекту. Це завдання вирішується на основі предиктивних (від лат. Praedictivus – «передбачливий, прогнозований») інструментальних засобів, тобто програм, що забезпечують зв'язок етапів функціонально-логічного, технічного (конструкторського) етапу проектування і етапу технологічної підготовки виробництва. При цьому, предиктивний інструментарій використовується як на рівні окремих проектних процедур, так і на рівні проекту в цілому (етап аван-проектування). Тому таке проектування дозволяє отримувати виріб з більш високими експлуатаційними характеристиками.

Вихідні дані для функціонально-орієнтованого технологічного проектування включають геометричну форму і розміри кожної функціональної поверхні деталі; специфікацію матеріалу деталі (в т.ч. аналітичні залежності його дислокаційної кінетики, криву термодформаційного зміцнення, критерії руйнування і т.д.); мікротопологію поверхневого шару кожної окремої функціональної поверхні деталі, що склалася внаслідок процесу її формоутворення, а також залишкові напруження і деформації, отримані в результаті силової та термодинамічної навантаження, якими супроводжується процес зміни геометричної форми, розмірів і фізико-механічного стану деталі при формоутворенні. САФ-системи класифікуються як системи формоутворення різанням, пластичною деформацією, формування поверхневого шару формоутворення методами складання (Рис. 3).

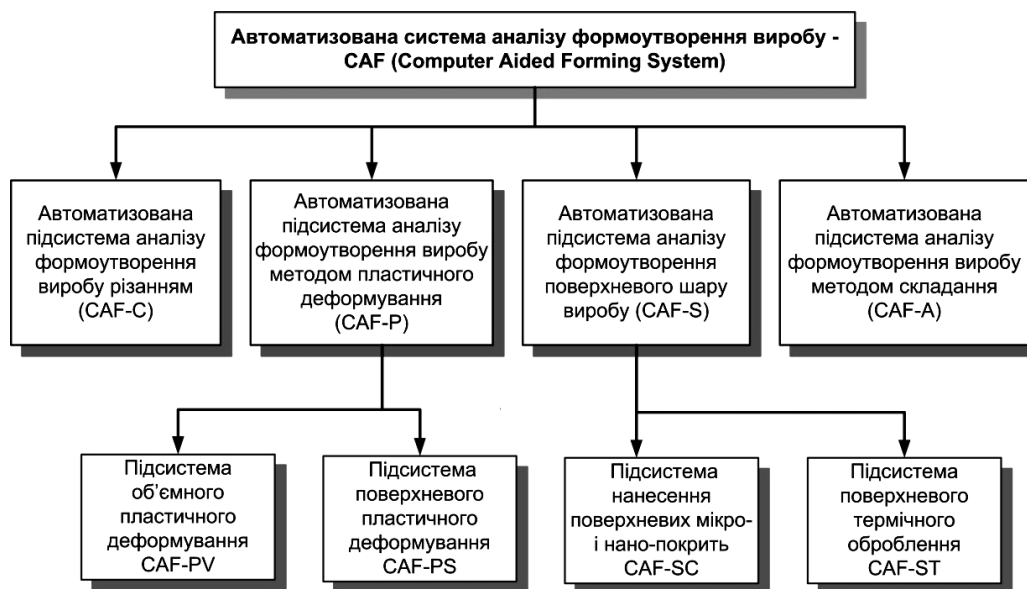


Рис. 3. Класифікація підсистем САФ (Computer Aided Forming System)

Очевидно, що отримати ці дані можна тільки на основі аналізу впливу структури і параметрів технологічного процесу на інженерію оброблених поверхонь. Формально цей етап є результатом роботи САЕ-системи, але інформацію для роботи можна отримати тільки з аналізу результатів роботи САФ-системи. Але етап аналізу формоутворення (CAF) виконується пізніше етапу інженерного аналізу (CAE). Тому без реалізації ітераційних зв'язків між окремими етапами інтегрованої системи підготовки виробництва здійснити процес функціонально-орієнтованого проектування неможливо! Крім того, проблемою є те, що класичні САЕ системи не розраховані на вирішення завдань аналізу триботехнічних, мікро- та нанодформаційних процесів, таких як зносостійкість, контактна жорсткість, втомна міцність, корозійна стійкість і т.п. Теоретична база таких досліджень аналітично і експериментально вивчена, але потреби в реалізації таких систем інженерного аналізу, як MicroCAE і NanoCAE в інженерній практиці ще немає, оскільки запропонований автором підхід до формування функціонально-орієнтованих технологій запропонований вперше.

Таким чином, виходячи з необхідності побудови функціонально-орієнтованих технологій, можна зробити висновок, що модернізації повинні підлягати не лише система автоматизованої технологічної підготовки виробництва, але і система інженерного

моделювання – CAE система. На сьогоднішній час реалізована тільки система макроінженерного моделювання. Тобто з 3D моделі виробу, специфікації матеріалу і схеми силової взаємодії і кінематичних обмежень ми отримуємо тільки об'ємні хромографічні і аналітичні картини еквівалентних напружень, макродеформацій і термодинамічного стану виробу в процесі його експлуатаційних навантажень. Проте, не менш важливою робота не реалізованої ще підсистеми мікроінженерного моделювання, результатом якої є моделювання динаміки руйнування і кінетики зношування найбільш важливих функціональних поверхонь виробу, модель втомних навантажень, модель забезпечення несучої здатності мастильного шару і т.п. (Рис.4). Розрахунок ресурсу трибосопряжень дозволяє прогнозувати кінетику зміни структури трибомеханічної системи. Це є необхідним елементом сучасного підходу до проектування і виготовлення механічного устаткування гарантованої і рівної довговічності.

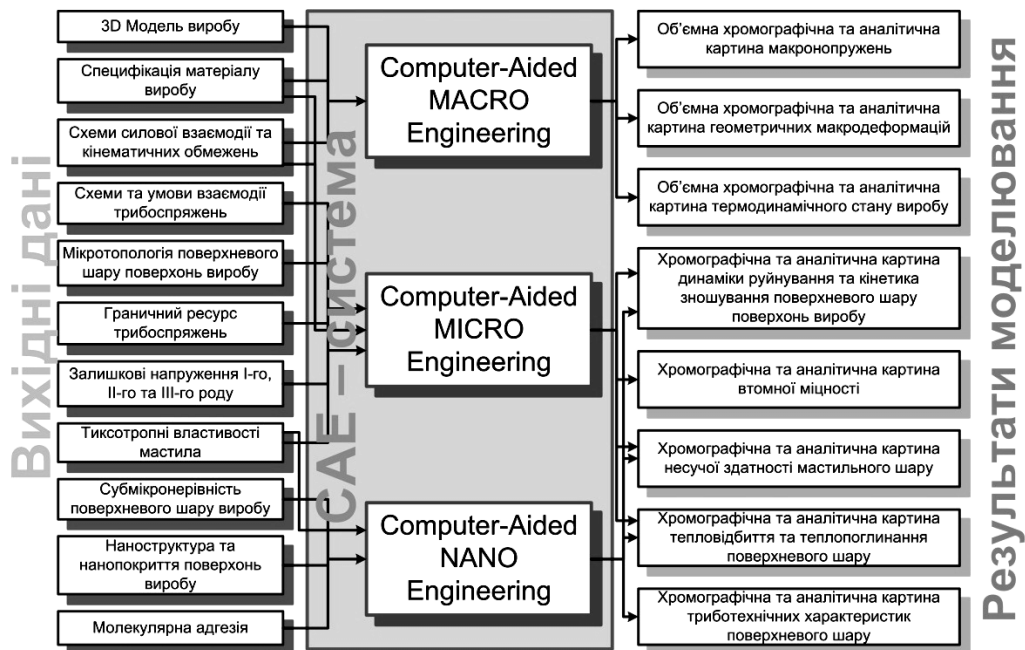


Рис. 4. Модернізована схема CAE-системи

Вважається, що для будь-якого висхідного проектування характерний алгоритмічний послідовний синтез [6] проектних структур. У разі реалізації концепції функціонально-орієнтованого проектування, синтез оптимальної структури і параметрів окремих технологічних переходів і операцій ґрунтується на предиктивних результатах імітаційного реологічного моделювання напружено-деформованого і термодинамічного стану виробу в процесі його формоутворення. Переваги функціонально-орієнтованого проектування перед об'єктно-орієнтованим цілком очевидні: формалізація рекурентних зв'язків між результатами технологічного проектування та умовами експлуатації виробу дозволяє забезпечити оптимальний комплекс його функціональних кваліметричних показників; повну відповідність концепції ФОП принципам PLM-системи; забезпечення системної інтеграції автоматизованих систем технологічної підготовки виробництва (Integer Computer-Aided Manufacturing - сукупність CAD/CAE/CAPP/CAF/CAM систем) засобами паралельного інжинірингу. Проте, крім позитивних особливостей, є багато проблем у реалізації функціонально-орієнтованого проектування, таких як складність обліку макрогеометричних параметрів деталі для формування структури технологічного процесу; необхідність структурної інтеграції та забезпечення єдиного STEP-формату обміну даних між окремими CAD/CAE/CAPP/CAF/CAM системами (CAE технологія) (ISO 10303) [2]; відносна складність формалізації вихідних даних для проектування; необхідність впровадження автоматизованої технологічної системи формоутворення виробу (CAF-система).

Враховуючи позитивні і негативні особливості обох концепцій проектування, можна рекомендувати використання алгоритму вибору оптимальної структури та параметрів технологічних процесів виходячи з концепції функціонально-орієнтованого проектування тільки для деталей, які мають функціональні поверхні, що підлягають в процесі експлуатації

підвищеним механічних, температурних і триботехнічних навантажень. Такі деталі найбільш визначають експлуатаційну якість виробу в цілому. Для деталей, які не відповідають цим умовам функціонування, доцільно використовувати алгоритм, який реалізує концепцію об'єктно-орієнтованого проектування. Таким чином, можна істотно оптимізувати за критерієм складності процес технологічної підготовки виробництва, реалізуючи при цьому PLM технологію.

Висновки.

1. Впровадження функціонально-орієнтованих технологій дає можливість більш ефективної реалізації концепції PLM в машинобудуванні на основі принципу паралельного проектування. Головною особливістю такого проектування є те, що первинним у формуванні структури і параметрів технологічних операцій і переходів є забезпечення комплексу функціонально-експлуатаційних властивостей виробу (точність, топологія поверхневого шару, залишкові напруження тощо).

2. Використання САЕ-системи органічно доповнює існуючу інтегровану CAD/CAE/CAPP/CAM систему, реалізує прогностичну можливість імітаційного моделювання і сприяє встановленню залежності основних кваліметричних показників виробу від структури і параметрів технологічного процесу, що є основою концепції функціонально-орієнтованого проектування.

3. Враховуючи всі позитивні і негативні особливості використання альтернативних концепцій технологічного проектування, можна рекомендувати застосування алгоритму вибору оптимальної структури та параметрів технологічних процесів використовуючи концепцію функціонально-орієнтованого проектування тільки для деталей, що мають функціонально-важливі поверхні, що підлягають в процесі експлуатації підвищеним механічним, температурним, хімічним, триботехнічним навантажень або їх поєднанням. Найбільш оптимальною методологією є комбінування альтернативних концепцій проектування, що полягає в попередньому пресинтезі структури і параметрів технологічного процесу з урахуванням макрогеометричних показників виробу (етап об'єктно-орієнтованого проектування) і подальшої корекції цих технологічних параметрів, виходячи з модельованих потенційних і критичних умов майбутньої його експлуатації (етап функціонально-орієнтованого проектування)

1. Stupnytskyy Vadym. Planning features of function-oriented technology engineering production / V. Stupnytskyy // «Scientific Potential». Elkraft, Indiana, USA – Vol. 1 Issue 1.- P.60-64.

2. ISO/IEC 12207:2008 Systems and software engineering-Software life cycle processes.

3. Stupnytskyy V. Subsystem of rheological forming modeling in integrated CAD/CAPP/CAM system in machine building// Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика». – Львів. – 2012, № 747. – С. 139-173.

4. Stupnytskyy Vadym. Computer aided machine-building technological process planning by the methods of concurrent engineering// Europäische Fachhochschule: Wissenschaftliche Zeitschrift, ORT Publishing. Stuttgart, Germany. № 3. – 2013 (Märzs-April). Section 13. P.346-354.

5. Stupnytskyy Vadym. Features of Functionally-Oriented Engineering Technologies in Concurrent Environment // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 2 Issue 9, September – 2013. – P.1181-1186.

6. Дмитров В.И. Опыт внедрения CALS за рубежом. // Автоматизация проектирования. М., 1997. – №1. – С. 2-9.

7. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.

8. Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Оптимизация технологических процессов механической обработки – Киев: Наук. думка, 1989. – 192 с.

9. Ступницький В.В. Використання САЕ-системи як основи формування функціонально-орієнтованих технологій машинобудівного виробництва // Вісник НУ «Львівська політехніка» «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні і приладобудуванні», 2012, №746, с. 40-45.