

УДК 621.9(075.8)

**В.В. Ступницький**, канд. техн. наук, доц.  
Національний університет «Львівська політехніка», Україна  
Тел./Факс: +38 (02) 2582501; E-mail: [stupn@i.ua](mailto:stupn@i.ua)

## ПРОЕКТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОРІЄНТОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ МЕХАНІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ЗАСОБАМИ ПАРАЛЕЛЬНОГО ІНЖИНІРИНГУ

*В статті описаний новий методологічний підхід у проектуванні технологічних процесів, що полягає у формуванні структури та параметрів технологічних операцій і переходів залежно від особливостей функціонування виробу у складі машини чи технологічної системи та забезпечується виконання заданого, необхідного або граничного експлуатаційного потенціалу його роботи. Цей метод ґрунтується на результатах роботи автоматизованої технологічної системи формоутворення (CAF) поверхонь деталі (ComputerAidedForming).*

**Ключові слова:** функціонально-орієнтована технологія, реологічне моделювання, CAF, паралельний інжиніринг, синтез.

### **Постановка проблеми в загальному вигляді і її зв'язок з важливими науковими і практичними завданнями**

Протягом останнього десятиліття головним чинником економічного зростання промислово-розвинених країн стало розроблення та впровадження інтегрованих інформаційних систем управління наукомістким виробництвом. Стратегічний підхід до організації технологічної підготовки машинобудівного виробництва базується на інтегрованому комплексі корпоративних програмних продуктів (системи CAD/CAE/CAPP/CAM). Це дозволяє колективно розробляти, поширювати і використовувати інформацію про виріб, а також керувати нею на протязі всього його життєвого циклу (PLM-система). При проектуванні структури та призначенні параметрів технологічного процесу, як важливої частини забезпечення цього життєвого циклу виробу, важливо враховувати умови його майбутньої експлуатації, технічного обслуговування та ремонту. Реалізація цього підходу можлива лише функціонально-орієнтованими технологіями, що базуються на концепції паралельного інжинірингу. В основі цієї концепції лежить рекурентний зв'язок між етапами конструкторського та технологічного проектування виробу, а також планування його виготовлення і супроводу, що координуються спеціально призначеним для цього розподіленим інформаційним середовищем. Подібна технологія дозволяє використати проектні дані з ранньої стадії одночасно різними групами фахівців. Фактично, при використанні концепції паралельного інжинірингу вдається досягти перекриття усіх стадій життєвого циклу виробу машинобудування, що забезпечує підвищенням якості його функціональних і споживчих властивостей та ефективність швидкого виконання індивідуального замовлення. Таким чином реалізується якісно новий методологічний підхід у проектуванні технологічних процесів, що полягає у формуванні структури та параметрів технологічних операцій і переходів залежно від особливостей функціонування виробу у складі машини чи технологічної системи та забезпечується виконання заданого, необхідного або граничного експлуатаційного потенціалу його роботи.

### **Аналіз досягнень і публікацій, в яких розпочато вирішення проблеми, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується ця стаття**

Запропонований проф. О.М. Михайловим підхід у реалізації функціонально-орієнтованих технологій базується на багаторівневому проектуванні структури технології на кількох рівнях [2]. Між окремими рівнями діють ітераційні та рекурентні зв'язки, що дозволяє синтезувати і коректувати структуру технологічного процесу на базі принципів комбінованих технологій; макро-, мікро-і нанотехнологій та функціонально-орієнтованих технологій. Ітераційні і рекурентні зв'язки між окремими етапами проектування технологій дозволяють, по перше - послідовно виконувати синтез структури технологічного процесу на базі всіх етапів композиційних технологій, по-друге - виконувати повернення процесу проектування на попередні етапи і коректувати розроблену раніше структуру технологічного процесу, і по-третє - при синтезі технології обходити окремі етапи проектування як в прямому, так і в зворотному напрямках.

Таким чином, зв'язок між функціональними властивостями виробу та технологією їх забезпечення повинен носити 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 (в т.ч. залишкові) мають суттєвий вплив 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.

### **Формулювання мети і постановка завдань роботи**

Метою даної наукової публікації є представлення нового методу технологічного проектування операцій механічного оброблення машинобудівних виробів на основі функціонально-орієнтованого принципу, що базується на прогностичних 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.

У роботі поставлено *завдання*: опис алгоритмічного забезпечення автоматизованої технологічної підсистеми формоутворення деталей (*CAF- системи*), в основі якої лежить проблемно-орієнтований аналіз імітаційної реологічної моделі окремих технологічних переходів та комплекс аналітично-прикладних програм формування параметрів точності, деформаційних, термодинамічних, мікрогеометричних, структурних та фазових параметрів оброблюваних поверхонь.

### **Основний зміст і результати роботи**

Основною особливістю запропонованої методології функціонально-орієнтованого технологічного проектування засобами паралельного інжинірингу є розроблена автором автоматизована технологічна система формоутворення деталей (*CAF- система – ComputerAidedForming*) [1]. В її основі лежить системний аналіз імітаційної реологічної моделі окремих технологічних переходів та комплекс аналітично-прикладних програм формування параметрів точності, термічно-деформаційних, мікро-

геометричних, структурних та фазових параметрів оброблюваних поверхонь та встановлення залежності основних кваліметричних показників виробу від структури та параметрів технологічного процесу. Запропонована технологія паралельного інжинірингу реалізується на основі інтегрованих інструментальних засобів прогностичної оцінки та аналізу альтернативних проектних рішень з подальшим вибором оптимального варіанту технологічного процесу на основі специфічних критеріїв, відмінних від тих, що використовують для традиційного об'єктно-орієнтованого проектування.

Для врахування особливостей експлуатації окремих деталей в 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, виходячи з прогностичних можливостей САЕ-системи[4].

На рис.1. представлений алгоритм синтезу технологій, що базується на ітераційних і рекурентних зв'язках. Процес проектування цих технологій включає в себе такі етапи:

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

Розглянемо найбільш важливі етапи такого проектування.

Вхідними даними для формування обмежень та критеріїв оптимізаційної задачі, що має на меті реалізацію функціонально-орієнтованого принципу проектування (або корекції) структури та параметрів технологічного процесу є комплекс кваліметричних параметрів, що реалізується на 2-х етапах (рис. 1). На першому етапі в САЕ-системі відбувається імітаційне моделювання умов експлуатації вузла та окремих його деталей. На другому етапі ці імітаційні моделі набувають аналітичної інтерпретації та формалізації, достатньої для використання у оптимізаційній моделі.

При виборі структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу, операції та переходу, заданих умовами експлуатації, точності виготовлення деталей машин і якості їх робочих поверхонь, потрібно мати на увазі, що якість обробленої поверхні і точність деталей машин в основному характеризуються: геометричними параметрами (мікрогеометрією, шорсткістю, напрямом штрихів оброблення, точністю взаємного розташування елементарних поверхонь тощо); фізико-механічними властивостями поверхневого шару (наклепом, залишковими напруженнями) і фізико-хімічними властивостями поверхневого шару, які формуються взаємодією малонасичених силових полів поверхневих атомів твердого тіла з силовими полями молекул зовнішнього середовища, що перебуває у контакті з поверхнею твердого тіла. Співставивши результати наукових досліджень проф. А.Г.Сулова [5] та проф. Ю.Г.Шнайдера [6] з результатами проведених реологічних та експериментальних досліджень в табл.1 наведений якісний зв'язок найбільш важливих експлуатаційних властивостей поверхонь з

комплексом параметрів його мікротопології. В даній таблиці прийняті наступні позначення:

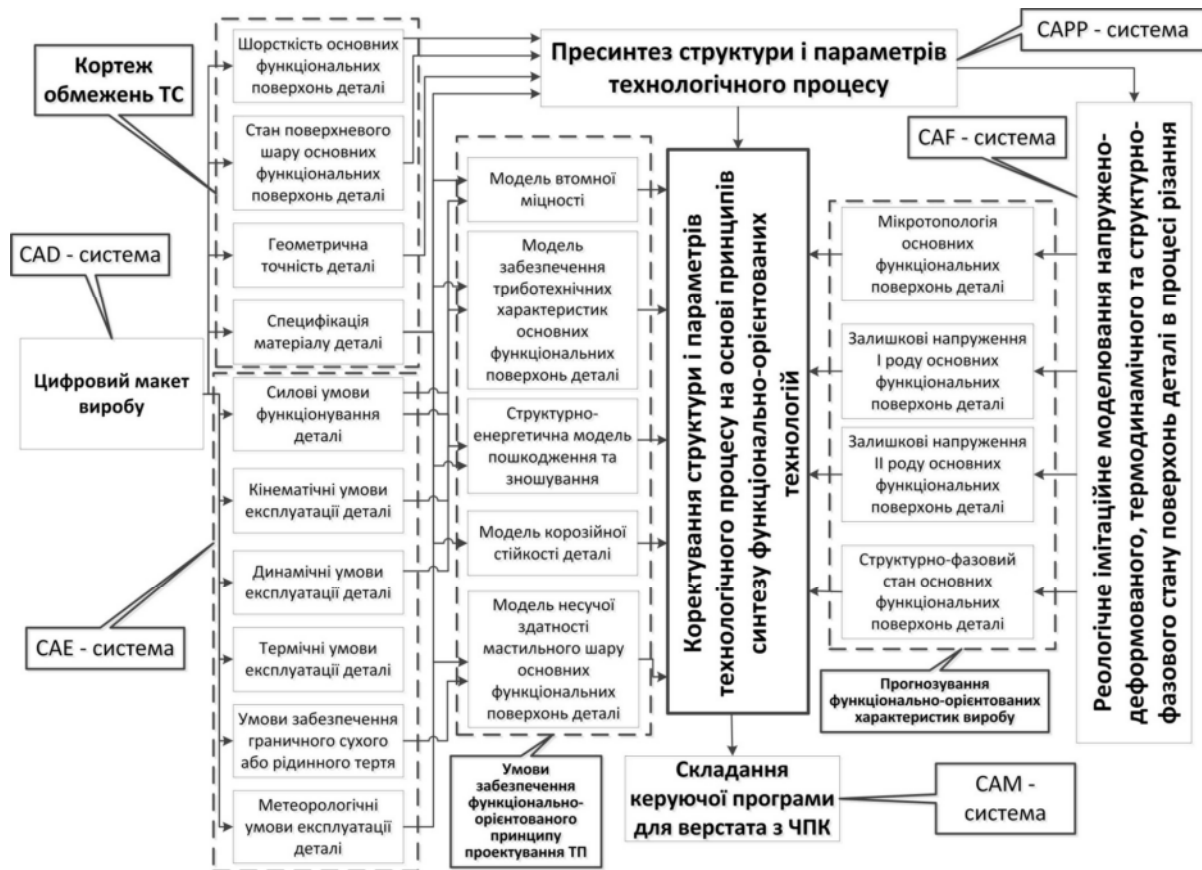


Рис. 1. Структурно-логічна схема технологічної підготовки виробництва за функціонально-орієнтованим принципом проектування

– знак «+» у відповідній графі таблиці означає, що збільшення вхідного параметру сприяє зростанню (покращенню властивостей) вихідного параметра, а знак «++» наголошує на домінуючому впливі даного вхідного параметра у збільшенні (підвищенні рівня відповідної експлуатаційної характеристики) вихідного параметра;

– знак «-» у відповідній графі таблиці означає, що збільшення вхідного параметру сприяє зменшенню (погіршенню функціональних властивостей) вихідного параметра, а знак «--» наголошує на домінуючому впливі даного вхідного параметра у зменшенні номінального значення або погіршенні експлуатаційної характеристики вихідного параметра, відповідно.

У діючому в Україні на сьогоднішній день стандарті ГОСТ 2789-73 «Шероховатість поверхності. Параметри і характеристики» регламентуються лише 6 параметрів для контролю шорсткості. Їх можна розділити на висотні ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $P_{max}$ ), крокові ( $S_m$ ,  $S$ ) і змішані ( $t_p$ ). За допомогою поєднання даних параметрів можна лише з незначною імовірністю здійснити прогнозування деяких функціональних параметрів виробу. З іншого боку, поєднання зазначених параметрів, та й сам профільний метод не завжди дають відповідь про експлуатаційні властивості поверхні. Якщо взяти до уваги стандарт ISO 4287-1997, то там вказані 76 параметрів, більшість з яких дозволяє з досить високою ефективністю контролювати ту чи іншу функціональну характеристику деталі. Напри-

клад, параметр  $R_{pk}$  (середнє арифметичне значення висот вершин, розташованих вище обраного рівня перетинів профілю) дозволяє визначити величину зношування матеріалу в процесі припрацювання, параметр  $R_k$  (глибина усіченого профілю) найбільш істотно впливає на термін служби деталі (допустиме зношування найбільш відповідальної функціональної поверхні), а параметр  $R_{vk}$  (середнє арифметичне значення глибин впадин, розташованих нижче вибраного рівня перетинів профілю) відображає здатність поверхні до утримання мастила тощо. Крім того важливо проводити непараметричну оцінку профілю [5]. Для даної оцінки можна скористатися опорної лінією. Заслугує на увагу досвід західноєвропейських держав, зокрема Німеччини, де контролюються не тільки параметри мікрогеометрії поверхні, але і форма профілю з використанням опорної лінії (DIN 4776). Застосування такого підходу дозволяє коректно задавати вимоги до функціональних поверхонь. На рис.2 представлений приклад побудови опорної лінії (кривої Аббота) профілю обробленої поверхні з відповідними характеристиками для зносостійких поверхонь.

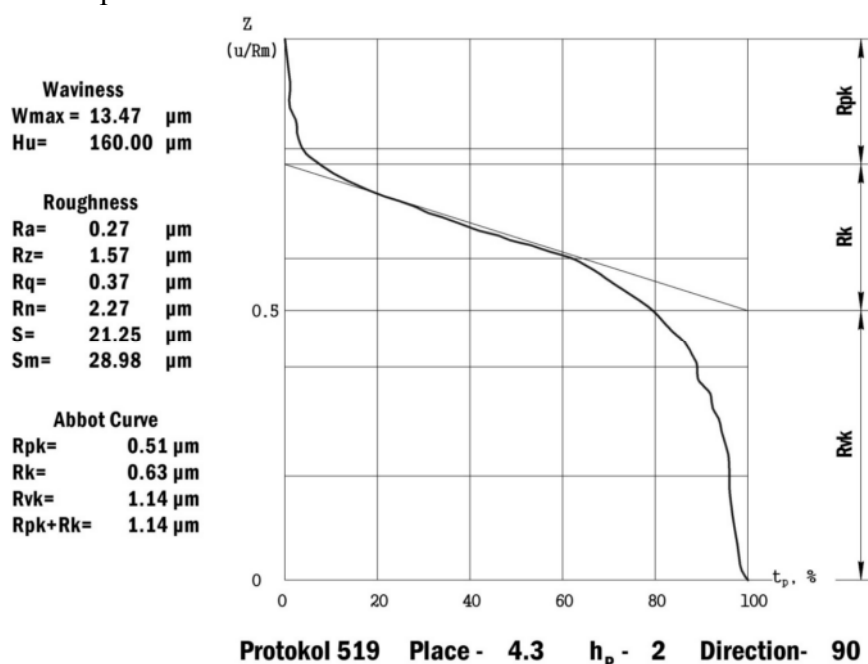


Рис. 2. Приклад формування опорної лінії профілю обробленої поверхні

Важливим етапом синтезу функціонально-орієнтованих технологій, що базується на ітераційних і рекурентних зв'язках (рис. 1) є 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 макету виробу відбувається вже на стадії підготовки виробництва, а не в результаті експериментального дослідження результатів виготовлення дослідного взірця (рис.3) [1].

Таблиця 1. Якісний зв'язок експлуатаційних властивостей поверхонь з комплексом параметрів його мікротопології, що забезпечуються режимами механічного оброблення та геометричними параметрами лезового інструмента

Вхідні параметри (режими лезового оброблення та геометричні характеристики леза)	Похідні параметри (характеристики якості та топології поверхневого шару)													
	$R_{max}$	$Ra$			$S_m$	$S$	$\beta$	$R_p$	$R_v$	$F$	$r^2$	$\sigma_{max}$		$h_3$
		$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_3$								$>0$	$<0$	
$s \leq 0,08$	+	++	++	0	+	+	0	0	0	++	++	+	+	+
$s > 0,08$	++	+	+	+	++	+	+	+	+	++	++	++	++	++
$V \leq 50$	-	0	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$V > 50$	-	0	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$t$	++	++	+	+	0	+	+	+	+	0	0	++	++	++
$\varphi$	+	++	0	+	0	++	+	+	+	+	+	-	-	-
$\varphi_1$	0	++	0	+	0	++	+	+	+	+	+	-	-	-
$r \leq 0$	++	+	++	++	0	-	+	+	0	0	0	-	-	-
$r > 0$	++	+	++	++	0	++	+	+	0	0	0	++	++	++
$\alpha \leq 5$	+	+	++	++	0	0	-	-	0	0	0	++	++	++
$\alpha > 5$	0	+	+	+	0	0	0	0	0	0	+	-	-	-
$r$	+	+	+	+	0	-	0	-	+	+	++	++	++	++
Вихідні параметри (основні експлуатаційні характеристики стійкості поверхонь)														
Зносостійкість	-	-	0	0	-	-	-	-	0	++	++	++	++	++
Коефіцієнт тертя	++	++	0	0	+	+	+	+	0	+	-	0	0	0
Втомна міцність	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	++	++	-
Корозійна стійкість	-	-	0	0	0	0	-	-	-	-	0	-	-	-
Мастильна утримуюча здатність	++	++	+	++	++	++	-	-	++	+	-	0	0	0
Пилويدаленість	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	++	0	0	0
Властивість відображення променів	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	++	0	0	0
Тепловідбиття	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	++	0	0	0
Властивість забезпечення герметичності з'єднання	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	+	0	0	0
Властивість поглинання теплової енергії	++	+	+	+	0	0	0	+	+	+	-	0	0	0

Позначення.  $R_{max}$  – найбільша висота мікронерівностей профілю, мкм;  $Ra$  – середнє арифметичне відхилення профілю, мкм;  $\Delta_1$  – геометрико-кінематична складова мік-

ронерівності профілю, мкм;  $\Delta_2$  – вібраційна складова мікронерівності профілю, мкм;  $\Delta_3$  – деформаційна складова мікронерівності профілю, мкм;  $S_m$  – середній крок мікронерівностей по вершинах, мкм;  $S$  – середній крок місцевих виступів профілю, мкм;  $\beta$  – кут нахилу бічної сторони нерівностей;  $R_p$  – усереднена висота виступів профілю, мкм;  $R_y$  – усереднена глибина западин профілю, мкм;  $F$  – сумарна площа опорної поверхні, мкм<sup>2</sup>;  $r^2$  – радіус заокруглення вершин виступів;  $\sigma_{зал}$  – залишкові напруження ( $\sigma_{зал} > 0$  – розтягувальні;  $\sigma_{зал} < 0$  – стискаючі);  $h_3$  – глибина наклепу, мкм.

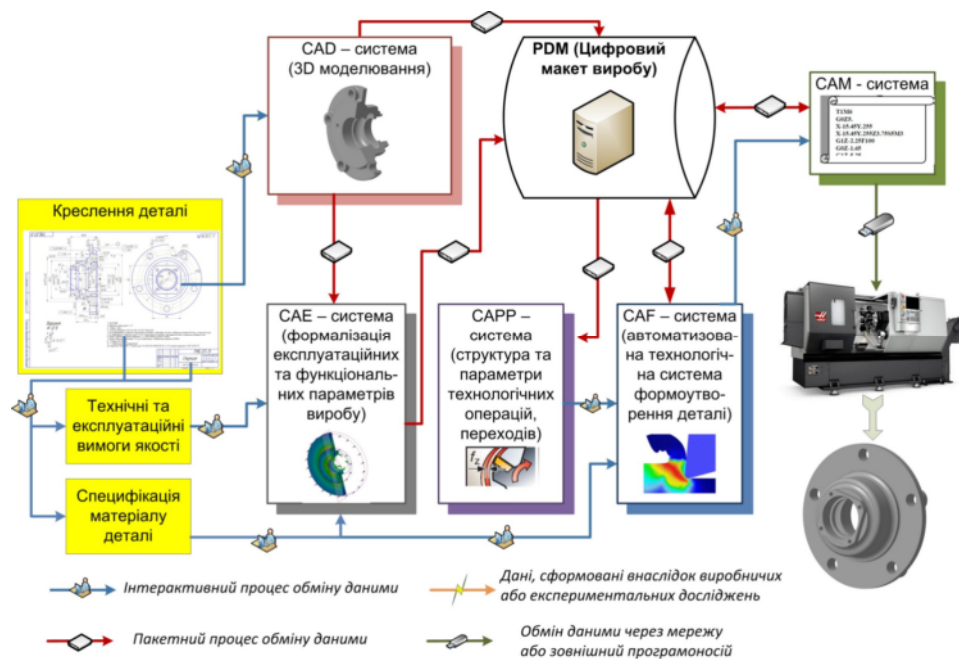


Рис. 3. Місце автоматизованої системи формоутворення у інтегрованій системі технологічної підготовки виробництва

Тераформуючими програмними продуктами САЕ-системи можуть бути такі відомі програмні комплекси як DEFORM-3D (ScientificForming Technologies Corp.), ABAQUS (DassaultSystèmesCorp.), AdvantEdge (EnginSoftCorp.), LS-DYNA (LivermoreSoftwareTechnologyCorp.) [3]. 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. В 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 звичайно-елементної сітки при виродженні елементів, високоефективні алгоритми рішення контактних задач, широкий набір проблемно-орієнтованих специфікацій матеріалів, можливості користувацького програмування.

## Висновки

Враховуючи те, що найбільш перспективним напрямом розвитку сучасного машинобудування є впровадження системних комп'ютерно-інтегрованих технологій, що спрямовані на реалізацію ефективного життєвого циклу виробу, запропоновані автором наукові дослідження функціонально-орієнтованих технологій засобами паралельного

інжинірингу є важливими та актуальними як для теоретичного розвитку науки «Технологія машинобудування», так і для практичного використання на підприємствах вітчизняного машинобудівного комплексу. Впровадження таких технологій сприятиме підвищенню конкурентоспроможності продукції вітчизняного виробництва та виходу підприємств зі складної економічної кризи.

#### Список літератури:

1. Stupnytsky V. Use of the CAF-system (Computer Aided Forming) in Integer Computer Aided Manufacturing / V. Stupnytsky // Papers of the XX Ukrainian-Polish Conference on CAD in Machinery Design. Implementation and Educational Issues – CADMD. – Lviv, 2012. – P. 45-48.
2. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / А.Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
3. Криворучко Д. В. Основы 3D-моделирования процессов механической обработки методом скінченних елементів / Д. В. Криворучко, В.О. Залого, В.Г. Корбач. - Суми: Вид-во СумДУ, 2009. – 208 с.
4. Ступницький В.В. Обладнання та прогресивні методи формоутворення виробів / В.В. Ступницький, І.Є. Грицай, А.М. Сліпчук. – Львів: Вид-во НУ «ЛПІ», 2012. – 360 с.
5. Суслов А.Г. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
6. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микро рельефом / Ю.Г. Шнейдер. - Л.: Машиностроение, 1982. – 247 с.

Надійшла до редакції 08.01.2013.

**Ступницький В.В.**  
**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-**  
**ОРИЕНТИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**  
**МЕХАНИЧЕСКОГО ОБРАБАТЫВАНИЯ**  
**ДЕТАЛЕЙ СРЕДСТВАМИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО**  
**ИНЖИНИРИНГА**

*В статье описан новый методологический подход в проектировании технологических процессов, который заключается в формировании структуры и параметров технологических операций и переходов в зависимости от особенностей функционирования изделия в составе машины или технологической системы. Этот метод основывается на результатах работы автоматизированной технологической системы формообразования поверхностей детали (Computer Aided Forming).*

**Ключевые слова:** функционально-ориентированная технология, реологическое моделирование, CAF, параллельный инжиниринг, синтез

**Stupnytsky V.**  
**PLANNING OF THE**  
**FUNCTIONALLY-ORIENTED**  
**MACHINING TECHNOLOGIES BY THE**  
**PARALLEL ENGINEERING**

*In the article new methodological approach is described in planning of technological processes, that consists in forming of structure and parameters of technological operations depending on parts functioning in a machine or technological system. This method is based on working results of the Computer Aided Forming System (CAF-system).*

**Keywords:** functionally-oriented technology, rheological design, CAF, parallel engineering, synthesis