

**МОДЕЛЮВАННЯ ЧИСТОВОЇ ОБРОБКИ РОБОЧОГО ПРОФІЛЮ ПУАНСОНА ДЛЯ ГАРЯЧОГО ФОРМУВАННЯ СЛІДУ ВЗУТТЯ**

Проведені комплексні дослідження операції чистового фрезерування пуансонів взуттєвих прес-форм для гарячого формування сліду взуття з робочими профілями, що мають радіуси кривизни в межах  $R=50 - 210$  мм. Засобами комп'ютерного моделювання встановлені умови ефективної обробки взуттєвого пуансона на фрезерувальних верстатах з числовим програмним керуванням, що забезпечують необхідну точність обробки робочої поверхні ( $\pm 0,15$  мм).

**Постановка проблеми**

Для якісного гарячого формування сліду взуттєвих заготовок використовують жорсткі прес-форми (ПФ), одним із різновидів яких є прес-форми зі змінним монолітним пуансоном (рис. 1). Найбільш трудомісткою і дорогавартісною операцією при їх виготовленні є чистова фрезерна обробка робочої поверхні пуансона, поздовжні та поперечні робочі профілі якої описуються кривими другого порядку. Така обробка виконується методом порядкової подачі інструменту на 2,5 (більш дешевих) чи 3-х координатних фрезерних верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК). При виконанні цієї операції має бути забезпечена необхідна точність робочого профілю (відхилення не повинні перевищувати  $\pm(0,1 - 0,15)$  мм), найменший час циклу обробки та відповідно найменша собівартість обробки.

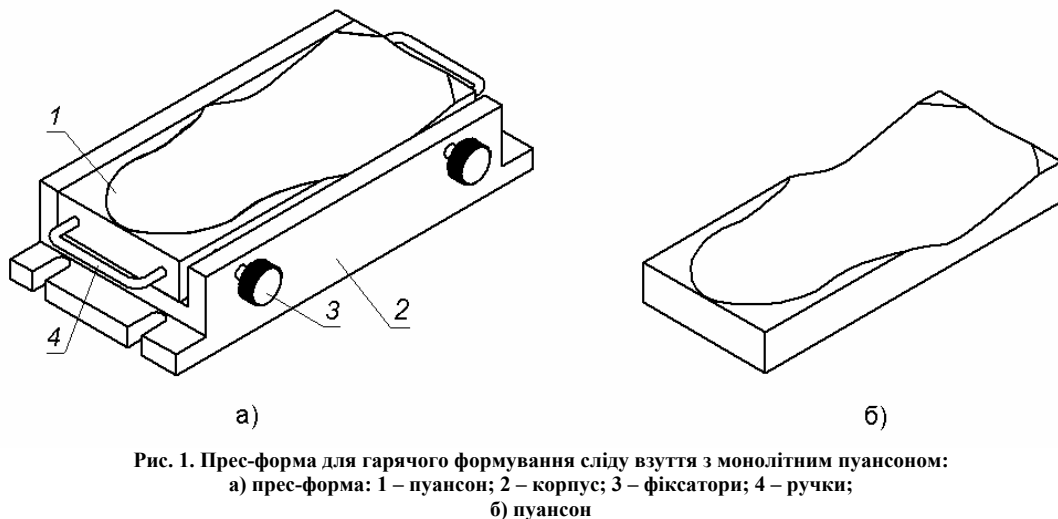


Рис. 1. Прес-форма для гарячого формування сліду взуття з монолітним пуансоном:  
а) прес-форма: 1 – пуансон; 2 – корпус; 3 – фіксатори; 4 – ручки;  
б) пуансон

**Аналіз останніх досліджень чи публікацій**

Точність та продуктивність формоутворення оброблених поверхонь на верстатах з ЧПК визначались у відомих роботах [1,2] аналітично в межах теорії формоутворення поверхонь. Такий опис передбачає аналітичний опис оброблюваної поверхні та різального інструменту з подальшим аналізом кінематики та геометрії дотику поверхні деталі з поверхнею інструменту. Незважаючи на однозначний і повний опис оброблюваної поверхні, даний підхід є достатньо загальним та громіздким з точки зору підготовки даних і отримання рішень та не враховує конкретні особливості розробки керуючих програм для верстата з ЧПК. Разом з тим є загальновідомим фактом, що керуючі програми для таких верстатів на сьогодні розробляються з використанням сучасних CAD/CAM-систем, зокрема MasterCAM, Cimatron, GeMMa-3D та ін. Робота таких пакетів дозволяє не тільки розробити керуючу програму для обробки заданої поверхні деталі, але й промоделювати сам процес обробки та оцінити можливу точність і продуктивність обробки для заданих умов обробки (параметрів інструменту та режимів різання). Однак через відсутність необхідних рекомендацій, технологів, при роботі в таких пакетах, приходиться підшукувати необхідний інструмент та режими обробки лише шляхом перебору можливих рішень, що займає тривалий час.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми**

Пуанسونи ПФ для гарячого формування сліду взуття мають робочу поверхню, поздовжні та поперечні робочі профілі якої спрягаються кривими 2-го порядку зі значними радіусами кривизни. Так пуанسونи для формування заготовок чоловічого та жіночого взуття мають профілі, що відповідають відповідним взуттєвим колодкам і мають радіуси кривизни, що знаходяться в межах  $R=50 - 210$  мм [3]. Відсутність рекомендацій по ефективному виконанню чистового фрезерування робочого профілю таких ПФ із заданою точністю та оцінка продуктивності і собівартості найбільш трудомісткої операції виготовлення пуансона є завданням, що потребує

свого вирішення.

### Формулювання цілей статті

Для досягнення даної мети дослідження були поставлені та вирішені наступні завдання:

- розробити методику визначення теоретичної похибки обробки робочої поверхні пуансона в САМ-пакеті при виконанні порядкового чистового фрезерування робочої поверхні пуансона;
- для спрощення розробки рекомендацій по вибору інструменту та режимів обробки провести планування комп'ютерного експерименту з моделюванням чистової обробки робочої поверхні пуансона в САМ-пакеті та отримати відповідну «вторинну» математичну модель похибки обробки;
- на основі отриманої моделі провести аналіз впливу факторів на похибку обробки робочої поверхні пуансона;
- на основі отриманих рекомендацій оцінити вплив факторів обробки на продуктивність виконання чистової обробки та орієнтовну вартість виконання операції на основі відомих методик.

### Виклад основного матеріалу дослідження

а) Розробка методики визначення теоретичної похибки обробленого профілю пуансона в САМ-пакеті.

Проводили моделювання обробки робочої поверхні пуансона для гарячого формування сліду заготовки чоловічого взуття №=270 мм з нормальною висотою каблук ( $H \leq 20$  мм) в САМ-пакеті.

Вихідними даними для проведення дослідження була прийнята за рекомендаціями [2,4] наступна технологія обробки робочої поверхні пуансона:

- чорнова обробка призматичної заготовки зі сплаву АЛ8 кінцевою фрезою  $D=50$  мм (рис. 2,а);
- напівчистова (зачистна) обробка робочої поверхні пуансона сферичною фрезою  $D=50$  мм (рис. 2,б) для забезпечення стабільного припуску під наступну обробку;
- чистова (остаточна) обробка робочої поверхні пуансона однією із стандартних сферичних фрез  $D=10 - 50$  мм. Моделювання такої обробки методом порядкової подачі представлена на рис. 3, а – б.

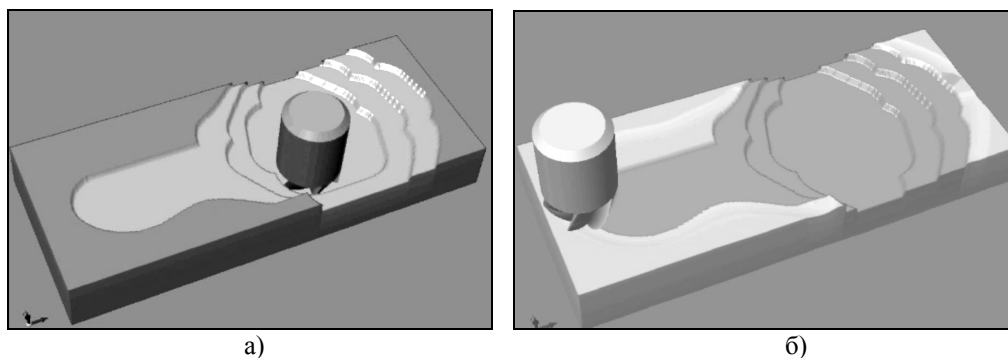


Рис. 2. Комп'ютерне моделювання попередньої обробки робочої поверхні пуансона ПФ в САМ-пакеті:  
а – чорнкової обробки кінцевою фрезою  $D=50$  мм;  
б – напівчистової (зачистної) обробки сферичною фрезою  $D=50$  мм

Теоретична похибка (або похибка від схеми обробки) при порядковому фрезеруванні робочого профілю пуансона визначалась з використанням модуля візуалізації результатів обробки САМ-пакету.

Теоретична похибка  $\Delta_r$  обробки робочого профілю ПФ:

$$\Delta_m = |\Delta_z| + |\Delta_n|, \quad (1)$$

де  $\Delta_z$  – величина зарізу обробленої поверхні, мм;

$\Delta_n$  – величина недорізу (недоробки) обробленої поверхні, мм.

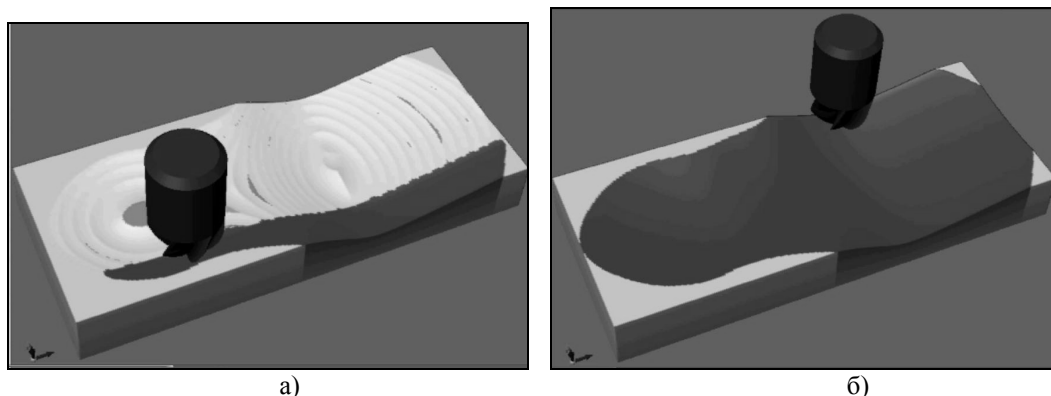


Рис. 3. Комп'ютерне моделювання чистового порядкового фрезерування робочої поверхні пуансона ПФ в САМ-пакеті:  
а – початок обробки;  
б – закінчення обробки

Величину зарізів і недорізів знаходили шляхом порівняння ідеальної та обробленої (за результатами

модельовання) поверхонь профілю за наступною процедурою:

- а) в робочому вікні модуля візуалізації САМ-пакету проводиться моделювання обробки пуансона ПФ;
- б) після цього в робоче вікно завантажується модель оригіналу того ж пуансона (файл у форматі STL);
- в) величини відхилення обробленого профілю від оригіналу (величини зарізів і недорізів) відмічаються на суміщених моделях відповідним кольором (рис. 4, а – б) та визначаються за допомогою попередньо проградуєваної кольорової шкали.

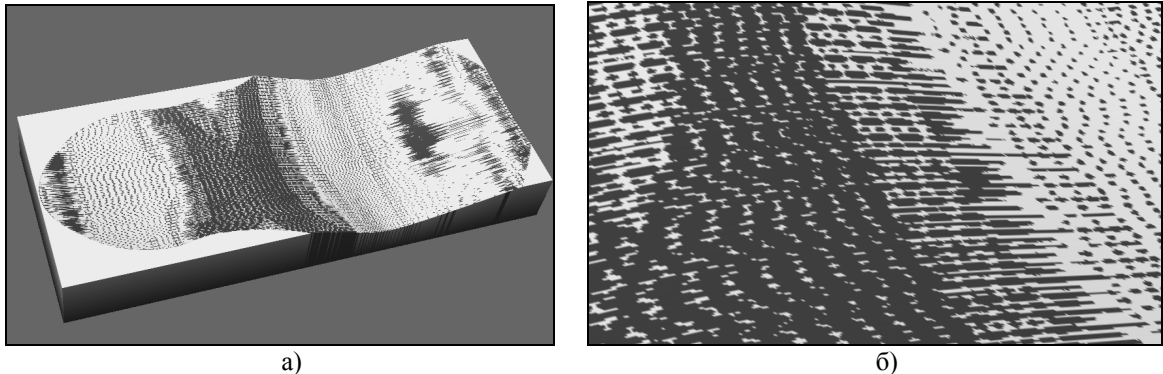


Рис. 4. Картина дефектів обробленої поверхні пуансона після комп'ютерного моделювання обробки:  
а – загальний вид;  
б – місцевий вид

Опробування та тестування методики визначення похибки обробки проводили на пуансоні з увігнутою робочою поверхнею циліндричної форми. Порівняльний аналіз дефектів обробки, розрахованих аналітично за методикою [1], та дефектів, визначених за результатами моделювання, показав, що програма працює з похибкою менше 0,01 мм, що є достатнім.

б) Планування комп'ютерного експерименту з моделюванням чистової обробки робочої поверхні пуансона в САМ-пакеті.

Значні витрати часу, необхідні для визначення величини та знаку дефектів обробленої поверхні у відомих САМ-пакетах, а також необхідність побудови математичної моделі для спрощення аналізу отриманих результатів моделювання, вимагає проведення планування комп'ютерного експерименту.

Первинними факторами, що впливають на величину і знак дефектів чистової обробки поверхні за [1, 2] є: вид місцевої кривизни оброблюваної поверхні (опукла чи увігнута) та її величина; радіус сферичної фрези  $R$ ; напрямок рядкового фрезерування (поздовжнє, поперечне чи під кутом); величина поперечної (міжрядкової) подачі  $s_n$ ; вид апроксимації кривої траєкторії руху фрези вздовж рядка: лінійна (крива замінюється хордами) чи колова (крива апроксимується дугами). При відборі факторів враховували, що радіус фрези  $R$  та міжрядкова подача  $s_n$  визначають висоту  $h$  залишкових гребінців на обробленій поверхні пуансона [1, 2]. Для плоскої поверхні (рис. 5) висота  $h$  гребінців:

$$h = R - \sqrt{R^2 - \frac{s_n^2}{4}} \approx \frac{s_n^2}{8R}, \text{ мм} \quad (2)$$

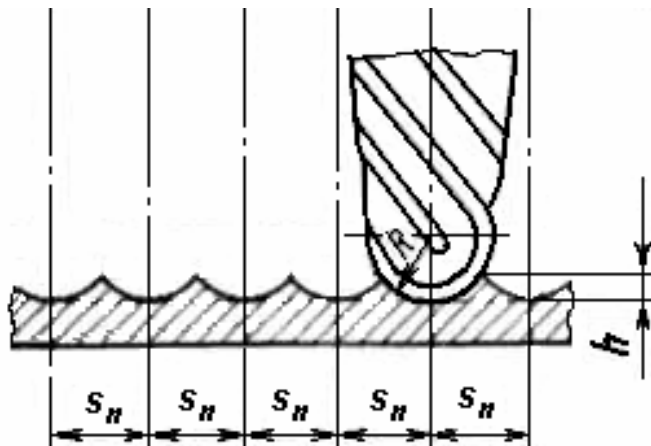


Рис. 5. Схема утворення гребінців при рядковому фрезеруванні площини

Для криволінійних поверхонь залежність (2) ускладнюється [1] (висота гребінців залежить від форми поверхні та радіуса її кривизни). Тому було прийнято рішення, що висота  $h$  гребінців обробленої поверхні та радіус (діаметр  $D$ ) фрези в повній мірі можуть визначати умови обробки поверхні (міжрядкову подачу  $s_n$ ) та

бути керованими факторами плану експерименту. Разом з тим відмітимо, що більшість САМ-пакетів дозволяє при розробці управляючих програм обмежувати (задавати) висоту  $h$  гребінців обробленої поверхні.

Не менш значимим фактором, що впливає на величину дефектів обробленої поверхні, є точність  $S$  апроксимації траєкторії руху фрези вздовж рядка. Для недорогих САПР апроксимація криволінійної траєкторії проводиться прямими, а точність  $S$  апроксимації кривої рядка (надалі точність апроксимації рядка) представляє собою величину допустимого відхилення траєкторії фрези від ідеальної траєкторії, що визначається геометрією вихідного контуру поверхні (рис. 6).

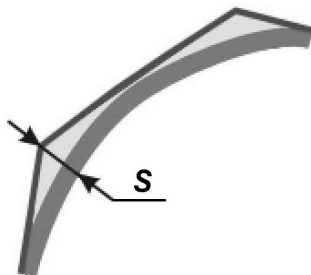


Рис. 6. До визначення точності  $S$  апроксимації траєкторії руху фрези вздовж рядка

Для вибраних незалежних факторів були встановлені наступні рівні (табл. 1).

Таблиця 1

**Значення рівнів факторів у досліді**

Рівні варіювання	Фактори		
	Висота гребінця, $h$ , мм	Точність апроксимації траєкторії рядка $S$ , мм	Діаметр фрези $D$ , мм
Верхній рівень	0,1	0,1	50
Нижній рівень	0,01	0,01	10
Основний рівень	0,055	0,055	30
Інтервал зміни фактора	0,045	0,045	20

В якості змінної відгуку була вибрана теоретична похибка  $\Delta_m$  обробки робочого поверхні ПФ, яка визначалась за (1) та використанням вищезгаданої методики. За результатами проведення трьох факторного експерименту була отримана лінійна регресійна модель похибки  $\Delta_m$  у вигляді рівняння:

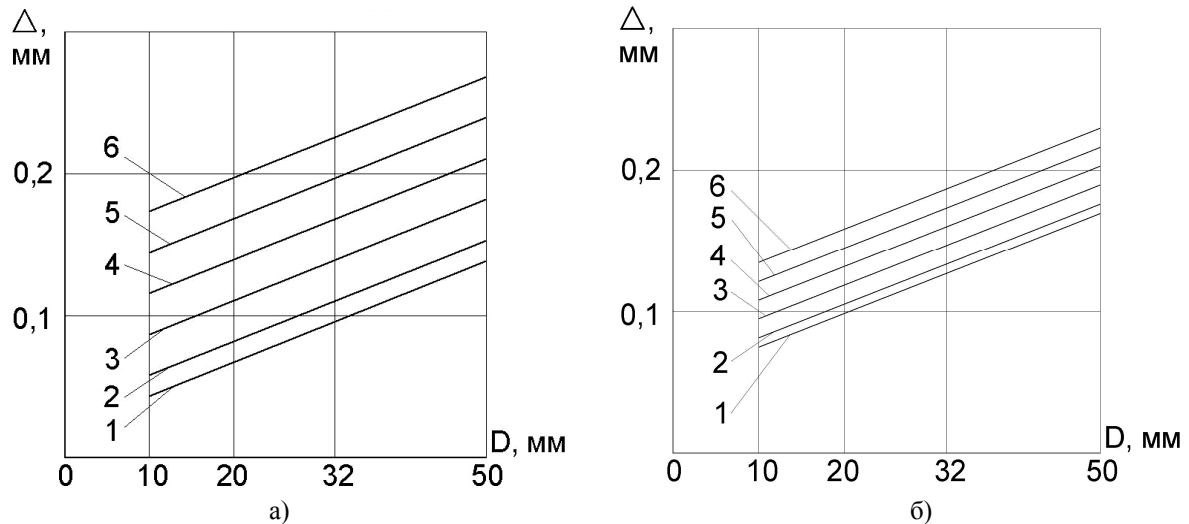
$$\Delta = -0,02775 + 0,666 \cdot h + 1,443 \cdot S + 0,002375 \cdot D \quad (3)$$

Отримана модель пройшла задовільну перевірку на відтворюваність дослідів (за критерієм Стюдента), на значимість коефіцієнтів (за критерієм Кохрена) та на адекватність (за критерієм Фішера). Статистична похибка комп'ютерного експерименту спостерігалась, як наслідок налагодження кольорової шкали для визначення величини зарізів та недорізів обробленої поверхні, так і їх пошуку на моделі пуансона після обробки у вікні модуля візуалізації та не перевищувала 0,01 мм.

в) Аналіз впливу факторів на похибку обробки прес-форми.

1) Вплив діаметра фрези на похибку обробки.

Залежність похибки обробки від діаметра  $D$  фрези для висоти гребінця  $h=0,05$  мм при різній точності  $S$  апроксимації рядка приведена на рис. 7 (а), а залежність похибки обробки від діаметра  $D$  фрези для точності апроксимації рядка  $S=0,05$  мм при різній висоті гребінців приведена на рис. 7 (б).

Рис. 7. Вплив діаметра  $D$  фрези на похибку обробки:

а) для  $h=0,05$  мм: 1 –  $S=0,01$  мм; 2 –  $S=0,02$  мм; 3 –  $S=0,04$  мм; 4 –  $S=0,06$  мм; 5 –  $S=0,08$  мм; 6 –  $S=0,1$  мм;  
 б) для  $S=0,05$  мм: 1 –  $h=0,01$  мм; 2 –  $h=0,02$  мм; 3 –  $h=0,04$  мм; 4 –  $h=0,06$  мм; 5 –  $h=0,08$  мм; 6 –  $h=0,1$  мм

Як видно з графіків (в обох випадках) при збільшенні діаметра фрези теоретична похибка обробки збільшується, причому вплив похибки  $S$  апроксимації рядка (рис. 7, а) є дещо більший, ніж висоти  $h$  гребінців (рис. 7, б). Це пояснюється тим, що при великих діаметрах фрез виникають більші зарізи оброблюваної поверхні.

Разом з тим із залежності (2) можна побачити, що збільшення діаметру  $D$  фрези дозволить збільшити міжрядкову подачу  $s_n$  і, відповідно, продуктивність обробки. Тому для чистового фрезерування робочої поверхні пуансона із заданою точністю (до 0,15 мм) можна рекомендувати використовувати стандартні сферичні фрези  $D=32$  мм.

#### 2) Вплив висоти гребінця на похибку обробки.

Залежність похибки обробки від висоти  $h$  гребінців для діаметра фрези  $D=32$  мм при різній точності  $S$  апроксимації рядка приведена на рис. 8 (а), а залежність похибки обробки від висоти  $h$  гребінців для точності апроксимації рядка  $S=0,05$  мм при різних діаметрах  $D$  фрез приведена на рис. 8 (б).

Як видно з графіків (в обох випадках) при збільшенні висоти  $h$  гребінців теоретична похибка обробки збільшується. Це пояснюється тим, що при рядковому фрезеруванні утворюються гребінці, які приводять до зростання похибки обробки робочого профілю пуансона. Вибираючи більшу точність апроксимації траєкторії руху фрези вздовж рядка ( $S < 0,04$  мм), можна суттєво зменшити похибку обробки, але це збільшить загальну кількість апроксимованих елементів у траєкторії руху фрези вздовж рядка та кількість кадрів керуючої програми, що приведе до збільшення часу на виконання операції. Тому для чистового фрезерування робочої поверхні пуансона із заданою точністю (до 0,15 мм) можна рекомендувати вибір точності апроксимації рядка в межах  $S = 0,03 - 0,04$  мм, використовуючи при цьому фрезу  $D=32$  мм.

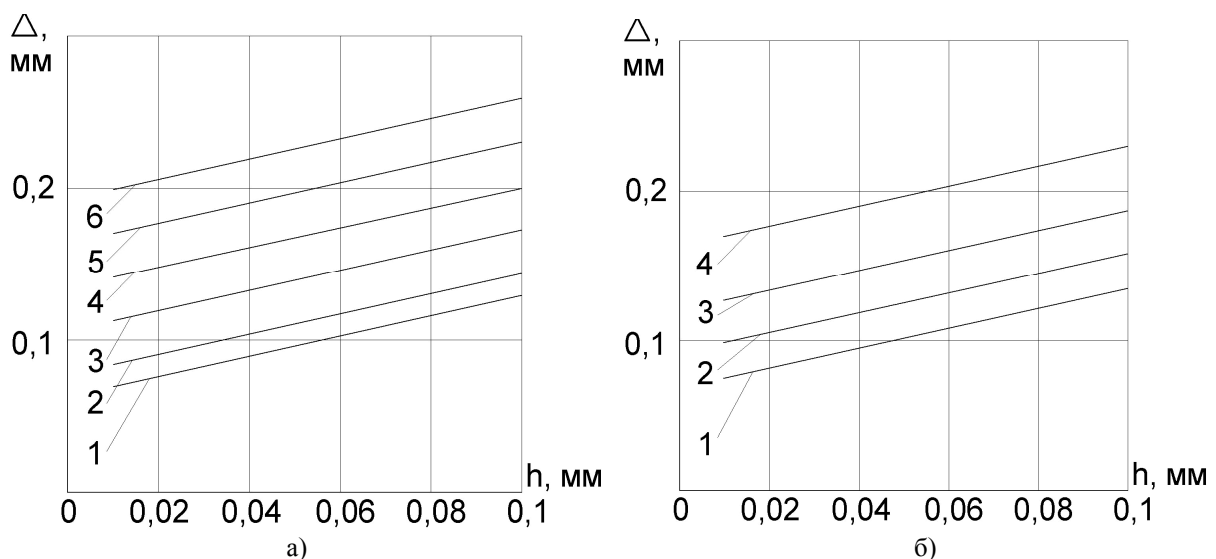


Рис. 8. Вплив висоти гребінця на похибку обробки:

а) для  $D=32$  мм: 1 –  $S=0,01$  мм; 2 –  $S=0,02$  мм; 3 –  $S=0,04$  мм; 4 –  $S=0,06$  мм; 5 –  $S=0,08$  мм; 6 –  $S=0,1$  мм;  
 б) для  $S=0,05$  мм: 1 –  $D=10$  мм; 2 –  $D=20$  мм; 3 –  $D=32$  мм; 4 –  $D=50$  мм

3) Вплив похибки траєкторії руху фрези вздовж рядка на похибку обробки.

Залежність похибки обробки від точності апроксимації рядка  $S$  для діаметра фрези  $D=32$  мм при різних висоті гребінців приведена на рис. 9 (а), а залежність похибки обробки від точності апроксимації рядка  $S$  для висоти гребінців  $h=0,05$  мм при різних діаметрах  $D$  фрез приведена на рис. 9 (б).

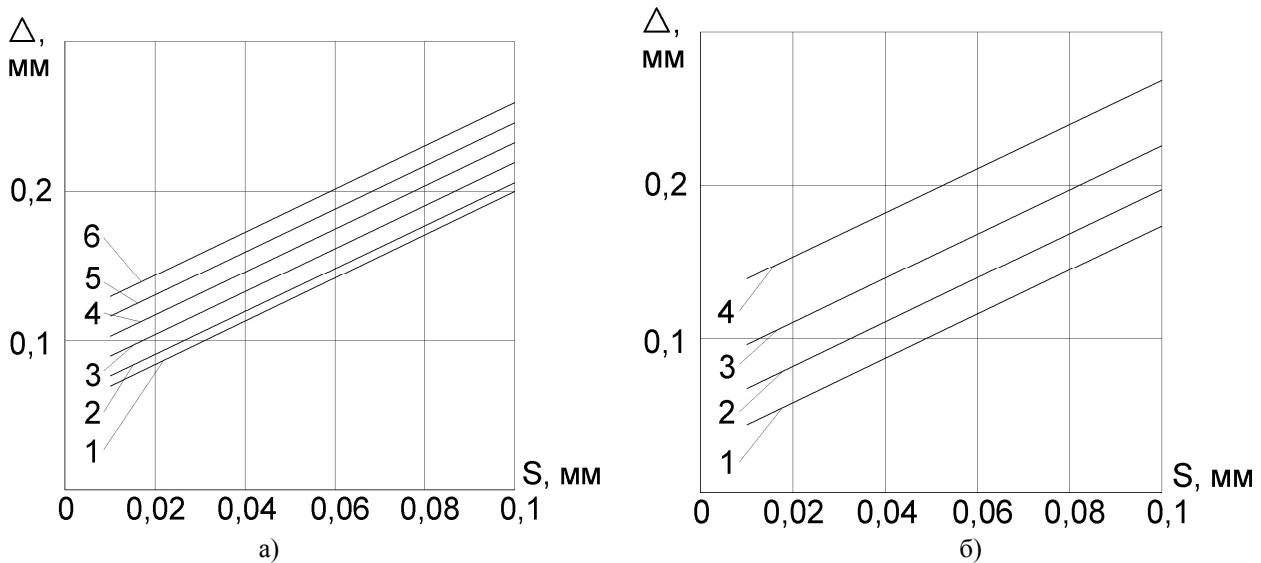


Рис. 9. Вплив похибки траєкторії руху фрези вздовж рядка на похибку обробки:  
 а) для  $D=32$  мм: 1 –  $h=0,01$  мм; 2 –  $h=0,02$  мм; 3 –  $h=0,04$  мм; 4 –  $h=0,06$  мм; 5 –  $h=0,08$  мм; 6 –  $h=0,1$  мм;  
 б) для  $h=0,05$  мм: 1 –  $D=10$  мм; 2 –  $D=20$  мм; 3 –  $D=32$  мм; 4 –  $D=50$  мм

Як видно з графіків (в обох випадках) при збільшенні похибки апроксимації траєкторії руху фрези вздовж рядка теоретична похибка обробки збільшується, що пояснюється додатковим зростання величини зарізів та недорізів обробленої поверхні. Забезпечення заданої точності чистового фрезерування поверхні пуансона ( $\Delta_m < 0,15$  мм) для діаметра фрези  $D=32$  мм можливе при обмеженні висоти гребінців до  $h < 0,04 \dots 0,06$  мм. Однак варто мати на увазі, що значне обмеження висоти  $h$  гребінців приведе до зменшення міжрядкової подачі  $s_n$  і відповідного зменшення продуктивності обробки.

г) оцінка впливу факторів обробки на продуктивність виконання чистової обробки та визначення орієнтовної вартості виконання операції.

Проводили моделювання чистової обробки робочої поверхні пуансона фрезами стандартних діаметрів на нижніх та верхніх рівнях висоти гребінців та точності апроксимації траєкторії рядка та визначали теоретичний час  $t$  циклу обробки та число кадрів керуючої програми у модулі візуалізації САМ-пакету. Результати моделювання представлені на рис. 10 (а-б).

З графіків видно, що найбільший вплив на час циклу обробки впливає висота  $h$  гребінців обробленої поверхні: при зменшенні  $h$  з  $0,1$  мм до  $0,01$  мм, час циклу чистової обробки пуансона збільшується більше, ніж у  $2,0 - 2,5$  рази. При цьому разом з підвищенням точності апроксимації траєкторії рядка з  $S=0,1$  мм до  $S=0,01$  мм загальна кількість кадрів керуючої програми зростає в  $2,5 - 5$  раз.

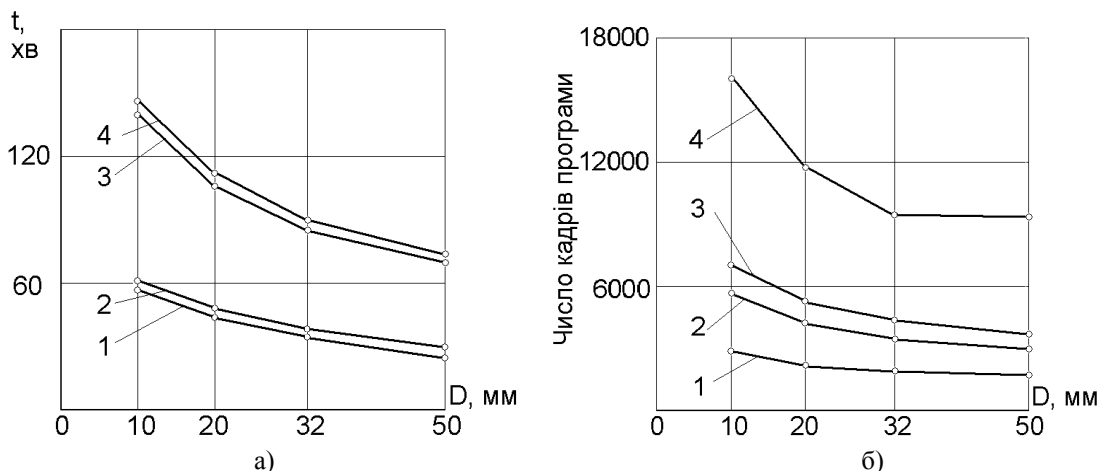


Рис. 10. Вплив діаметра  $D$  фрези, висоти  $h$  гребінців та точності  $S$  апроксимації траєкторії рядка на:  
 а – час циклу чистової обробки пуансона;  
 б – кількість кадрів керуючої програми; 1 –  $h=0,1$  мм;  $S=0,1$  мм; 2 –  $h=0,1$  мм;  $S=0,01$  мм; 3 –  $h=0,01$  мм;  $S=0,1$  мм; 4 –  $h=0,01$  мм;  $S=0,01$  мм

Час циклу чистової обробки для рекомендованих умов обробки (діаметр фрези  $D=32$  мм, допустима висота гребінців  $h=0,04$  мм та точність апроксимації траєкторії руху фрези вдовж рядка  $S=0,03$  мм; інші режими обробки – стандартні) склав 74 хв.

Орієнтовну вартість виконання операції розраховували за методикою [5] для 2,5-координатних фрезерних верстатів (мод. ЛФ260МФ3 та 6Р13Ф3) та більш дорогостоящих 3-координатних верстатів з ЧПК вартістю до 80 тис.євро. За результатами розрахунку погодинних приведених витрат за [5] для цих верстатів, які орієнтовно склали 80...200 грн/год. та прийнятому штучно-калькуляційному часу на виконання операції ( $T_{шт.к}=90$  хв), орієнтовна вартість чистової обробки пуансона склала 120...300 грн.

#### Висновки та рекомендації

Проведені комплексні дослідження операції чистового фрезерування пуансонів взуттєвих прес-форм для гарячого формування сліду взуття з робочими профілями, що мають радіуси кривизни в межах  $R=50 - 210$  мм.

За результатами комп'ютерного моделювання та планування експерименту встановлені раціональні режими обробки, які забезпечують необхідну точність обробки робочої поверхні пуансона ( $\pm 0,15$  мм). Для обробки рекомендується використовувати стандартні сферичні фрези  $D=32$  мм при допустимій висоті гребінців оброблюваної поверхні  $h=0,04$  мм та точності апроксимації траєкторії руху фрези вдовж рядка  $S=0,03$  мм.

Встановлені орієнтовний час циклу виконання чистової обробки взуттєвого пуансона на фрезерному верстаті з ЧПК та орієнтовна вартість виконання операції дозволять технологам взуттєвого та інструментального виробництва приймати ефективні рішення щодо вибору і виконання найбільш трудомістких операцій виготовлення взуттєвих прес-форм.

#### Список використаних джерел

1. Радзевич С.П. Формообразование поверхностей деталей. Основы теории. Монография. – К.: Растан, 2001. – 592 с.
2. Родин П. Р., Линкин Г. А., Татаренко В. Н. Обработка фасонных поверхностей на станках с числовым программным управлением. – К.: Техніка, 1976. – 200 с.
3. Ключникова В.М. и др. Практикум по конструированию изделий из кожи. – М.: Легпромбытиздат, 1985. – 336 с.
4. Бобров А. Н., Перченко Ю. Г. Автоматизированные фрезерные станки для объемной обработки. – Л.: Машиностроение, 1979. – 231 с.
5. Расчеты экономической эффективности новой техники: Справочник / Под ред. К.М. Великанова. – Л.: Машиностроение, 1990. – 512 с.