

Добротворський С. С., Басова Є. В., Добровольська Л. Г.  
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

## КОМП'ЮТЕРНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ ЗАГАРТОВАНИХ СТАЛЕЙ

© Добротворський С. С., Басова Є. В., Добровольська Л. Г., 2017

The article presented and explained an algorithm creating a competitive manufacturing technology engineering products from hardened steel. Peculiarities treatment of hardened steel. The possibility of realization of multi-objective optimization process high-speed milling hardened steels based on the finite element method (FEM). A new method for determining the domain of existence of optimal technological modes of processing materials based on FEM.

**Keywords** - computer modeling, finite element method, high-speed milling, oblique cutting, rectangular cutting, technological modes.

У статті представлений та обґрунтований алгоритм створення конкурентоспроможної технології виготовлення машинобудівної продукції із загартованих сталей. Проаналізовані особливості обробки загартованих сталей. Обґрунтована можливість реалізації багатокритеріальної оптимізації процесу високошвидкісного фрезерування загартованих сталей на базі методу скінчених елементів (МСЕ). Представлений новий метод визначення області існування оптимальних технологічних режимів обробки матеріалів на базі МСЕ.

**Ключові слова** – комп'ютерне моделювання, метод скінчених елементів, високошвидкісне фрезерування, косокутне різання, прямокутне різання, технологічні режими.

### Вступ

Сучасне машинобудування характеризується підвищенням вимог до якості та точності виготовлення складних поверхонь деталей. Особливу складність являє область якісної обробки поверхонь загартованих деталей. Для забезпечення конкурентоспроможності вітчизняної продукції виникла гостра необхідність у одночасному забезпеченні як високої якості, так і точності оброблюваної деталі, та зниженні її собівартості. В умовах розвитку одиничного і дрібносерійного виробництва ця задача вирішується за рахунок використання сучасних високошвидкісних багатокординатних оброблювальних центрів (ОЦ), на яких деталь проходить повний цикл обробки. Особливу цікавість та, одночасно, складність представляє область якісної обробки поверхонь загартованих деталей на такому обладнанні з метою отримання характеристик готової продукції, аутентичних шліфуванню.

### Постановка проблеми

Застосування існуючих технологій обробки на фінішних етапах виготовлення деталі заздалегідь визначає можливу зміну фізико-механічного стану поверхні і утворення залишкових напружень розтягування, які негативно впливають на експлуатаційні властивості деталей машин. У зв'язку з цим виникає необхідність пошуку нових технологічних рішень, що забезпечать високу якість і точність обробки складних поверхонь із загартованих сталей з використанням можливостей сучасних ОЦ. Однак створення такої технології потребує з одного боку розгляду наскрізного циклу від проектування до виготовлення деталі з використанням сучасних CAD/CAE/CAM/CAPP-систем в умовах автоматизованого виробництва, а з іншого - глибокого розуміння і вивчення, як особливостей самої технології, так і процесів, що протікають в зоні різання і впливають на формування шорсткості та зміни фізико-механічного стану поверхні. Окрім того, незважаючи на велику кількість існуючих робіт, на сьогоднішній

день не вдається знайти дослідження, що представляють системний підхід до процесу планування розробки конкурентоспроможної технології виготовлення машинобудівної продукції із загартованих матеріалів економічно обґрунтованим та надійним способом.

### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Найбільш перспективною технологією обробки поверхонь із загартованих сталей є високошвидкісне фрезерування (ВШФ). Така технологія дозволяє забезпечити плавність переміщення інструменту в процесі обробки і точність виготовлення складнопрофільних поверхонь, які в процесі експлуатації не піддаються припрацюванню [1]. При плануванні впровадження високошвидкісного фрезерування поверхонь деталей із загартованих сталей необхідно враховувати, що перетворення, які відбуваються при загартуванні, відпусканні та подальшій термічній обробці мають важливе технологічне значення. Автором роботи [2] зазначено, що загартована сталь набуває хороші пружні властивості і відносно велику в'язкість. В роботі [3] наведені ґрунтовні відмінності обробки загартованої сталі, а саме: при обробці загартованої сталі формування пилкоподібної стружки відбувається за рахунок надлому оброблюваного матеріалу; процес стружкоутворення характеризується малим кутом зсуву матеріалу в площині обробки та ін. Професор Накаяма та ін. у 1988 році виконали аналіз обробки загартованих сталей і виділили питання, які і досі вимагають глибокого розуміння і вивчення - це наявність кута різальної кромки при обробці крихкого матеріалу і його кореляція з напрямком поширення руйнування, що з точки зору технології машинобудування може забезпечити цілісність і зносостійкість деталей машин в процесі експлуатації; для забезпечення якості робочих поверхонь необхідне розуміння природи джерел високої температури в зоні обробки загартованої сталі, її вплив на процес різання, і, як результат, на формування фізико-механічних характеристик обробленого матеріалу тощо.

Основні ідеї та модель процесу стружкоутворення, що запропонована в роботі [4], успішно розвинені подальшими дослідженнями. В роботі [5] дослідниками представлена більш гнучка модель процесу стружкоутворення, яка характеризує процес механообробки і менш крихких матеріалів. Вивчаючи процес стружкоутворення [6] дослідники визначили, що формування сегментної стружки є нелінійним динамічним процесом, який може вплинути на силу різання, точність механообробки і якість поверхні. Мабуть, найбільш адекватна модель процесу стружкоутворення при обробці загартованих сталей представлена в роботі [5], де врахували як руйнування, так і пластичну деформацію товстого перетину стружки, що дозволило пояснити структуру стружки.

Вивченню якісних характеристик загартованих сталей після ВШФ на сьогоднішній день приділено дуже мало уваги. Практично відсутні як теоретичні, так і експериментальні дослідження застосування технології ВШФ при обробці деталей із загартованих сталей. Для глибокого розуміння явищ, що відбуваються в процесі ВШФ, можна провести аналіз на основі методу скінчених елементів (МСЕ), який дозволяє отримати досить точні прогнози в зручному графічному інтерфейсі. Зарубіжними вченими такий аналіз досить широко використовується в моделюванні та оптимізації процесів різання (Давимо, 2010; Бекер, 2006; Озёл 1998, 2003, 2007, 2009 та ін). Застосування МСЕ для тривимірного (3D) аналізу зустрічається вкрай рідко, хоча він дозволяє отримати всебічну картину процесів і має значну перевагу у вирішенні складних оптимізаційних задач.

### **Формулювання цілі статті**

Мета статті – підвищення якості обробки деталей із загартованих сталей на базі комп'ютерного проектування та моделювання технологічних процесів ВШФ.

### **Виклад основного матеріалу**

Аналіз робіт вітчизняних та іноземних дослідників дозволив нам встановити, що реалізація технології ВШФ при обробці загартованих сталей вимагає використання швидкостей різання 250-600

м/хв і вище, що робить украй обмеженою можливість використання традиційних технологічних процесів. Визначено, що ВШФ складних поверхонь, в умовах локалізації теплових зон і розподілу напружено-деформованого стану матеріалу в процесі обробки, вимагає застосування технології попереднього комп'ютерного проектування та моделювання для забезпечення якості поверхневого шару з гранично малими значеннями залишкової шорсткості, поверхневої мікротвердості та структурно-фазового складу. Окрім того, ми зробили висновок, що створення технології якісного ВШФ загартованих деталей потребує комплексного підходу з розглядом усіх етапів наскрізного циклу від проектування точних 3D-моделей до вироблення деталей на ОЦ, з урахуванням особливостей процесів руйнування та формування поверхні, тобто у межах CAD/CAE/CAM/CAPP систем (рис. 2) [1, 6].

Дослідження показують, що основу сучасного кібернетичного підходу до вирішення задач технології машинобудування становить системний аналіз, відповідно до якого задачі дослідження, аналізу і розрахунку окремих технологічних процесів, комп'ютерного моделювання та оптимізації складних технологічних процесів та явищ, а також оптимального проектування технологічних комплексів - вирішуються у тісному зв'язку один з одним, оскільки об'єднані загальною стратегією і підпорядковані єдиній меті - створенню високоефективної технології виготовлення конкурентоспроможної продукції.

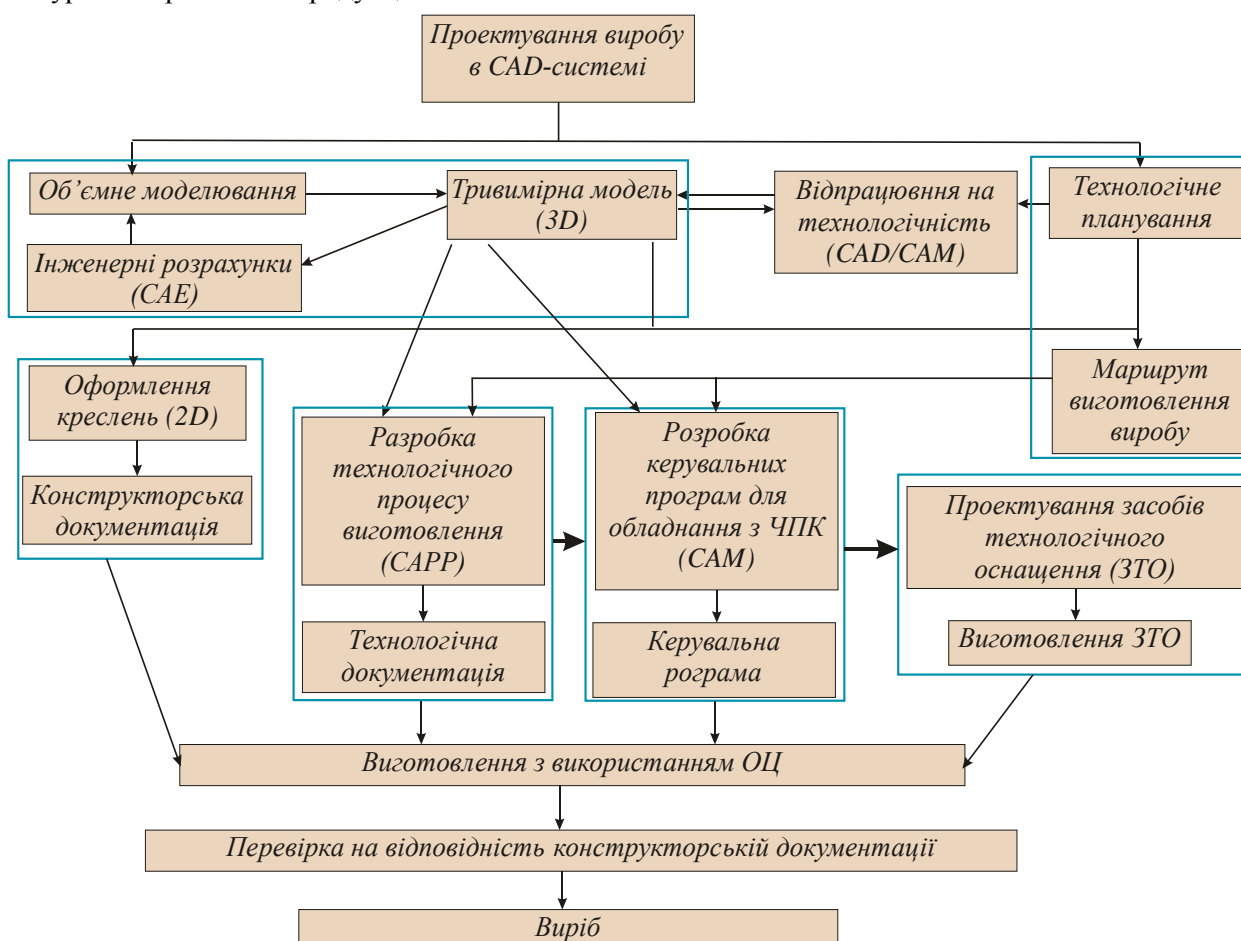


Рис.1 Наскрізний паралельний цикл виготовлення деталі

Розробка технології виготовлення високоякісної продукції із загартованих сталей методом ВШФ потребує матеріальних та часових затрат на пошук оптимальних технологічних режимів обробки нового матеріалу, що негативно позначається на собівартості продукції.

Для рішення задачі визначення області існування оптимальних технологічних режимів ВШФ загартованих сталей було вирішено використовувати комп'ютерне проектування та моделювання

образів досліджуваних технологічних об'єктів на базі обчислювально-логічних алгоритмів із застосуванням МСЕ (рис. 2).

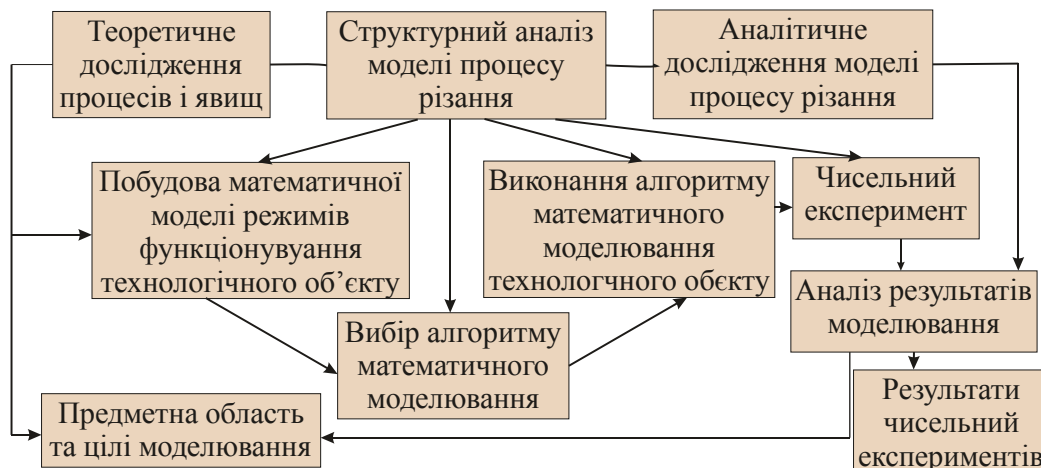


Рис.2 Схема організації комп'ютерного моделювання технологічного процесу ВШФ

Виходячи з того, що комп'ютерне моделювання ВШФ ми використовували для дослідження, оптимізації та проектування реальних технологічних задач виготовлення високоякісної продукції із загартованих сталей, було виділено два об'єкти дослідження: процес прямокутного та процес косокутного різання матеріалів.

Для аналізу процесу прямокутного різання застосовували 2D моделювання системи двох тіл «інструмент-заготовка» в середовищі DEFORM - 2D (рис. 3). Пошук області існування оптимальних режимів різання здійснювали за допомогою чисельних експериментів зі зміною швидкості різання (м/хв), подачі інструменту (мм/зуб) та глибини різання (мм). Експериментальний аналіз виконували на базі побудови моделі оновленим лагранжіаном, яка, в свою чергу, використовує метод автоматичного перестроювання сітки. Це дозволило в процесі стружкоутворення забезпечувати безперервне перестроювання сітки, та виключити використання критерію відриву. Моделювання технологічного процесу на базі обраної моделі дозволяє у разі виникнення спотворених елементів, в процесі математичного моделювання, автоматично спрацьовувати механізму генерації нової сітки, який ділить кордони контакту та з'єднує адекватні внутрішні вузли і згладжує елементи, а потім здійснює інтерполяцію напружень та деформацій для нової сітки. В результаті чисельних розрахунків вдалось встановити нижні межі технологічних умов переходу від традиційного до високошвидкісного різання. Визначено, що перехід від низькошвидкісного різання до високошвидкісного характеризується зростанням часового зсуву між хвилею деформації і температурною хвилею, що мають місце в зоні руйнування матеріалу, на  $10^{-7}$ - $10^{-8}$  сек [1].

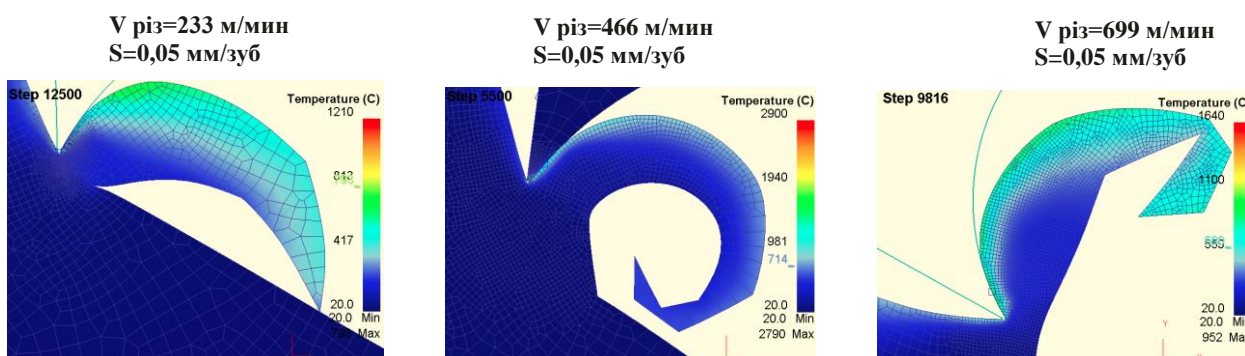


Рис.3 Моделювання процесу прямокутного різання загартованої сталі в середовищі 2D

Проведений аналіз впливу різних технологічних чинників на якісні зміни в пластично-деформованому шарі матеріалу показав, що існує пряма кореляція процесу стружкоутворення і напружено-деформованого стану матеріалу залежно від кута нахилу стружковідводної канавки інструменту, це підтверджено рядом чисельних розрахунків з різними варіантами змін 3D моделей інструменту. Дослідження косокутного різання здійснювали в системі моделювання DEFORM - 3D. Граничними умовами визначали теплообмін між інструментом, матеріалом і зовнішнім середовищем.

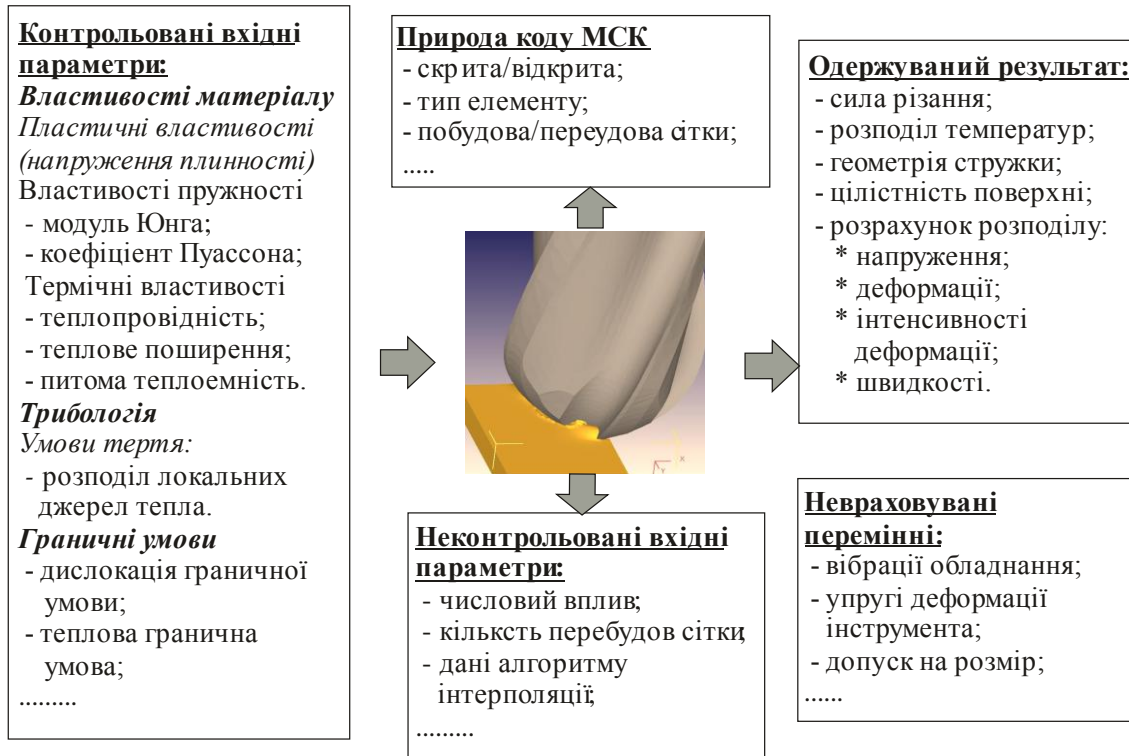


Рис.3 Моделювання процесу косокутного різання загартованої сталі в середовищі 3D

Це дозволило реалізувати багатокритеріальну оптимізацію процесу ВШФ, та проранжувати його технологічні параметри і отримати достатньо точні прогнози фізичних та фізико-механічних характеристик високошвидкісного руйнування матеріалу в зручному графічному інтерфейсі [1].

Аналіз експериментальних результатів комп'ютерного моделювання технологічного процесу ВШФ дав підставу стверджувати, що граничні (максимальні) режими різання, де можна призначити режими обробки, знаходяться між максимумом енергетичного вкладу в процес руйнування матеріалу та величиною енергетичного вкладу в процес різання, яка відповідає моменту пластичного плину матеріалу [7]. Визначено, що для оціночного призначення максимальних граничних технологічних режимів обробки необхідно використовувати максимальне значення енергетичного вкладу в процес обробки.

Глибину порушеного шару матеріалу досліджуваного зразка оцінювали за результатами візуалізації розподілу деформацій матеріалу і графічного представлення їх розподілу в процесі ВШФ. Отримані результати враховували при визначенні діапазону існування технологічних режимів для ВШФ (рис. 4).

Порівняння результатів комп'ютерного моделювання прямокутного та косокутного різання показують, що температури при косокутному різанні значно нижчі, ніж при ортогональному. При останньому мають місце фазові перетворення, а при косокутному їх немає. Це дозволяє стверджувати, що косокутне ВШФ дозволить уникнути відпускання матеріалів в процесі обробки і появи несприятливих структурних характеристик в порушено-деформованому шарі (рис. 4).

З точки зору технології машинобудування це дозволяє забезпечити стабільну дислокаційну природу накопичення пошкоджуваності матеріалу, як в процесі обробки, так і в процесі експлуатації виробу. Такий результат може бути прийнятий за критерій зносостійкості оброблених поверхонь.

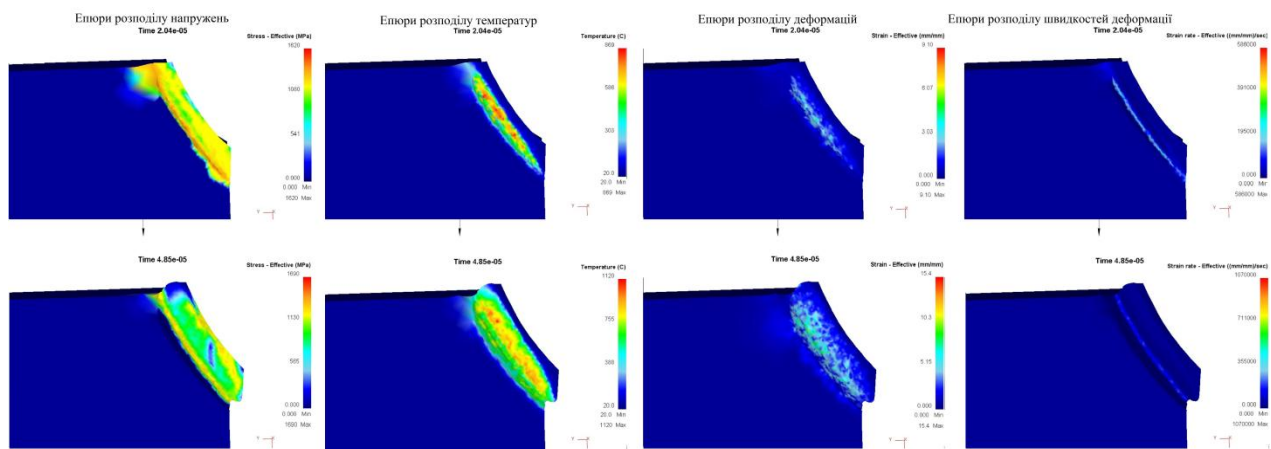


Рис. 4. Результати моделювання технологічного процесу косокутного ВШФ загартованої сталі

## Висновки

В результаті аналізу сучасних можливостей технологій в машинобудуванні ми визначили, що проектування та комп'ютерне моделювання технологічних процесів механообробки є невід'ємним етапом створення якісної продукції. Комп'ютерне моделювання дозволяє відтворити процес різання з високим ступенем ізоморфізму, та отримати достатньо точні прогнозовані результати процесів і явищ. Окрім того ми визначили, що комп'ютерне моделювання процесу ВШФ є достатнім для визначення технологічних режимів обробки деталі на етапі планування технологічного процесу виготовлення виробу, що дозволяє виключити етапи відпрацювання режимів в умовах виробництва, а, отже, і зменшити собівартість продукції.

*Література:* 1. Басова Е.В. Технологическое обеспечение качества и точности поверхностей деталей из закаленных хромомolibденовых сталей методом высокоскоростного фрезерования: дис.... канд. техн. наук : 05.02.08 / Басова Евгения Владимировна. – Харьков, 2014. – 236 с. – Библиогр. : с. 214–226. 2. Фетисов Г.П. Материаловедение и технология металлов/ Г.П. Фетисов. – М.: Высшая школа, 2001. – 640 с. 3. Singht D. A surface roughness prediction model for hard turning process / D. Singh, P.V. Rao // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2007. – Vol.189. – pp.192–198. 4. Nakayama K. Machining characteristic of hard materials. *CIRP Annals* / K. Nakayama, M.Arai, T. Kanda // *Manufacturing Technology*. – 1988. - №37(1). – pp. 89–92. 5. Shaw M.C. Chip Formation in the Machining of Hardened Steel / M.C. Shaw, A. Vyas // *CIRP Annals: Manufacturing Technology*. – 1993. - №42(1). - pp. 29–33. 6. Davies M.A. On the dynamics of chip formation in machining hard metals / M.A. Davies, T.J. Burns, C.J. Evans // *CIRP Annals: Manufacturing Technology*. – 1997. - №46(1). – pp. 25–30. 6. Доротворский С.С. Повышение конкурентоспособности отечественного машиностроительного производства в современных условиях / С.С. Доротворский, Е.В. Басова, Л.Г. Доровольская // *Вісник НТУ «ХП»*. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні – Харків: НТУ «ХП», 2014. - №. 42(1085). – С.25-31 7. Доротворский С.С. Энергетический подход к определению технологических режимов при высокоскоростной обработке / С.С. Доротворский, А.К. Мяслица, Е.В. Басова, Л.Г.Доровольская и др. // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. – Х.: НАУ «ХАИ», 2014. – №.65.