

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«Київський політехнічний інститут»

**Некрасов Сергій Сергійович**

УДК 621.914.025.7:621.914.1 (043.3)

**Підвищення ресурсу твердосплавних  
кінцевих фрез при обробці ливарних сталей  
аустенітного класу**

Спеціальність 05.03.01 – процеси механічної обробки,  
верстати та інструменти

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

- Науковий керівник      доктор технічних наук, професор  
**Залога Вільям Олександрович**,  
Сумський державний університет,  
завідувач кафедри технології машинобудування,  
верстатів та інструментів
- Офіційні опоненти:      доктор технічних наук, професор  
**Мазур Микола Петрович**  
Технологічного університету Поділля  
завідувач кафедри технології машинобудування;
- кандидат технічних наук, старший викладач  
**Вовк В'ячеслав Володимирович**  
заступник завідуючого кафедри інтегрованих  
технологій машинобудування з наукової роботи  
Національного університету України «Київський  
політехнічний інститут»

Захист дисертації відбудеться “29” травня 2012 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.11 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37, корпус 1, ауд. 214.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» за адресою: м. Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий “28” квітня 2012 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
доктор технічних наук, професор



Майборода В.С.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Конструкційні матеріали з особливими властивостями все ширше застосовуються в сучасних машинах, забезпечуючи їх нові технічні характеристики та створюючи конструкторам нові можливості. Разом з тим механічне оброблення таких матеріалів усе ще складне: продуктивність різання матеріалів з особливими властивостями в декілька разів менша за продуктивність різання традиційних конструкційних матеріалів.

Застосування в конструкціях насосів ливарної сталі аустенітного класу забезпечує істотне збільшення ресурсу цих машин. Проте, враховуючи складність механічного оброблення та високу вартість матеріалу, ці сталі застосовуються досить рідко, наприклад, у разі використання в особливо агресивних середовищах, де інші матеріали зовсім не працюють. Вузьким місцем у технологічних процесах є операції кінцевого фрезерування заготовок, отриманих литтям, оскільки стійкість інструмента надто низька. Навіть сучасний твердосплавний різальний інструмент при обробці таких заготовок, незважаючи на весь комплекс робіт з оптимізації його геометрії, хоча й дозволяє проводити обробку з бажаною продуктивністю, але не забезпечує економічно обґрунтований ресурс.

Особливі властивості ливарних сталей аустенітного класу сприяють інтенсивному викрашуванню різальної кромки навіть у тих умовах і тим інструментом, який задовільно обробляє заготовки з нержавіючих сталей аустенітного класу, отриманих із прокату. У зв'язку з цим виникає необхідність зміцнення різальної кромки фрези шляхом вибору раціональної величини радіуса округлення різальної кромки. Разом з тим для фрез, що застосовуються для обробки ливарних сталей аустенітного класу, існуючі рекомендації не забезпечують потрібного ефекту. У зв'язку з цим виявлення механізмів втрати працездатності фрез під час роботи за вказаних умов і розроблення рекомендацій з підготовки різальних кромок, які забезпечують підвищення їх ресурсу, є актуальним завданням.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана на кафедрі «Технологія машинобудування, верстати та інструменти» Сумського державного університету (СумДУ) в період з 2005 року до нинішнього часу в рамках щорічних держбюджетних робіт відповідно до тематичних планів СумДУ, затверджених Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України: «Розробка наукових основ оптимального проектування методів механічної обробки матеріалів і прогнозування їх вихідних показників на базі експериментально-теоретичних моделей нестационарних процесів різання» (№ ДР 0100U003217) та «Розробка наукових основ оптимізації процесів різання на основі їх комп'ютерного 3D-моделювання методом скінченних елементів» (№ ДР 0106U003234).

**Мета та завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення ресурсу твердосплавних кінцевих фрез при обробленні ливарних сталей аустенітного класу шляхом визначення методом моделювання процесу різання радіу-

са округлення різальної кромки фрези, який забезпечує найбільший ресурс інструмента.

Основні завдання полягають у такому:

- Виявити фактори, що призводять до зниження ресурсу твердосплавних кінцевих фрез при обробці ливарних сталей аустенітного класу;
- розробити методики отримання коефіцієнтів визначального рівняння та рівняння пластичності сталі 12Х18Н12М3ТЛ зі стандартних механічних випробувань на стиск при температурі до 600°C;
- розробити методику теоретичних досліджень процесу фрезерування ливарних сталей аустенітного класу, яка б дозволила оцінити контактні напруження, температуру, напруження у лезі, напруження у робочій частині фрези (серцевині) та область стійких режимів різання;
- теоретично та експериментально дослідити вплив стану різальної кромки, а саме радіуса округлення різальної кромки, на ресурс твердосплавних кінцевих фрез при фрезеруванні ливарних сталей аустенітного класу;
- розробити та перевірити практичні рекомендації з підвищення ресурсу твердосплавних кінцевих фрез при обробці ливарних сталей аустенітного класу.

**Об'єкт дослідження** – процес фрезерування твердосплавними кінцевими фрезами ливарних сталей аустенітного класу.

**Предмет дослідження** – стан різальної кромки твердосплавних кінцевих фрез при фрезеруванні ливарних сталей аустенітного класу.

**Методи дослідження.** Під час виконання дисертаційної роботи використовувалися сучасні методи модельних та натурних досліджень. Для дослідження контактних напружень, напружено-деформованого та теплового стану в системі різання використовувався метод скінченних елементів, реалізований у програмі LS-DYNA. Отримання коефіцієнтів визначального рівняння та рівняння пластичності виконане за допомогою модернізованої машини УМЕ-10ТМ для дослідів на розтяг-стиск за нормальних та підвищених температур. Визначення трибологічних властивостей відбувалося методом удавлювання сферичного індентора по жорсткій схемі навантаження. Дослідження стану різальної кромки та вимірювання радіуса її округлення проводилось з використанням растрового електронного мікроскопа РЕМ-100У. Експериментальні дослідження процесу фрезерування проводилися на вертикально-фрезерному верстаті 6Н13Ф3 із системою ЧПК WL4М із застосуванням динамометра УДМ-600 та тензометричного підсилювача LTR-212.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Набула подальшого розвитку термомеханічна 2D-модель процесу різання округленим лезом шляхом урахування впливу неперервної зміни товщини зрізу та пружних деформацій в об'ємі леза, що дозволило спрогнозувати напружено-деформований і тепловий стан та коефіцієнт запасу міцності в небезпечних точках леза, а також оцінити динамічну стійкість процесу фрезерування.

2. Уперше зі стандартних механічних випробувань на стиск отримані коефіцієнти визначального рівняння та рівняння пластичності сталі 12Х18Н12М3ТЛ в умовах стиску при температурі до 600<sup>0</sup>С. Уточнено дані про міцність адгезійних зв'язків та їх здатність до зміцнення під час тертя сталі 12Х18Н12М3ТЛ у парі з інструментальним матеріалом ВК8.

3. Уперше теоретично встановлено та отримало експериментальне підтвердження, що стан різальної кромки при фрезеруванні ливарних сталей аустенітного класу змінюється ступінчасто внаслідок періодичного втомного руйнування різальної кромки, що зумовлене дією циклічних знакозмінних навантажень.

4. Уперше доведена та підтверджена експериментально залежність ресурсу твердосплавних кінцевих фрез від початкового значення радіуса округлення різальної кромки, сформованого на відповідному етапі доведення різального інструмента до робочого стану, відповідно до заданих умов оброблення.

5. Набула подальшого розвитку концепція прогнозування показників робочого процесу в заданих умовах, у тому числі вигляду, форми та розмірів стружки при кінцевому фрезеруванні, яка передбачає моделювання методом скінченних елементів процесу стружкоутворення, виходячи з фундаментальних законів та рівнянь у загальному вигляді в прямокутній декартовій системі координат.

**Практичне значення отриманих результатів** у машинобудівній галузі полягає в модернізації машини УМЕ – 10ТМ та розробленні методики визначення коефіцієнтів визначального рівняння та рівняння пластичності матеріалу при підвищених температурах в умовах стиску, розробленні рекомендацій з вибору радіуса округлення різальної кромки твердосплавних кінцевих фрез в умовах фрезерування ливарних сталей аустенітного класу.

Результати досліджень упроваджені на ПАТ «Сумський завод «Насосенергомаш» (м. Суми) та використовувалися під час виконання робіт у лабораторії високопродуктивних методів обробки різанням Сумського державного університету з обробки дифузорних каналів апаратів направляючих, що дозволило скоротити основний час на операцію в 1,8 раза.

Результати роботи використовувалися під час виконання робіт за договором із ТОВ НВП «Насостехкомплект» у лабораторії високопродуктивних методів обробки різанням Сумського державного університету з фрезерування вікон пружних елементів, при цьому основний час на операцію скоротився в 2,2 раза.

Результати дисертаційної роботи використані в навчальному процесі кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів СумДУ в курсі «Теорія різання», а також під час виконання курсових та дипломних робіт.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Серед них: визначення полів напружень та температур в об'ємі леза та на контактних поверхнях, отримані методом мо-

делювання за 2D- та 3D-моделями процесу різання округлим лезом зі змінною товщиною зрізу, встановлення механізму зміни стану різальної кромки в процесі різання, отримання коефіцієнтів визначального рівняння та рівняння пластичності, а також трибологічних властивостей сталі 12X18H12M3TЛ, встановлення залежності раціонального початкового радіуса округлення різальної кромки від режимів різання. Постановка завдань, модельні й експериментальні дослідження та аналіз результатів проведені автором спільно з науковим керівником та частково зі співавторами публікацій.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертації доповідалися та обговорювалися на VI, VIII та IX Всеукраїнських конференціях «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї - наука - виробництво» (м. Хмельницький, 2006 р., м. Луцьк, 2008 р., м. Запоріжжя, 2009 р.); науково-технічних конференціях викладачів, співробітників та студентів інженерного факультету СумДУ (м. Суми, 2007 р.); науково-технічних конференціях викладачів, співробітників та студентів факультету технічних систем та енергозберігаючих технологій СумДУ (м. Суми, 2009 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 11 роботах, з них 6 статей у наукових спеціалізованих виданнях України, затверджених переліком ВАК України, та 5 тез доповідей на науково-технічних конференціях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, додатків та переліку використаних джерел. Повний обсяг дисертації - 167 сторінок, у тому числі 74 рисунки, 10 таблиць, 5 додатків на 11 сторінках, перелік використаних джерел зі 120 найменувань на 11 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* обґрунтовано актуальність та доцільність дисертації, сформульовані мета і завдання, визначено об'єкт, предмет та методи дослідження, наукову новизну та практичну цінність роботи.

У *першому розділі* розглянуті проблеми, що пов'язані з обробленням сталей аустенітного класу.

Питанням підвищення ефективності оброблення присвячені праці Ю. М. Барона, Б. Ф. Боброва, А. С. Верещаки, Ю. М. Внукова, Г. І. Грановського, Я. Л. Гуревича, А. М. Данієляна, Ю. М. Жукова, В. О. Залого, М. М. Зорева, Ю. Г. Кабалдіна, М. І. Клушина, В. О. Кривоухова, С. А. Крижанівського, В. С. Кушнера, Т. М. Лоладзе, М. П. Мазура, А. Д. Макарова, В. О. Остаф'єва, В. І. Подураєва, М. Ф. Полетики, Н. С. Равської, А. Н. Резнікова, О. М. Розенберга, Ю. О. Розенберга, О. О. Розенберга, С. С. Силіна, М. В. Талантова, І. П. Третьякова, М. Х. Утшева, Г. Л. Хаєта, Л. Ш. Шустера та ін., зокрема, питанням підвищення ефективності оброблення кінцевими фрезами - Ю. М. Барона, С. А. Крижанівського, А. Д. Макарова, В. І. Подураєва, Н. С. Равської. Оброблюваність ливарних сталей аустенітного класу фрагментарно описана у працях Я. Л. Гуревича, А. М. Данієляна, В. А. Кривоухова, А. Д. Макарова, В. І. Подураєва та ін.

Оброблюваність різанням є технологічною характеристикою матеріалу, яка визначається комплексом його фізико-механічних властивостей. При механічному обробленні оброблюваність матеріалу, як правило, визначають такими критеріями: інтенсивністю зношування інструмента, що характеризується допустимою швидкістю різання, величинами сил та температури різання, які виникають у процесі оброблення, а також якістю обробленої поверхні. Ці критерії залежать від матеріалу та його хімічного складу, способу отримання заготовки, режиму її термообробки, які визначають структуру та механічні властивості. Оброблюваність різанням даного матеріалу залежить також від застосованого способу різання.

Ливарні сталі аустенітного класу знаходять широке застосування для виготовлення деталей, які працюють в умовах великих навантажень при температурах до 900 – 1000°C. Незважаючи на те, що за своїм призначенням, хімічним складом та рядом механічних властивостей ливарні сталі аустенітного класу близькі до деформованих нержавіючих сталей, отриманих методом прокатки, хоча за здатністю до оброблення різанням вони істотно відрізняються від них. Різниця в здатності до оброблення ливарних та деформованих сталей аустенітного класу пояснюється тим, що, з одного боку, ливарні сталі менш в'язкі, зусилля різання при їх обробленні значно нижчі, ніж при обробленні деформованих сталей, що полегшує їх оброблення. Разом з тим у ливарних нержавіючих сталях є велика кількість інтерметалідних та карбідних включень, які інтенсифікують зношування різального інструмента. Цей фактор має перевагу над попереднім, що істотно погіршує їх оброблюваність.

Дослідженню закономірностей зношування інструментів, розробленню та призначенню критеріїв відмов різальних інструментів при обробленні ливарних сталей аустенітного класу присвячена велика кількість робіт. Встановлено, що залежно від умов роботи, властивостей матеріалів інструмента й деталі зміна характеристик зношування відбувається неоднаково. При обробленні більшості сталей аустенітного класу зношування твердого сплаву залежно від зони температур спостерігаються адгезійний, дифузійний або, частіше за все, змішаний характер. Дослідження Т. М. Лоладзе, Г. Л. Хаєта, В. І. Подураєва, А. Д. Макарова, Л. Ш. Шустера, Е. В. Артамонова та ін. показали, що початкове зношування твердого сплаву має крихко-втомний характер.

Питання впливу радіуса округлення різальної кромки на показники процесу різання також вивчались у багатьох роботах. Достатньо широкий огляд представлений у роботі С. Rodriguez, де показано, що від стану різальних кромок лез різального інструмента залежать сили та потужність різання, якість оброблених поверхонь деталей, температура різання, стійкість різального інструмента та його ресурс.

Незважаючи на збільшення сили різання зі збільшенням  $r$ , що супроводжується зменшенням  $a/r$  при  $a = \text{const}$  у роботах Г. Л. Хаєта, Д. В. Криворучка показано, що контактні напруження та напруження у різальному лезі зменшуються, збільшуючи запас його міцності. Такий прийом зміцнення лез досить широко застосовується на практиці для різноманітних інструментів,

забезпечуючи значне збільшення їх стійкості. Істотний вплив величини радіуса округлення різальної кромки на стійкість інструмента робить актуальним вирішення завдання про пошук раціональної величини цього параметра на початку різання - початкового радіуса округлення різальної кромки  $r_0$ .

У *другому розділі* розроблена методика теоретичних досліджень впливу початкового радіуса округлення різальної кромки на працездатність твердосплавних кінцевих фрез.

Дослідження впливу стану різальної кромки на працездатність твердосплавних кінцевих фрез передбачає отримання результатів моделювання за основними видами відмов: за інтенсивністю зношування, за напруженнями у лезі, які можуть спричинити викришування різальної кромки, за напруженнями у робочій частині фрези, за динамічною стабільністю обробки (рис. 1).

Кожне дослідження виконувалося в два етапи (за класифікацією Д. В. Криворучка): 2D- моделювання на рівні деталізації «Лезо» і 3D- моделювання на рівні деталізації «Інструмент».

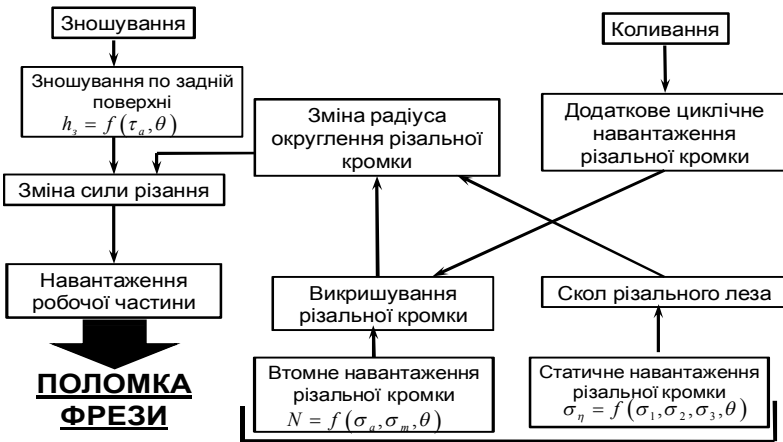


Рис. 1 – Відмови кінцевих фрез та їх залежний вплив

Для розрахунку відповідних напружень та температур у різальному лезі кінцевої фрези використана її 2D - реалізація. Процес кінцевого фрезерування представляється ідеалізованим у вигляді прямокутного вільного різання з товщиною зрізу, що змінюється від нульового значення до величини подачі на зубець фрези  $S_z$  (рис. 2). Розглядаючи випадок зустрічного різання з глибиною різання, що дорівнює половині діаметра фрези (рис. 2 а), різуваний шар був представлений шаром товщиною зрізу  $a_z$ , безперервно зростаючою від 0 до її максимальної величини в кінці циклу, яка дорівнює подачі на зубець фрези  $a_{z \max} = S_z$  (рис. 2 б).



Ця розрахункова схема була реалізована граничними умовами, які представлені жорстким закріпленням основи початково прямокутної заготовки (рис. 3). Навантаження прикладалися до інструмента його переміщенням зі швидкістю різання у напрямку ( $-Z$ ) і переміщенням, яке дорівнювало величині подачі на зубець фрези  $S_z$ , на довжині шляху різання  $L$  у напрямку ( $-Y$ ).

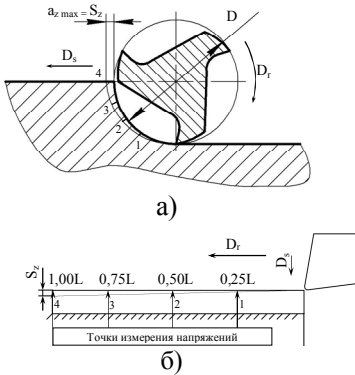


Рис. 2 – Розрахункова схема

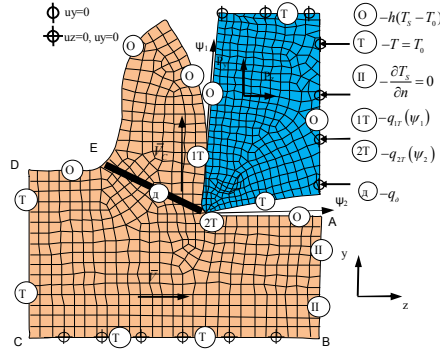


Рис. 3 – Граничні умови

Для розрахунку напружень у робочій частині фрези запропоновано використовувати 3D-модель кінцевого фрезерування (рис. 4), що дозволяє поєднати модель стружкоутворення з пружною моделлю кінцевої фрези. Це дає можливість підвищити достовірність розподілу навантажень, що прикладаються до системи оброблення та напружень у робочій частині фрези.

У цьому випадку заготовка жорстко закріплена по всій поверхні, протилежній оброблюваній поверхні (див. рис. 4). Для інструмента задаються обмеження переміщень його базових поверхонь. Граничні умови на вільних поверхнях при розв'язанні теплової задачі задаються як умова теплообміну з навколишнім середовищем відповідно до закону Ньютона-Ріхмана.

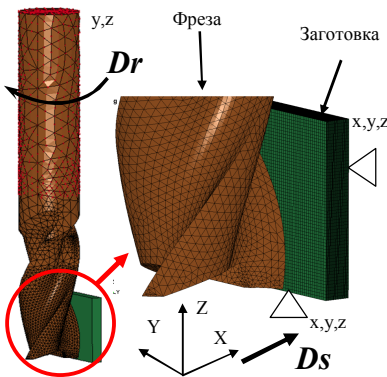


Рис. 4 – Розрахункова схема та граничні умови 3D - моделі кінцевого фрезерування

Початкові умови для циліндричної частини кінцевої фрези задаються обертанням навколо її осі та переміщенням у напрямку руху подачі  $D_s$ . При розв'язанні теплової задачі задавалося початкове температурне поле для заготовки інструмента у вигляді рівномірної температури, що дорівнювала кімнатній.

Область вібростійкості процесу кінцевого фрезерування округлим лезом запропоновано оцінювати на основі аналізу стійкості характеристичного рівняння методом D-розбиття. На відміну від відомих рішень вплив округлення різальної кромки запропоновано враховувати шляхом імплементації в алгоритм розрахунку діаграми стійкості нелінійної залежності сили різання від товщини зрізу при малих значеннях  $a/\rho_0$ .

**Третій розділ** присвячений експериментальному дослідженню механічних та трибологічних властивостей ливарних сталей аустенітного класу.

Для визначеності в роботі була обрана сталь аустенітного класу 12X18H12M3ТЛ, отримана методом лиття. Було встановлено, що при випробуваннях на розтягування сталь 12X18H12M3ТЛ поводить себе як квазікрихкий матеріал, що руйнується при невеликих значеннях деформації без утворення шийки. У той же самий час під час проведення випробувань на стиск ця сталь поводить себе як високопластичний матеріал, досягаючи високих значень деформацій, характерних для процесу різання, не руйнуючись. Разом з тим стандартні випробування матеріалу на стиск за методикою ГОСТ 25.503-97 не дозволяють отримати дані про поведінку сталі при підвищених температурах, оскільки неможливо врахувати сили тертя на торцях зразка у процесі його деформування. Для проведення випробувань на стиск машина УМЕ-10Т була оснащена спеціальними тврдосплавними опорами (рис. 5).

Унаслідок того, що коефіцієнт тертя між торцями зразка та опорами був більшим за нуль, при стисненні у випробуваному зразку виникає складний напружено-деформований стан, тому зразок і змінює форму на бочкоподібну (рис. 6 б). Для компенсації нерівномірного розподілу напружень у поперечному перерізі зразка по його висоті  $H_1$  необхідне розроблення спеціальної методики для обробки індикаторної діаграми та визначення коефіцієнтів визначального рівняння.

Ідея розробленої методики полягає в тому, що результати експерименту порівнюються з результатами моделювання випробувань методом скінченних елементів в аналогічних умовах з різноманітними коефіцієнтами тертя, і за формою зразка роблять висновки про коефіцієнт тертя, який спостерігається на торцях зразка. Для опису процесів, які проходять при стисненні зразка, проводилося моделювання процесу стиснення стандартного

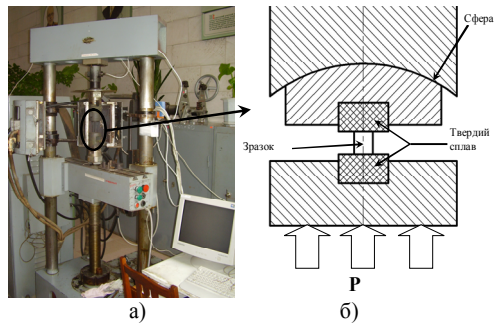


Рис. 5 – Експериментальна установка для проведення випробувань на розтягування-стиск (а) та схема захватів (б)

циліндричного зразка типу III, що відповідає ГОСТ 25.503-97, методом скінченних елементів. Цей тип зразка застосовується у відповідно до ГОСТ 25.503-97 для визначення фізичної межі текучості, умовної межі текучості, побудови кривої зміцнення до значень логарифмічних деформацій.

З віртуального експерименту на стиснення було встановлено, що середній коефіцієнт тертя на торцях зразка, що стискається, впливає на максимальний діаметр бочки, який, у свою чергу, також залежить від ступеня пластичної деформації зразка (рис. 6).

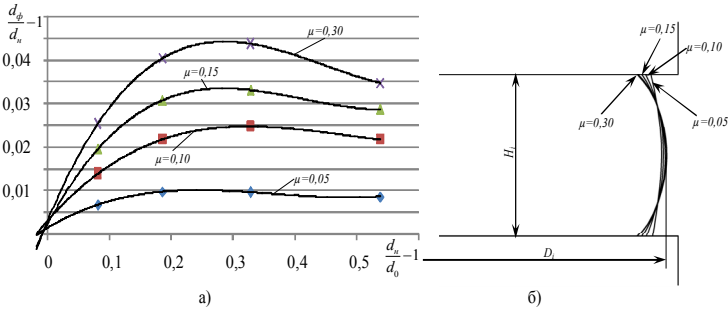


Рис. 6 – Вплив номінального діаметра  $d_n$  зразка, що стискається, на його фактичний діаметр  $d_\phi$  при різних коефіцієнтах тертя  $\mu$  (а) та вплив коефіцієнта тертя на форму бокової поверхні стисненого зразка (б)

Відповідно до запропонованої методики отримане визначальне рівняння сталі 12X18H12M3ТЛ, яке може бути описане рівнянням Джонсона-Кука:

$$\sigma_s(\bar{\varepsilon}^p, \dot{\varepsilon}^p, T) = \left(0,105 + 1,390(\bar{\varepsilon}^p)^{0,642}\right) \left(1 + 0,01 \cdot \ln(\dot{\varepsilon}^p / \dot{\varepsilon}_0^p)\right) (1 - T^{*0,517}),$$

де  $\sigma_s$  – істинне напруження;  $\varepsilon^p$  – пластична деформація;  $\dot{\varepsilon}^p$  – швидкість пластичної деформації;  $T^*$  – гомологічна температура.

Рівняння пластичності

$$\bar{\varepsilon}_f^p = (1,15 \exp(-0,1\sigma^*)) (1 - 0,015 \ln \dot{\varepsilon}^p) (1 - 0,5T^*),$$

$$\sigma^* = p / \sigma_s, T^* = (T - T_0) / (T_{пл} - T_0),$$

де  $T$  – поточна температура;  $T_0$  – початкова температура;  $T_{пл}$  – температура плавлення.

Довірчий інтервал при 5% рівні значущості представлених виразів не більше 10% від розрахованої величини. Порівняно з аустенітною сталлю 12X18H10Т (прокат) для

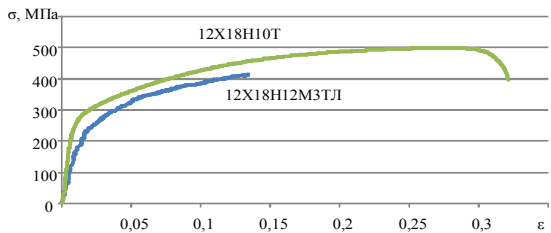


Рис. 7 – Діаграми розтягання

досліджуваної сталі при випробуванні на розтягування характерні малі деформації руйнування (рис. 7) та більші деформації до настання руйнування при стисненні.

Трибологічні властивості ливарної сталі 12X18H12M3TЛ визначались у парі з твердим сплавом ВК8, який є рекомендованим для оброблення ливарних сталей аустенітного класу. Адгезійна складова зовнішнього тертя визначалася методом удавлювання сферичного індентора з твердого сплаву ВК8 у плоский зразок з досліджуваної сталі за жорсткою системою навантаження відповідно до методики, запропонованої Д. В. Криворучком. У результаті проведених експериментів визначені такі параметри моделі адгезійної складової сили тертя в парі 12X18H12M3TЛ – ВК8:  $\tau_0=0$ ,  $\beta_0=0,55$ , довірчий інтервал при ймовірності 0,95 становив 40 МПа для нормальних напружень та 7 МПа для дотичних напружень.

У *четвертому розділі* проведені дослідження впливу стану різальної кромки на працездатність суцільних твердосплавних кінцевих фрез.

Інтенсивність зношування оцінювалася залежностями, які представлені в роботах А. Д. Макарова, на основі розрахованих у модельних експериментах контактних напружень та температур (рис. 8). Результати розрахунків за цією методикою показали, що зі збільшенням радіуса округлення різальної кромки зростають сили різання й одночасно збільшується площа контакту поверхонь різальної кромки зі зрізуваним шаром. Дія першого фактора супроводжується збільшенням дотичних напружень, а другого - зменшенням. При малих  $\rho$  при визначенні контактних напружень превалює фактор зменшення сил різання, а при великих  $\rho$  – фактор збільшення площі контакту. Саме тому залежність  $\tau - \rho$  має екстремум (рис. 8 а). Отримана залежність інтенсивності зношування від радіуса округлення різальної кромки (рис. 8 в) показує, що зі збільшенням  $\rho$  у межах від 5 до 20 мкм інтенсивність зношування зростає, що обумовлено підвищенням температури різання (рис. 8 б). У діапазоні  $\rho$  від 20 до 40 мкм інтенсивність зношування майже не змінюється, залишаючись на достатньо високому рівні, тобто стабілізується за рахунок зменшення дотичних напружень (рис. 8 а).

Виходячи з умов статичної міцності, встановлено, що загальною тенденцією для всіх значень радіусів округлення різальної кромки  $\rho$ , що досліджуються, є зростання еквівалентних напружень у різальному лезі впродовж усього циклу різання зі збільшенням товщини зрізу. Це зростання стабілізується в останній чверті циклу різання зуба (див. рис. 2). З отриманих даних про величину еквівалентних напружень встановлено, що у леза з радіусом округлення різальної кромки  $\rho=5$  мкм напруження перевищують гранично допустимі значення. Доведено, що в циклі різання амплітуда напружень перевищує граничні величини саме в шарах, які стискаються. Це сприяє накопиченню в них достатніх для руйнування пошкоджень (мікро- та субмікrorіщин). Тому прийнято припущення, що найбільш імовірною межею руйнування леза є межа найбільших значень мінімальних головних напружень  $\sigma_3$ .

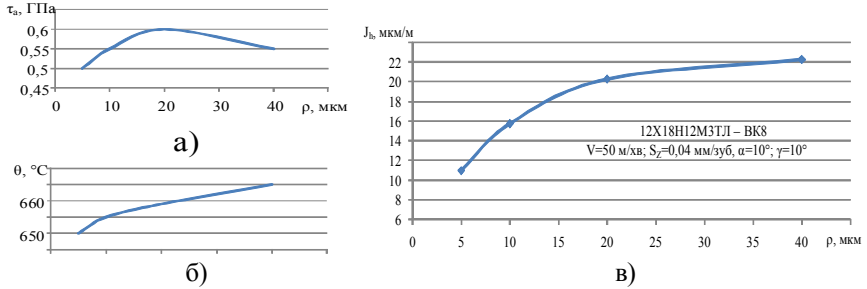


Рис. 8 – Вплив радіуса округлення різальної кромки на дотичні напруження (а), температуру різання (б) та інтенсивність зношування (в)

Обробка результатів моделювання показує, що поверхня різальної кромки, яка формується у процесі руйнування леза, буде мати радіус округлення  $\rho_i$ , більший від початкового радіуса різальної кромки  $\rho_0$  (рис. 9). Для даного твердого сплаву BK8 відношення  $\rho_i / \rho_0$  у середньому знаходиться в межах 3-4. Цей ефект спостерігається для лез із початковим радіусом округлення  $\rho_0 > 10 \mu\text{m}$ . При менших початкових радіусах  $\rho_0$  величина  $\rho_i$  практично не залежить від  $\rho_0$ .

Була розрахована сумарна кількість циклів до досягнення граничного радіуса округлення різальної кромки для лез із різним початковим радіусом округлення різальної кромки  $\rho_0$  (рис. 9).

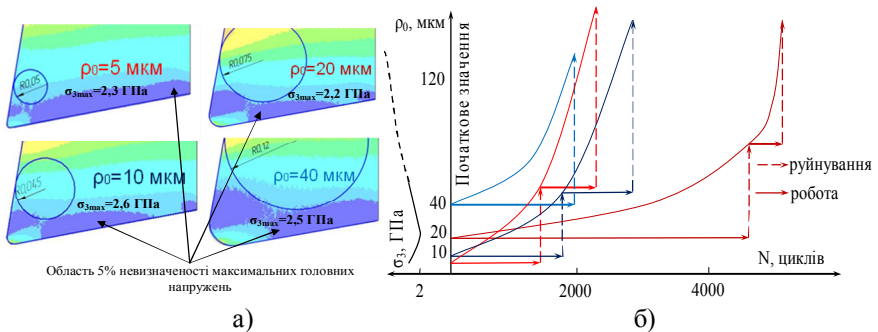


Рис. 9 – Зміна радіуса округлення різальної кромки  $\rho_i$  залежно від його початкової величини  $\rho_0$  та кількості циклів різання при заданих умовах

Експериментальні дослідження зміни радіуса округлення різальної кромки у процесі різання проводилися на вертикально-фрезерному верстаті 6Н13Ф3 із системою ЧПК WL4M (рис. 10б). Використовувалася фреза Guehring3677 діаметром 16 мм. Матеріал інструмента DK460UF (однокарбідний твердий сплав, WC-Co 10%, розмір зерна карбіду 0,5  $\mu\text{m}$ ). Здійснюва-

лась обробка ливарної сталі аустенітного класу 12X18Н12М3ТЛ. Режим різання відповідав режиму, рекомендованому виробником:  $V=50$  м/хв,  $S_z=0,04$  мм/зуб,  $n=1000$  об/хв. Ширина фрезерування була обрана  $B=5$  мм, що забезпечило вібростійке фрезерування. Початковий радіус округлення різальної кромки становив 4,2 мкм.

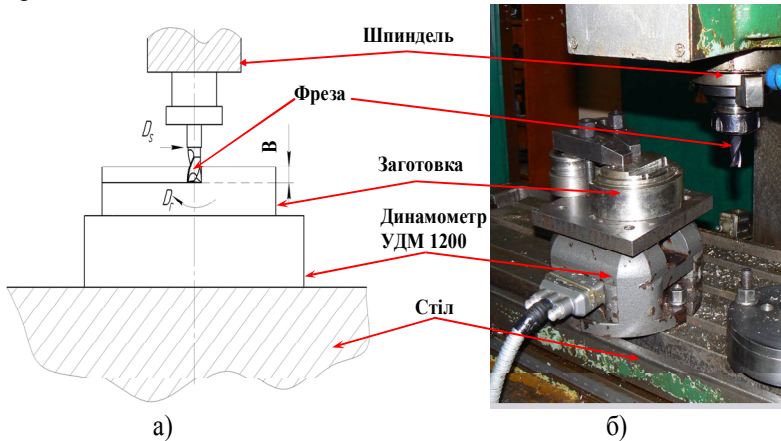


Рис. 10 – Налаштування верстата 6Н13Ф3 в експериментальних дослідженнях

Результати вимірювань показують, що радіус округлення різальної кромки безперервно ступінчато збільшується (рис. 11), причому після миттєвого зростання спостерігається повільне рівномірне зменшення радіуса різальної кромки.

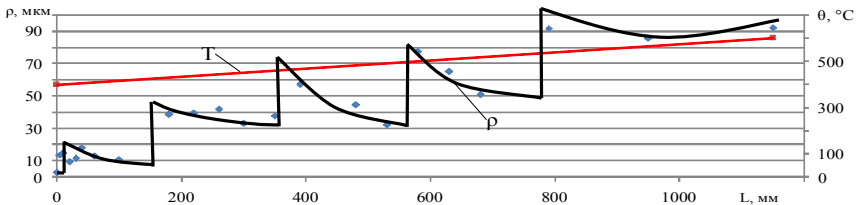


Рис. 11 – Зміна радіуса округлення різальної кромки  $\rho$  фрези Guehring 3677 діаметром 16мм залежно від пройденого шляху різання при фрезеруванні сталі 12X18Н12М3ТЛ:  $n=1000$  об/хв,  $S_z=0,04$  мм/зуб,  $B=5$  мм

На наш погляд, це явище свідчить про те, що дрібнозернистий твердий сплав має високу зносостійкість, який і забезпечує постійність фаски зношування на задній поверхні після закінчення періоду припрацювання з новим  $\rho$  впродовж деякого відносно тривалого часу різання. Поряд зі зростанням інтенсивності зношування, що спостерігається, відбувається зміна радіуса округлення різальної кромки, особливо у початковий період її роботи. Таку зміну  $\rho$ , в першу чергу, можна пояснити викришуванням різальної кромки. В результаті подальшого зношування леза відбувається адаптація поверхні різальної кромки до умов, що склалися на даний момент різання. Подальше

накопичення пошкоджень у поверхні різальної кромки призводить до подальших сколів і відповідно збільшення радіуса округлення різальної кромки, виведення системи з рівноваги та її поступової адаптації до нових умов, що відповідають новому значенню  $\rho$ .

Результати проведених досліджень дозволили виявити вплив процесів зношування на задній поверхні статичного та втомного руйнування різальної кромки, руйнування робочої частини та стійкості процесу фрезерування на початкову величину радіуса округлення різальної кромки  $\rho_0$  при незмінних режимах різання (рис. 12).

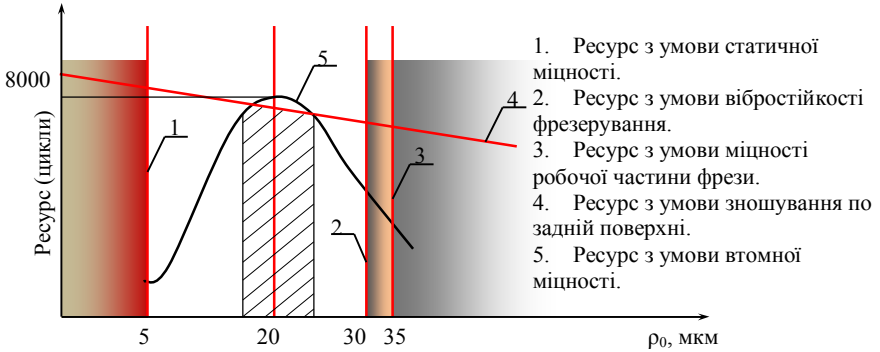


Рис. 12 – Вплив різноманітних факторів на ресурс твёрдосплавних кінцевих фрез

Для заданих умов оброблення відповідно до статичної міцності різальної кромки встановлено, що початковий радіус округлення різальної кромки не повинен бути меншим 5 мкм: при менших значеннях радіуса округлення виникають великі еквівалентні напруження в лезі біля різальної кромки, що призводять до її швидкого сколювання. З умов міцності робочої частини фрези встановлено, що для заданих умов оброблення максимально допустимий радіус округлення не повинен перевищувати  $\rho_{\max} = 35$  мкм. При збільшенні  $\rho_{\max}$  відбувається збільшення результуючої сили різання до значень, при яких не буде дотримуватися умова міцності робочої частини кінцевої фрези. Аналіз вібростійкості процесу фрезерування показав, що при значеннях радіуса округлення різальної кромки, що перевищує 30 мкм, процес кінцевого фрезерування фрезою діаметром 16 мм із шириною стійкого фрезерування менше діаметра фрези стає нестійким. Проведені дослідження втомної міцності різального леза виявили екстремальний вплив величини початкового радіуса округлення різальної кромки  $\rho_0$  на ресурс леза із максимумом у заданих умовах, близьким до 20 мкм (заштрихована зона на рис. 12). Зі збільшенням  $\rho_0$  зростає інтенсивність зношування на задній поверхні за рахунок підвищення сил і температури різання, при цьому ресурс інструмента зменшується.

**П'ятий розділ** присвячено розробленню практичних рекомендацій щодо вибору початкового значення радіуса округлення різальної кромки  $\rho_0$ . Відповідно до запропонованої методики встановлена залежність радіуса округлення різальної кромки, який забезпечує максимальну працездатність кінцевої фрези, від швидкості різання та подачі при швидкості різання від 50 до 100 м/хв та подачі від 0,02 до 0,08 мм/зуб (рис. 13):

$$\rho_0 = 70 - 0,4V - 500S_z,$$

де  $V$  - швидкість різання, м/хв;  $S_z$  - подача на зуб  $z$ , мм/зуб;  $\rho_0$  - початковий радіус округлення різальної кромки, мкм.

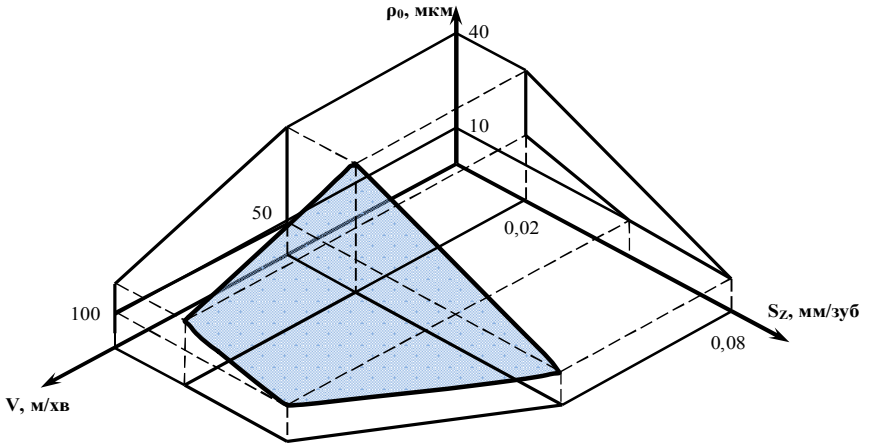


Рис. 13 – Вплив режимів різання на раціональний радіус округлення різальної кромки, що рекомендується для заточування різальної кромки

Наведену залежність можна використовувати для визначення рекомендованого початкового радіуса округлення різальної кромки  $\rho_0$ , а також для корекції режимів різання з урахуванням зміни радіуса округлення різальної кромки  $\rho$  у процесі фрезерування.

Для практичної перевірки впливу початкового радіуса округлення різальної кромки  $\rho_0$  на параметри працездатності твердосплавних кінцевих фрез при обробці ливарної сталі аустенітного класу було вибрано 3 фрези фірми Guehring діаметром 16 мм. Фрези були відібрані, виходячи з рекомендацій виробника для заданих умов обробки фрезерування пазів глибиною 32 мм та шириною 18 мм у відливках з ливарної сталі аустенітного класу. Метод отримання заготовки – лиття у піщано-глинисту форму.

Результати проведених досліджень показали, що для твердосплавних фрез при обробленні ливарної сталі аустенітного класу характерне викришування різальних кромки, особливо за наявності вібрацій. Про наявність чи



відсутність вібрацій свідчив рівень звукового тиску, який реєструвався у процесі різання.

Розглянуті фрези використовувалися з різними режимами різання, при цьому вони показали різну стійкість при однаковому початковому радіусі округлення різальної кромки. Різна стійкість розглянутих фрез, які мають однакові початкові радіуси округлення різальних кромки, можна пояснити тим, що стійкість фрез залежить від поєднання таких факторів, як радіус округлення різальної кромки та режим різання, тобто кожному значенню початкового радіуса  $\rho_0$  є відповідний йому режим різання.

Розроблені рекомендації дозволили обрати різальний інструмент із заданим станом його різальних кромки, який забезпечив підвищення продуктивності при кінцевому фрезеруванні дифузорних каналів у деталі «Апарат направляючий» зі сталі 12X18H12M3TЛ на ПАТ «Сумський завод «Насосенергомаш» (м. Суми).

Існуюча раніше технологія фрезерування дифузорних каналів фрезами з початковим радіусом різальної кромки  $\rho_0 = 4,2-4,3$  мкм (у стані поставки) не дозволяла виконувати оброблення в зв'язку з тим, що фрези не забезпечували стійкість, заявлену виробником фрез, тому більш економічно доцільним було використання швидкоріжучих фрез. Використання твердосплавних кінцевих фрез із початковим радіусом округлення різальної кромки, близьким до 20 мкм, дозволило скоротити час оброблення однієї заготовки до 9 годин за рахунок використання твердосплавних фрез.

Результати впровадження роботи на ПАТ «Сумський завод «Насосенергомаш» дозволили підвищити продуктивність фрезерування дифузорних каналів у виливках з ливарної сталі аустенітного класу 12X18H12M3TЛ порівняно з існуючою технологією в 1,8 рази.

Впровадження результатів роботи на ТОВ НВП «Насостехкомплект» дозволило скоротити основний час на операцію фрезерування дифузорних каналів у виливках з ливарної сталі аустенітного класу 12X18H12M3TЛ у 2,2 рази. Було повністю виключено поломку різальних кромки твердосплавних кінцевих фрез при фрезеруванні ливарних сталей аустенітного класу.

Результати роботи впроваджені в навчальний процес Сумського державного університету при читанні курсу лекцій з дисципліни «Теорія різання».

## **ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ**

У дисертаційній роботі вирішене науково-практичне завдання підвищення працездатності твердосплавних кінцевих фрез під час оброблення пазів у виливках з ливарної сталі аустенітного класу за рахунок вибору значення початкового радіуса округлення різальної кромки  $\rho_0$ , що забезпечує найбільший ресурс інструмента.

1. Отримала подальший розвиток модель процесу різання округленим лезом зі змінною товщиною зрізу за рахунок використання методу скінченних елементів для оцінки в часі полів напружень та температур на границі контакту та в об'ємі леза, а також розрахунку залежності сили різання від

товщини зрізу, що дозволило комплексно дослідити вплив радіусу округлення різальної кромки в процесі фрезерування на зношування та викришування лева, руйнування фрези в цілому та стійкість фрезерування.

2. Уперше в механічних випробуваннях на стиск використані твердо-сплавні опори та враховано вплив на форму зразка тертя на його торцях, що дозволило провести випробування на стиск при підвищених температурах, визначити визначальне рівняння та рівняння пластичності сталі 12X18H12M3TЛ та показати, що ця сталь порівняно з її деформованим аналогом 12X18H10T має подібну здатність до деформаційного зміщення та в 2 рази менші граничні пластичні деформації до руйнування при розтягуванні.

3. На основі трибологічних властивостей пари «ливарна нержавіюча сталь 12X18H12M3TЛ – твердий сплав ВК8» показано, що адгезійна активність ливарної та деформованої нержавіючих сталей близькі між собою, що дозволило використовувати відомі моделі тертя в розроблених скінченно-елементних моделях робочого процесу.

4. Уперше виявлено залежність ресурсу фрези при фрезеруванні нержавіючої сталі 12X18H12M3TЛ від радіуса округлення різальної кромки, отриманого після заточки та доводки інструменту – початкового радіусу округлення різальної кромки  $\rho_0$ . Це обумовлено переважанням при фрезеруванні цієї сталі викришування різальної кромки, що призводить до періодичного збільшення його радіусу округлення.

5. Розроблені та підтверджені експериментально рекомендації з вибору початкового радіусу округлення різальної кромки  $\rho_0$  для умов різання при кінцевому фрезеруванні сталі 12X18H12M3TЛ, який забезпечує найбільший ресурс інструменту при інших рівних умовах. Використання цих рекомендацій дозволяє скоротити час на впровадження у виробництво нових твердо-сплавних кінцевих фрез.

6. Впровадження результатів досліджень у виробництво для кінцевого фрезерування деталей з ливарних сталей аустенітного класу дозволило збільшити продуктивність обробки у 1,8 – 2,2 рази за рахунок повного виключення поломок різальних кромки фрез та збільшення режимів різання. Удосконалена методика проведення механічних випробувань на стиск може бути використана для визначення властивостей матеріалів, що проявляють крихкість при розтягуванні. Результати досліджень впроваджені в учбовий процес.

## **ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Некрасов С.С. Влияние модели обрабатываемого материала на точность прогнозирования показателей процесса прямоугольного резания методом конечных элементов [Текст] / Д. В. Криворучко, В. А. Залого, С. С. Некрасов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. -Haifa, 2007. -Вып., 2007. - № 4. -С. 115- 120. (Автором експериментально отримано коефіцієнти визначального рівняння оброблюваного різанням матеріалу, проведено порів-

няння вихідних показників процесу різання, отриманих з фізичного та модельного експериментів).

2. Криворучко Д. В. Скінченноелементна модель процесу різання. Підтвердження її адекватності експерименту [Текст] / В. О. Залога, Д. В. Криворучко, С. С. Некрасов // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. -Житомир: ЖІ-ПІ, 2007. -Вып. 5. -С. 60- 72. (Автор провів дослідження адекватності скінченноелементної моделі процесу різання, зробив висновки про адекватність моделі).

3. Криворучко Д. В. К вопросу о перспективах моделирования методом конечных элементов процесса разрушения обрабатываемого материала (трещинообразования) при резании [Текст]/ В. А. Залога, Д. В. Криворучко, С. С. Некрасов // Современные технологии в машиностроении. -Х.: НТУ «ХПИ», 2007. -С. 75- 86. (Автор показал можливі критерії моделювання процесу руйнування оброблюваного матеріалу різанням).

4. Залога В.О. Методика численной оценки показателей прочности обрабатываемого материала по его модели [Текст]/ В. А. Залога, Д. В. Криворучко, С. С. Некрасов //Компрессорное и энергетическое машиностроение. -Сумы: МИКЭМ, 2009. -Вып. 15. -№ 1. -С. 47- 51. (Автором доведена адекватність скінченноелементної моделі процесу різання).

5. Залога В.О. Методология экспериментального определения деформационной и адгезионной составляющих среднего коэффициента трения при резании [Текст] / В. О. Залога, Д. В. Криворучко, С. С. Некрасов //Нові технології в машинобудуванні: Вісник КНУ ім. Михайла Остроградського. -Кременчук: КНУ, 2010. -Вып. 6. -С. 63- 70. (Автором запропоновано варіант проведення експерименту визначення середнього коефіцієнта тертя).

6. Некрасов С.С. Об изменении состояния режущих кромок концевых фрез в процессе резания [Текст] / В. О. Залога, Д. В. Криворучко, С. С. Некрасов, Л. В. Голобородько // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. -Сумы: СумГУ, 2010. -№ 4. -С. 172- 181. (Автором встановлено характер зміни радіуса округлення різальної кромки кінцевої твердосплавної фрези у процесі різання).

7. Некрасов С.С. Методика экспериментального определения модели обрабатываемого материала [Текст]/ Д. В. Криворучко, С. С. Некрасов //Тезисы докладов Шестой всеукраинской научно-технической конференции "Машиностроение Украины глазами молодых: прогрессивные идеи - наука - производство". -Хмельницкий: ХНУ, 2006. -С. 61- 62. (Автором запропоновано варіант визначення коефіцієнтів визначального рівняння з експериментів на розтягування).

8. Некрасов С.С. Критерии пластического разрушения [Текст]/ С. С. Некрасов //Материалы научно-технической конференции преподавателей, сотрудников и студентов инженерного факультета. -Сумы: СумГУ, 2007. -С. 87- 88. (Автором проаналізовані відомі критерії пластичного руйнування оброблюваного матеріалу різанням).

9. Некрасов С.С. 3D моделирование методом конечных элементов процесса стружкообразования при точении [Текст]/ С. С. Некрасов // Прогрессивные

идеи - наука производство: сборник трудов Восьмой всеукраинской молодежной научно-технической конференции «Машиностроение Украины глазами молодых». -Наіфа: ЛНТУ, 2008. -С. 31- 32. *(Автором показана можливість 3D моделювання процесу стружкоутворення при точінні).*

10. Некрасов С. С. Исследование влияния радиуса округления режущей кромки на прочность лезвия при фрезеровании нержавеющей стали /С. С Некрасов // Прогресивні ідеї - наука - виробництво: збірник тез доповідей ІХ Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції «Машинобудування України очима молодих». -Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. -С. 64-66. *(Автором проведено дослідження впливу радіуса округлення різальної кромки на міцність леза кінцевої фрези).*

11. Некрасов С. С. Исследование влияния радиуса округления режущей кромки на прочность режущих кромок концевых фрез при обработке нержавеющей стали 12X18H12M3TЛ [Текст]/ С. С. Некрасов, Я. Ю. Николаев //Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій. - Суми: СумДУ, 2009. -С. 80- 81. *(Автором встановлено, що радіус округлення різальної кромки впливає на стійкість твердосплавних кінцевих фрез при фрезеруванні сталі 12X18H12M3TЛ).*

## АННОТАЦИЯ

Некрасов С.С. Повышение работоспособности твердосплавных концевых фрез при обработке литейных сталей аустенитного класса. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты. – Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев, 2012.

В диссертации представлено решение повышения работоспособности твердосплавных концевых фрез при обработке литейных сталей за счет определения начального радиуса округления режущей кромки, который обеспечивает наибольшую стойкость инструмента. Радиус округления режущей кромки определялся расчетным путем из имитационного моделирования процесса резания. Представленное решение учитывает усталостную и статическую прочность режущей кромки, интенсивность изнашивания, прочность рабочей части концевой фрезы и динамику фрезерования.

Предложено определять механические свойства обрабатываемого материала, необходимые для определения коэффициентов определяющего уравнения, из экспериментов по сжатию с воздействием повышенных температур, характерных для процесса резания. Такой подход предоставляет возможность определять механические свойства обрабатываемого материала в условиях, близких к процессу резания. Для задания исходных данных определены коэффициенты определяющего уравнения и уравнения пластичности стали 12X18H12M3TЛ и трибологические свойства стали 12X18H12M3TЛ в паре с инструментальным материалом ВК8.

Моделирование процесса резания, предложенное в 2D - постановке, учитывает изменение толщины срезаемого слоя, что характерно для процесса фрезерования. Такой подход позволяет определять показатели процесса резания в условиях нестационарного резания. Для сокращения времени расчета предложено выполнять моделирование в два подхода: сначала производится моделирование с абсолютно жестким инструментом и с крупным размером конечных элементов, затем в интересующих точках производится расчет с деформируемым инструментом и меньшим размером конечных элементов, на которые наложены поля температур и деформаций, полученные из укрупненного расчета. Представленная модель процесса резания позволяет определять напряжения в объеме лезвия в любой момент цикла резания зуба концевой фрезы, что позволяет определять наиболее опасные моменты процесса резания зуба фрезы.

Разработанная методика позволяет оценить влияние радиуса округления режущей кромки на процесс стружкообразования, контактные напряжения, силу резания, температуру резания, статическую прочность, усталостную прочность. Используя полученные данные о контактных напряжениях и температуре резания, предоставляется возможным определить интенсивность изнашивания режущего лезвия концевой твердосплавной фрезы, а соответственно установить влияние радиуса округления режущей кромки на интенсивность изнашивания. Информация о статической и усталостной прочности позволяет установить влияние радиуса округления режущей кромки на коэффициент запаса прочности в объеме режущего лезвия в любой интересующий момент времени.

Установлен и экспериментально подтвержден характер изменения радиуса округления режущей кромки концевой твердосплавной фрезы при обработке литейной аустенитной стали.

Теоретическое исследование влияния скорости резания и подачи на радиус округления режущей кромки концевой твердосплавной фрезы для обработки нержавеющей стали аустенитного класса позволило получить зависимость влияния этих режимов на оптимальную величину радиуса округления режущей кромки. Такой подход позволяет определить сочетание режимов фрезерования и радиуса округления режущей кромки твердосплавной концевой фрезы, которые обеспечат максимальную стойкость инструмента.

Полученная зависимость позволяет корректировать режимы резания в зависимости от состояния режущей кромки в процессе резания, что позволяет повысить ресурс инструмента.

**Ключевые слова:** механическая обработка, математическая модель, работоспособность инструмента, концевое фрезерование, радиус округления, аустенитная сталь, твердосплавная фреза.

## АНОТАЦІЯ

Некрасов С. С. Підвищення працездатності твердосплавних кінцевих фрез при обробці ливарних сталей аустенітного класу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти. – Національний технічний університет України «КПІ», Київ, 2012.

У роботі розглянуто вплив початкового радіуса округлення різальної кромки кінцевої твердосплавної фрези на її працездатність під час фрезерування пазів у заготовках із ливарної сталі аустенітного класу. Встановлено та експериментально підтверджено характер зміни радіуса округлення різальної кромки кінцевої твердосплавної фрези під час обробки ливарної аустенітної сталі. Теоретично отримана залежність початкового радіуса округлення різальної кромки, який забезпечує максимальну працездатність інструмента, від режимів фрезерування.

Отримані результати дозволяють встановити поєднання швидкості різання, подачі та початкового радіуса округлення різальної кромки, які забезпечать найбільший ресурс інструмента, а також скорегувати режими різання залежно від стану різальної кромки, який змінюється у процесі різання.

**Ключові слова:** механічна обробка, математична модель, працездатність інструмента, кінцеве фрезерування, радіус округлення, аустенітна сталь, твердосплавна фреза.

#### ABSTRACT

Nekrasov S.S. Increasing capacity of hard end-mills in the processing of austenitic stainless steel.

Thesis PhD in speciality 05.03.01 – machining operations, machines and tools. – National Technical University of Ukraine “KPI”, Kyiv, 2012.

In this work the influence cutting edge radius of carbide end-mill on its performance in milling grooves into the workpiece from austenitic stainless steel, determined and experimentally verified nature of the cutting edge radius of carbide end-mill in the machining of austenitic steel. Theoretically obtained dependence on milling cutting edge radius, which ensures maximum efficiency tool.

The results allow to establish a combination cutting speed, filing and cutting edge radius, which will provide the greatest resource tool, and adjust the modes depending on the cutting edge of that change in the process of cutting.

**Keywords:** machining, mathematical model, performance tools, end milling, radius, austenitic steel, carbide cutter.

Підписано до друку 24.04.12	Формат 60×90/16	Папір ксероксний
Обл. – вид. арк. 1,8	Тираж 100 пр.	Гарнітура Times New
Ум. друк. арк. 1,9	Замовлення №	Roman Cyr

Видавництво СумДУ при Сумському державному університеті  
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007.  
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру  
ДК №3062 від 17.12.2007 р.

Надруковано у друкарні СумДУ  
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007.