

С. С. Добротворський, Є. В. Басова, Л. Г. Добровольська
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., 2015

Наведений та обґрунтований алгоритм створення конкурентоспроможної технології виготовлення машинобудівної продукції із загартованих сталей. Проаналізовані особливості обробки загартованих сталей. Обґрунтована можливість реалізації багато-критеріальної оптимізації процесу високошвидкісного фрезерування загартованих сталей на базі методу скінченних елементів (МСЕ). Поданий новий метод визначення ділянки існування оптимальних технологічних режимів обробки матеріалів на базі МСЕ.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, метод скінченних елементів, високошвидкісне фрезерування, косокутне різання, прямокутне різання, технологічні режими.

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.

Key words: computer modeling, finite element method, high-speed milling, oblique cutting, rectangular cutting, technological modes.

Вступ. Сучасне машинобудування характеризується підвищенням вимог до якості та точності виготовлення складних поверхонь деталей. Особливо складною є ділянка якісної обробки поверхонь загартованих деталей. Для забезпечення конкурентоспроможності вітчизняної продукції виникла нагальна необхідність у одночасному забезпеченні і високої якості, і точності оброблюваної деталі, та зниженні її собівартості. В умовах розвитку одиничного і дрібносерійного виробництва цю задачу розв'язують за рахунок використання сучасних високошвидкісних багатокоординатних оброблювальних центрів (ОЦ), на яких деталь проходить повний цикл обробки. Особливий інтерес та, одночасно, складність становить ділянка якісної обробки поверхонь загартованих деталей на такому обладнанні з метою отримання характеристик готової продукції, аутентичних шліфуванню.

Постановка проблеми. Застосування наявних 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

та вивчення і особливостей самої технології, і процесів, що відбуваються в зоні різання і впливають на формування шорсткості та зміни фізико-механічного стану поверхні. Окрім того, незважаючи на велику кількість існуючих робіт, сьогодні 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. Найперспективнішою 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 під час експлуатації не піддаються опрацюванню [1]. Плануючи впровадження високошвидкісного фрезерування поверхонь деталей із загартованих сталей, необхідно враховувати, що перетворення, які відбуваються під час загартовування, відпускання та подальшої термічної обробки мають важливе технологічне значення. Автор роботи [2] зазначив, що загартована сталь набуває хороші пружні властивості і порівняно велику в'язкість. У 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 тощо. Професор Накаяма та ін. у 1988 р. проаналізували обробку загартованих сталей і виділили питання, які і досі вимагають глибокого розуміння і вивчення, а саме наявність кута різальної кромки при обробці крихкого матеріалу і його кореляція з напрямком поширення руйнування, що з погляду технології машинобудування може забезпечити цілісність і зносостійкість деталей машин під час експлуатації; для забезпечення якості робочих поверхонь необхідне розуміння природи джерел високої температури в зоні обробки загартованої сталі, її вплив на 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 в подальших дослідженнях. У роботі [5] дослідники подали гнучкішу 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 механооброблення і якість поверхні. Мабуть, найбільш адекватна модель стружкоутворення під час оброблення загартованих сталей наведена в роботі [5], де врахували і руйнування, і пластичну деформацію товстого перетину стружки, що дозволило пояснити структуру стружки.

Вивченню якісних характеристик загартованих сталей після ВШФ сьогодні приділено дуже мало уваги. Практично відсутні і теоретичні, і експериментальні дослідження застосування технології ВШФ під час оброблення деталей із загартованих сталей. Для глибокого розуміння явищ, що відбуваються під час ВШФ, можна проаналізувати на основі методу скінченних елементів (МСЕ), який дає змогу отримати доволі точні прогнози в зручному графічному інтерфейсі. Зарубіжні вчені такий аналіз доволі широко використовують у моделюванні та оптимізації процесів різання (Давимо, 2010; Бекер, 2006; Озёл 1998, 2003, 2007, 2009 та ін). Застосовують МСЕ для тривимірного (3D) аналізу вкрай рідко, хоча він дозволяє отримати всебічну картину процесів і має значну перевагу у виконанні складних оптимізаційних завдань.

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

Виклад основного матеріалу. Аналіз робіт вітчизняних та іноземних дослідників дав змогу нам встановити, що реалізація технології ВШФ під час оброблення 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 під час оброблення, 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 виконання завдань технології машинобудування становить системний аналіз, відповідно до якого завдання дослідження, аналізу і розрахунку окремих технологічних процесів, комп'ютерного моделювання та оптимізації складних технологічних процесів та явищ, а також оптимального проектування технологічних комплексів – виконуються у тісному зв'язку один з одним, оскільки об'єднані загальною стратегією і підпорядковані єдиній меті – створенню вискоефективної технології виготовлення конкурентоспроможної продукції.

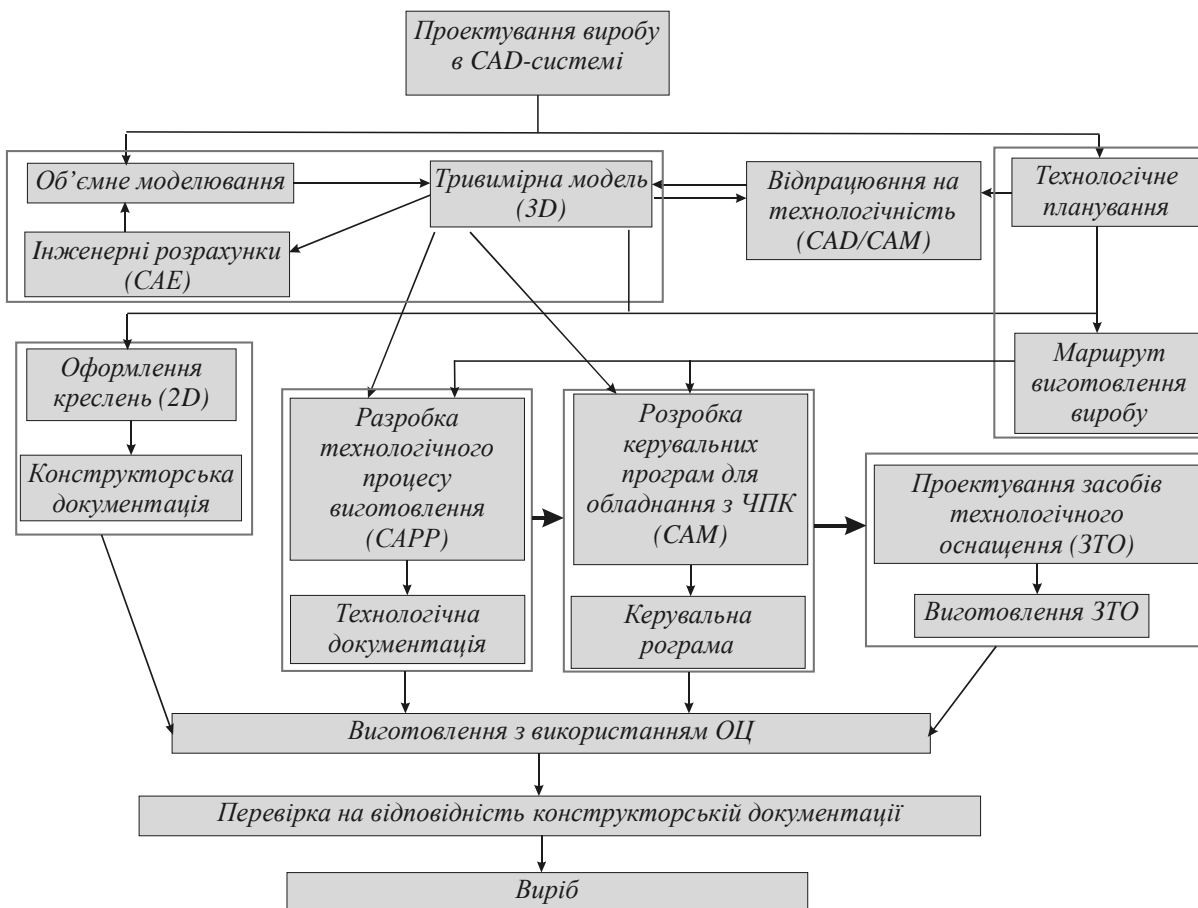


Рис. 1. Наскрізний паралельний цикл виготовлення деталі

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

Щоб визначити ділянку існування оптимальних технологічних режимів ВШФ загартованих сталей, вирішили використовувати комп'ютерне проектування та моделювання образів досліджуваних технологічних об'єктів на базі обчислювально-логічних алгоритмів із застосуванням МСЕ (рис. 2).

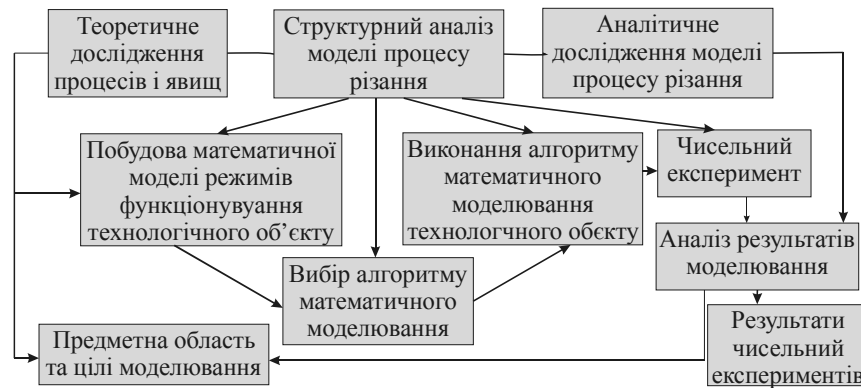


Рис. 2. Схема організації комп'ютерного моделювання технологічного процесу ВШФ

Враховуючи те, що комп'ютерне моделювання ВШФ ми використовували для дослідження, оптимізації та проектування реальних технологічних завдань виготовлення високоякісної продукції із загартованих сталей, було виділено два об'єкти дослідження: прямокутне та косокутне різання матеріалів.

Для аналізу прямокутного різання застосовували 2D моделювання системи двох тіл "інструмент-заготовка" в середовищі DEFORM – 2D (рис. 3). Пошук ділянки існування оптимальних режимів різання здійснювали за допомогою численних 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, своєю чергою, використовує метод автоматичного перестроювання сітки. Це дозволило в процесі стружкоутворення забезпечувати безперервне перестроювання сітки, та усунути використання критерію відриву. Моделювання технологічного процесу на базі обраної моделі дозволяє у разі виникнення спотворених елементів, під час 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. У 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} с [1].

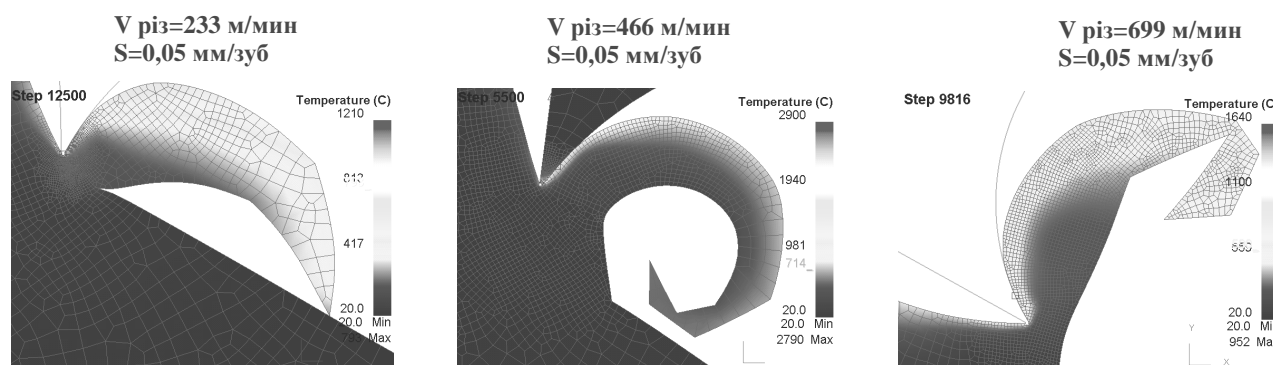


Рис. 3. Моделювання процесу прямокутного різання загартованої сталі в середовищі 2D

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 низкою розрахунків з різними варіантами змін 3D моделей інструменту. Досліджували косокутне різання в системі моделювання DEFORM – 3D. Граничними умовами визначали теплообмін між інструментом, матеріалом і зовнішнім середовищем.

Це дало змогу 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 призначати режими оброблення, знаходяться між максимумом енергетичного внеску в руйнування матеріалу та величиною енергетичного внеску в різання, яка відповідає моменту пластичного плину матеріалу [7]. Визначено, що для оціночного призначення максимальних граничних технологічних режимів оброблення необхідно використовувати максимальне значення енергетичного внеску в оброблення.

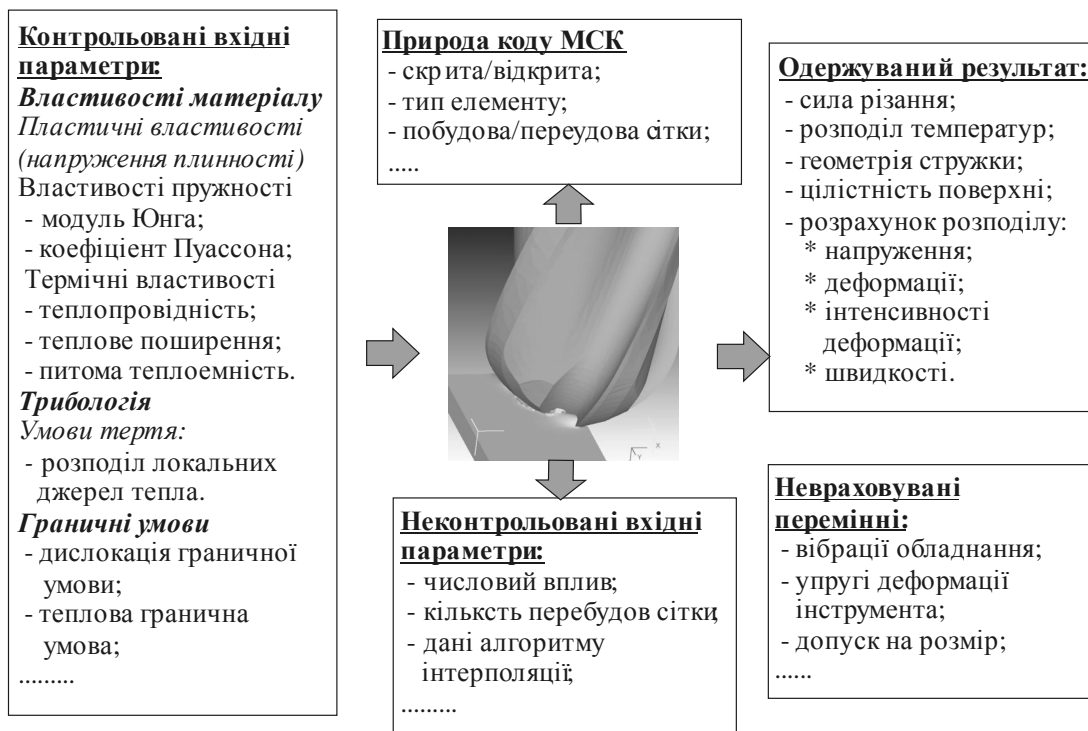


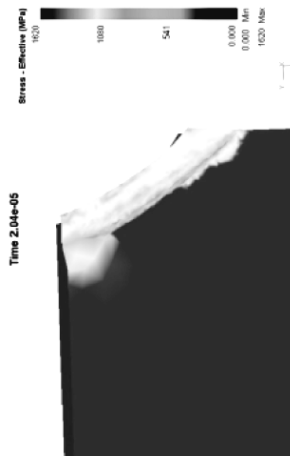
Рис. 4. Моделювання процесу косокутного різання загартованої сталі в середовищі 3D

Глибину порушеного шару матеріалу досліджуваного зразка оцінювали за результатами візуалізації розподілу деформацій матеріалу і графічного зображення їх розподілу під час ВШФ. Отримані результати враховували, визначаючи діапазон існування технологічних режимів для ВШФ (рис. 5).

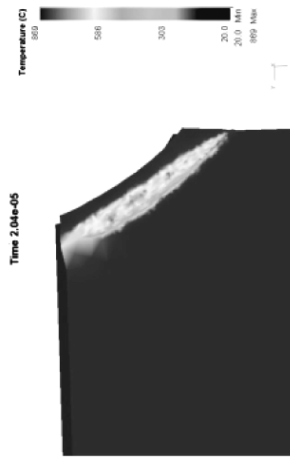
Порівнявши результати комп'ютерного моделювання прямокутного та косокутного різання, бачимо, що температури при косокутному різанні значно нижчі, ніж при ортогональному. При останньому мають місце фазові перетворення, а при косокутному їх немає. Це дозволяє стверджувати, що косокутне ВШФ дасть змогу уникнути відпускання матеріалів під час оброблення і появи несприятливих структурних характеристик в порушено-деформованому шарі (рис. 5).

З погляду технології машинобудування це дає змогу забезпечити стабільну дислокаційну природу накопичення пошкоджуваності матеріалу, і під час оброблення, і під час експлуатації виробу. Такий результат може бути прийнятий за критерій зносостійкості оброблених поверхонь.

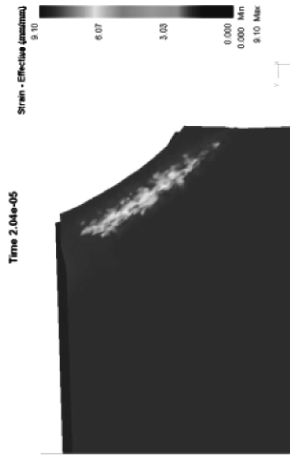
Елори розподілу напружень



Елори розподілу температур



Елори розподілу деформацій



Елори розподілу швидкостей деформації

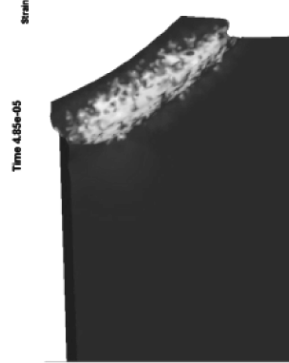
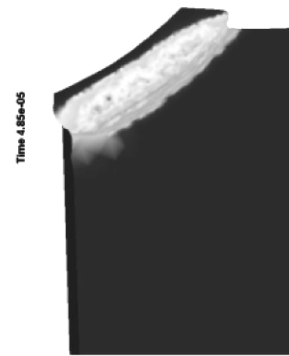
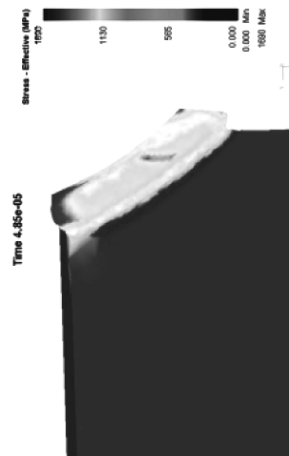
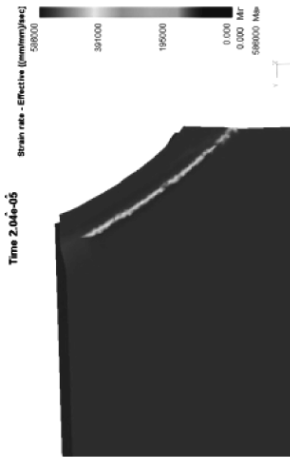


Рис. 5. Результати моделювання технологічного процесу косокутного ВШФ загартованої сталі

Висновки

У результаті аналізу сучасних можливостей технологій в машинобудуванні ми визначили, що проектування та комп'ютерне моделювання технологічних процесів механооброблення є невід'ємним етапом створення якісної продукції. Комп'ютерне моделювання дає змогу 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 оброблення деталі на етапі планування технологічного процесу виготовлення виробу, що дає змогу виключити етапи відпрацювання режимів в умовах виробництва, а, отже, і зменшити собівартість продукції.

1. Басова Е. В. *Технологическое обеспечение качества и точности поверхностей деталей из закаленных хромомолибденовых сталей методом высокоскоростного фрезерования: дисм. ... 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. – P.192–198.

4. Nakayama K. *Machining characteristic of hard materials. CIRP Annals / K. Nakayama, M. Arai, T. Kanda // Manufacturing Technology.* – 1988. – № 37(1). – P. 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). – P. 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). – P. 25–30.

6. Доротворский С. С. *Повышение конкурентоспособности отечественного машиностроительного производства в современных условиях / С. С. Добротворский, Е. В. Басова, Л. Г. Добровольская // Вісник НТУ “ХП”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні.* – Харків: НТУ“ХП”, 2014. – № 42(1085). – С. 25–31.

7. Добротворский С. С. *Энергетический подход к определению технологических режимов при высокоскоростной обработке / С. С. Добротворский, А. К. Мялица, Е. В. Басова, Л. Г. Добровольская и др. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии.* – Х.: НАУ “ХАИ”, 2014. – № 65.