

УДК 621.9.048.6

АЛЬ-ЯФАІ-НАСР

Хмельницький національний університет

В.П. МІСЯЦЬ

Київський національний університет технологій та дизайну

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ РІЗАННЯ ВЗУТТЄВИХ МАТЕРІАЛІВ ПІД ЧАС ДІЇ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ НА ЛЕЗО НОЖА

Представлено опис виконання і результати експериментальних досліджень технологічних процесів різання взуттєвих матеріалів під час дії ультразвукових коливань на лезо ножа. Експериментальні дослідження базуються на теорії планування експерименту, використанні оригінальної експериментальної установки, сучасних методів вимірювання, реєстрації та статистичної обробки результатів. Вперше отримано експериментальні дані про вплив амплітуди і частоти ультразвукових коливань різального інструменту на силові показники процесів різання взуттєвих матеріалів. Виконані експериментальні дослідження дають можливість реалізації технологічних процесів ультразвукового різання взуттєвих матеріалів за умов значного зменшення зусиль опору.

Ключові слова: ніж, різання, шкіра натуральна, ультразвук, механічні коливання, амплітуда, частота, швидкість різання, сила різання, рівняння регресії.

ALI-JAFI NASR

Khmelnytsky National University

V.P. MISIATS

Kyiv National University of Technologies and Design

EXPERIMENTAL RESEARCH OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF CUTTING SHOE MATERIALS UNDER THE INFLUENCE OF ULTRASONIC VIBRATIONS ON THE BLADE OF THE KNIFE

Presents a description of the performance and results of experimental research of technological processes of cutting shoe materials under the influence of ultrasonic vibrations on the blade of the knife. The experimental research based on the theory of planning the experiment, using the original experimental installation, modern methods of measurement, registration and statistical results. For the first time obtained experimental data on the influence of amplitude and frequency of vibration of ultrasonic cutting tool on the power indicators of the processes of cutting shoe materials. Made experimental research allow the realization of technological processes of ultrasonic cutting shoe materials under conditions of significant reduction efforts prop.

Keywords: knife, cutting, leather, ultrasound, mechanical vibration, amplitude, frequency, speed, cutting, cutting, regression equation.

Об'єктом дослідження є процес механічного різання матеріалів з пружно-в'язкими властивостями, вживаних для виготовлення взуття і шкіргалантерейних виробів при коливанні інструменту з ультразвуковою частотою. **Предметом дослідження** є технологічні операції з використанням розкрою матеріалів на деталі плоским ножом при його коливанні з ультразвуковою частотою.

Мета – експериментально визначити вплив технологічних параметрів ультразвукової системи (частота і амплітуда коливань інструменту) на силові показники процесів різання взуттєвих матеріалів.

Ультразвукове різання в останні роки стає поширеним в різних галузях машинобудування, хімічної, харчової і легкої промисловості. Спосіб ультразвукової обробки матеріалів уперше був запропонований в 1945 році. Перші ультразвукові пристрої для різання металів з'явилися в 1953 році. Ультразвук стали застосовувати для зниження сил різання при токарній, фрезерній, свердлуванні, zenкуванні, нарізуванні різьблення і шліфуванні [1]. Зниження сил за допомогою ультразвуку дозволило значно підвищити продуктивність, отримати більш високий клас чистоти обробки, збільшити термін служби різальних інструментів. Ефективність дії ультразвукових коливань в процесах різання залежить від величини амплітуди і частот коливань, їх напрямку, фізико-механічних і теплофізичних властивостей оброблюваного матеріалу і матеріалу інструменту [1].

Обробку вібруючим ножом застосовують у ряді галузей промисловості для різання різних матеріалів. В той же час у взуттєвій і шкіргалантерейній промисловості вона ще не знайшла широкого застосування.

Постановка завдання. На силу різання і якість обробки матеріалу вібруючим ножом впливають частота і амплітуда коливань, кут заточування і матеріал ножа, швидкість транспортування виробу, властивості матеріалу і товщина шару, що знімається.

Огляд робіт по ультразвуковому і вібраційному різанню показав, що в принципі можливе різання з усіма трьома основними напрямками коливань: тангенціальними, осьовими, радіальними (рис. 1).

Представляється важливим дослідити, яким чином вибирати напрям коливань при ультразвуковому різанні взуттєвих матеріалів, встановити закономірність впливу частоти і амплітуди коливань ножа а також швидкості його робочого руху відносно матеріалу на силу опору.

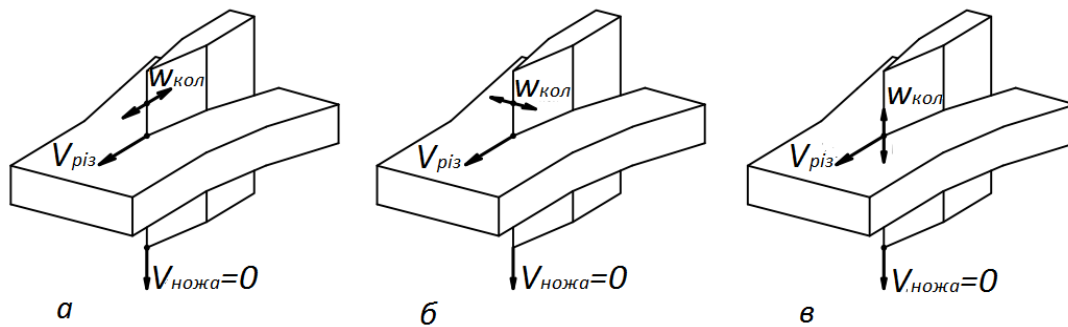


Рис. 1. Схеми різання ножом з ультразвуковими коливаннями:
а – в тангенціальному напрямі; б – в радіальному напрямі; в – в осьовому напрямі

Результати досліджень та їх обговорення

Для проведення досліджень було розроблено і виготовлено експериментальну установку, схема якої представлена на рис. 2.

Коливальна система установки складається з генератора ультразвукових коливань УЗГ1-1, магнітострикційного перетворювача ПМС-1, на виході якого встановлено акустичний трансформатор коливань експоненціального типу 7 (рис. 2). Генератор УЗГ1-1 призначений для перетворення електричної енергії промислової частоти в електричну енергію ультразвукової частоти і живлення магнітострикційного перетворювача ПМС-1. Для охолодження перетворювача служить проточна вода. В генераторі передбачена можливість безступеневого регулювання частоти і амплітуди коливань з відповідною стрілочною індикацією.

Технічна характеристика генератора УЗГ1-1:

- потужність вихідна регульована – 100...1000 Вт;
- напруга живлення, В 220 5%, 50 Гц;
- частота вихідної напруги регульована – 20,5...22,5 кГц;
- коефіцієнт корисної дії, % – не менше 65;
- маса, кг – не більше 70.

Технічна характеристика магнітострикційного перетворювача ПМС1-1:

- споживана потужність – не більше 1 кВт;
- напруга живлення – 220 В;
- робоча частота – 20...24 кГц;
- амплітуда зміщення торця – 10 мкм;
- маса, не більше – 4,5 кг.

На акустичному трансформаторі за допомогою хомута і гвинтів встановлюється різальний інструмент (плоский ніж, або голка швейної машини) з можливістю його заміни і зміни положення.

Матеріал, що підлягає різанню закріплюється на каретці 2 затискувачем 4. Каретка 2 встановлена на роликових опорах 9 для можливості позаддовжнього переміщення. Рух каретки з матеріалом здійснюється за допомогою колекторного електродвигуна 6 і гвинтової передачі 5. Електродвигун живиться від регульованого джерела напруги (на схемі не показано), що дозволяє змінювати частоту його обертання і виконувати реверс. Для зупинення каретки в крайніх положеннях встановлено кінцеві вимикачі (на схемі не показані).

Для вимірювання сили, що діє на ніж при різанні використано тензометричний датчик 8, що представляє собою консольну сталеву балку з наклеєними тензорезисторами, яка жорстко з'єднана з корпусом магнітострикційного перетворювача (ПМС) і закріплена на основі.

Електричний сигнал з тензодатчика 8 подається на підсилювач, потім на аналого-цифровий перетворювач (АЦП), що з'єднаний з комп'ютером. Система вимірювання зусилля різання установки виконана на основі двоканального аналого-цифрового перетворювача з USB виходом ВА8020, який може використовуватися для аналізу низькочастотних аналогових сигналів, реєстрації тривалих поволі змінних процесів, а також дослідження двійкових сигналів. Прилад може використовуватись як простий двоканальний вольтметр для вимірювання напруги в діапазоні ± 20 В, частотоміра в діапазоні до 50 кГц.

Технічна характеристика аналого-цифрового перетворювача ВА 8020:

- кількість каналів – 2;
- частота дискретизації – 0,01 Гц ... 200 кГц;
- вхідна напруга – -20 ... +20 В;
- максимальний час запису – 24 години при $F_d < 100$ Гц;
- розрядність АЦП – 10 біт.

Для вимірювання частоти ультразвукових коливань служить вимірювач частоти ЧЗ-63/1, який отримує частотний електричний сигнал з котушки індуктивності, що вмонтована в перетворювачі ПМС-1 (передбачено виробником).

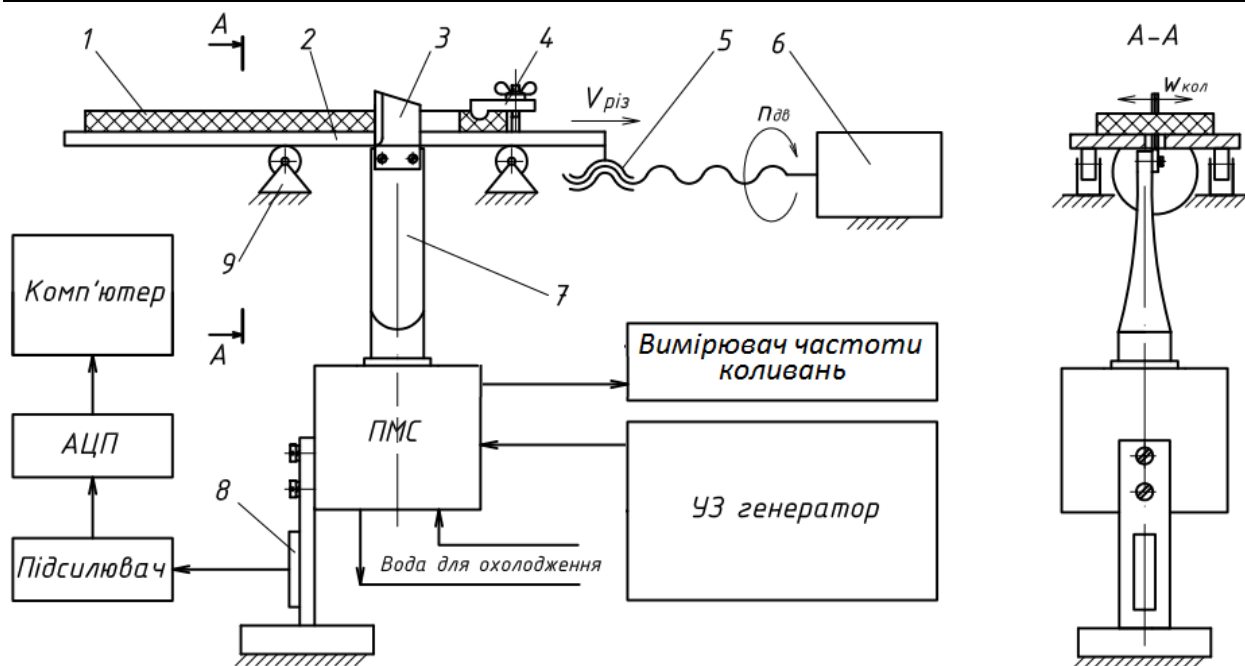


Рис. 2. Схема експериментальної установки для дослідження процесу різання взуттєвих матеріалів при дії ультразвукових коливань на лезо ножа:

1 – зразок листового матеріалу; 2 – каретка; 3 – ніж; 4 – затискувач; 5 – гвинтова передача; 6 – електродвигун; 7 – експоненціальний трансформатор УЗ коливань; 8 – балка з тензодатчиком; 9 – роликові опори

Налагодження і тарування вимірювальної системи експериментальної установки виконувалось наступним чином.

Амплітуда механічних коливань робочого торця акустичного трансформатора встановлювалась за допомогою регулятора на генераторі. Для тарування регулятора амплітуди було використано відомий метод [2], що заснований на візуальному вимірюванні амплітуди коливань за допомогою оптичного мікроскопа, забезпеченого окулярною шкалою або сіткою. У основі вимірів амплітуди коливань у відомому методі лежить спостереження за бічною поверхнею стержневої ультразвукової коливальної системи (що здійснює подовжні коливання) через мікроскоп, оптична вісь якого перпендикулярна до осі коливальної системи. Спостереження ведуть у відбитому світлі, причому в окуляр вставляють шкалу або сітку з відомою ціною ділення. Помітивши на досліджуваній поверхні до включення коливань чітко видиму точку або штрих, перпендикулярний осі системи, спостерігають їх «розмивання». Величина цього «розмиття» відповідає «розмаху» коливань, тобто подвоєному значенню амплітуди. При цьому погрішність вимірів визначається шириною нерухомого зображення спостережуваної точки або штриха.

Виміри зміщень проводили за допомогою мікроскопа (МІМ-7 і окулярного мікрометра МОВ - 1-1,5). При цьому на поверхню відполірованого торця акустичного трансформатора наносили штрихи механічним способом, дряпаючи алмазним конусом (від прибору для вимірювання твердості) його поверхню. Ширина штриха не перевищувала 10 мкм. При регулюванні амплітуди коливань ширина оптичного «розмивання» нанесеного штриха змінювалась в межах 5...60 мкм. Тобто такий спосіб виявився ефективним для визначення амплітуди механічних коливань. За результатами вимірювань було градуйовано стрілочний індикатор на генераторі.

Тарування системи вимірювання зусилля різання здійснювалось послідовним навантаженням консольної балки з тензодатчиками відомими вантажами.

Регулювання швидкості руху каретки зміненням напруги живлення електродвигуна можливе в межах 5...120 мм/с.

Для дослідження було обрано шкіру натуральну для верху взуття товщиною 1,3 мм, шкіру натуральну для виготовлення ременів товщиною 3,5 мм і заміник шкіри з полівінілхлоридним покриттям на нетканій основі товщиною 1,2 мм, що використовується для виготовлення шкіргалантерейних виробів.

Для різання матеріалів використовувались плоскі ножі з інструментальної сталі товщиною 0,5 мм і кутом загострення різальної кромки 15°.

Результати експериментальних досліджень були оброблені за допомогою персонального комп'ютера з використанням програмного забезпечення «Microsoft Office Excel 2007» і «Mathcad 14», в такій послідовності:

- експорт отриманих даних випробувань записаних програмою «Disco Application», та збереження у вигляді текстових документів у форматі (.txt) в таблицю форму програмного забезпечення «Microsoft Office Excel 2007» та подальше збереження у форматі (.xlsx); данні являють собою значення напруги, що відповідає певному зусиллю різання ;
- масштабування отриманих експериментальних даних і приведення до нульового рівня в

програмному забезпеченні «Microsoft Office Excel 2007»;

- обчислення середнього значення сили різання.

Осцилограма змінення сили різання шкіри верху взуття при увімкненні генератора ультразвукових коливань показана на рис. 3.

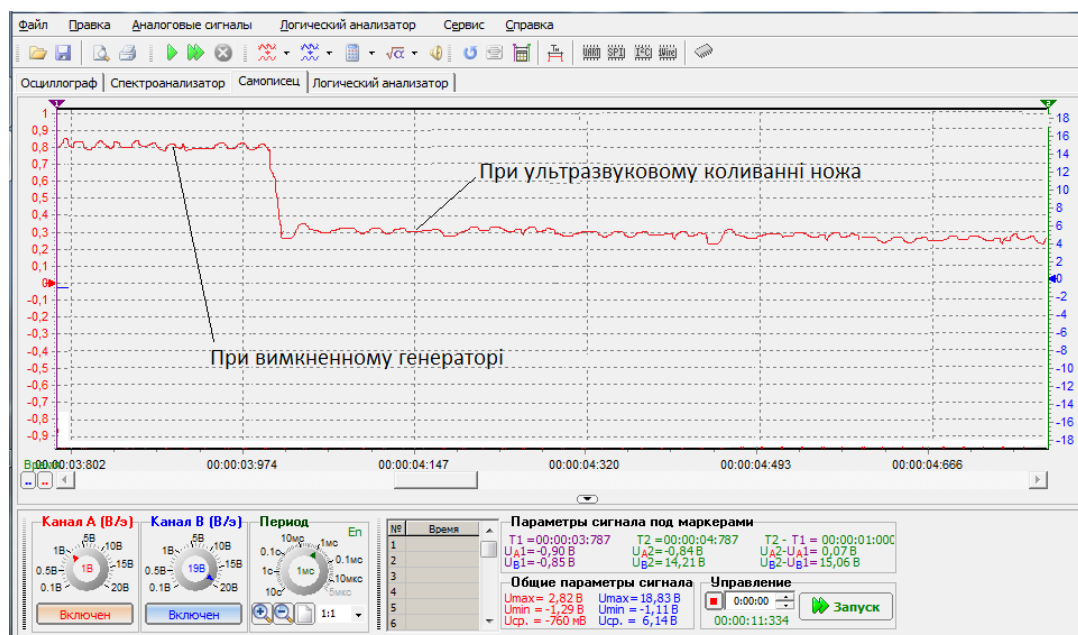


Рис. 3. Осцилограма змінення сили різання шкіри верху взуття при увімкненні генератора ультразвукових коливань

В ході постановочних експериментів було визначено зусилля різання обраних матеріалів без вібрації леза ножа, які становили:

- для шкіри натуральної для верху взуття 5,2 Н;
- для шкіри натуральної для виготовлення ременів 14,5 Н;
- для заміни шкіри з полівінілхлоридним покриттям на нетканій основі 2,7 Н.

Також було встановлено, що найбільший ефект зменшення зусилля різання має місце при коливанні ножа в радіальному напрямі (рис. 1б), тому представимо подальші експериментальні дослідження саме для цього способу різання.

При плануванні експерименту було вибрано три фактори: амплітуда коливань ножа, частота коливань і швидкість подання матеріалу на ніж (швидкість різання) (таблиця 1).

Для реалізації трифакторного експерименту було обрано не композиційний план другого порядку [3].

Матриця не композиційного плану другого порядку для трьох факторів передбачає проведення 15 дослідів при різних сполученнях рівнів факторів представлена в таблиці 2.

Для трьох факторів рівняння регресії буде мати наступний вигляд:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \quad (1)$$

Зв'язок між кодованими та дійсними значеннями фактору задається виразом:

$$X_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta_i}, \quad (2)$$

де X_{ii} – кодоване значення фактору; x_i – дійсне значення фактору; x_{i0} – значення i -го фактору на нульовому рівні; Δ_i – крок варіювання i -го фактору.

Коефіцієнти рівняння (1), дисперсію S_y^2 відтворюваності експерименту за результатами дослідів в центрі плану, дисперсії коефіцієнтів регресії визначали по відомим формулам [3].

Таблиця 1

Фактори, рівні та кроки їх варіювання

Фактори		Рівні варіювання			Крок варіювання
		-1	0	1	Δ
Амплітуда коливань, мкм	x_1	10,0	30	50	20
Частота коливань, кГц	x_2	20,5	21,5	22,5	1,0
Швидкість різання, мм/с	x_3	10	55	100	45

Після реалізації плану експерименту отримано результати, які представлено в таблиці 2.

Результати трифакторного експерименту

№ досліджу	Амплітуда, мкм	Частота, кГц	Швидкість, мм/с	Сила різання, Н		
				Шкіра 1,3 мм	Шкіра 3,5 мм	Шкіра синтетична
1	50.0	22.5	55.0	4.1	10.2	1.9
2	50.0	20.5	55.0	4.3	11.5	2.2
3	10.0	22.5	55.0	3.2	6.0	1.9
4	10.0	20.5	55.0	3.5	6.0	2.0
5	30.0	21.5	55.0	2.2	5.4	1.3
6	50.0	21.5	100.0	4.7	14.0	2.3
7	50.0	21.5	10.0	3.8	9.3	1.9
8	10.0	21.5	100.0	3.7	8.4	1.7
9	10.0	21.5	10.0	3.1	6.0	1.6
10	30.0	21.5	55.0	2.1	5.3	1.2
11	30.0	22.5	100.0	2.7	6.2	1.6
12	30.0	22.5	10.0	1.9	4.8	1.1
13	30.0	20.5	100.0	2.5	6.2	1.6
14	30.0	20.5	10.0	2.1	5.0	1.7
15	30.0	21.5	55.0	1.8	4.9	1.5

Значущість коефіцієнтів перевіряли по критерію Ст'юдента, а адекватність рівнянь регресії експерименту перевіряли за критерієм Фішера [3].

На практиці не дуже зручно користуватися математичною залежністю представлену в кодованих величинах. З урахуванням (1) отримано наступні рівняння регресії:

- для шкіри натуральної для верху взуття

$$F_{різ} = 2,033 + 0,425 \cdot X_1 - 0,063 \cdot X_2 + 0,338 \cdot X_3 + 0,025 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,075 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,1 \cdot X_2 \cdot X_3 + 1,633 X_1^2 + 0,108 \cdot X_2^2 + 0,158 \cdot X_3^2; \quad (3)$$

- для шкіри натуральної для виготовлення ремін

$$F_{різ} = 5,2 + 2,325 \cdot X_1 - 0,188 \cdot X_2 + 1,213 \cdot X_3 + 0,326 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,575 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,05 \cdot X_2 \cdot X_3 + 3,55 X_1^2 - 0,325 \cdot X_2^2 + 0,675 \cdot X_3^2; \quad (4)$$

- для замітника шкіри з полівінілхлоридним покриттям на нетканій основі

$$F_{різ} = 1,333 + 0,138 \cdot X_1 - 0,125 \cdot X_2 + 0,113 \cdot X_3 + 0,05 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,075 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,15 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,521 X_1^2 + 0,146 \cdot X_2^2 + 0,02 \cdot X_3^2, \quad (5)$$

де X_1, X_2, X_3 приймають значення +1, 0, -1 згідно рівням варіювання відповідних факторів.

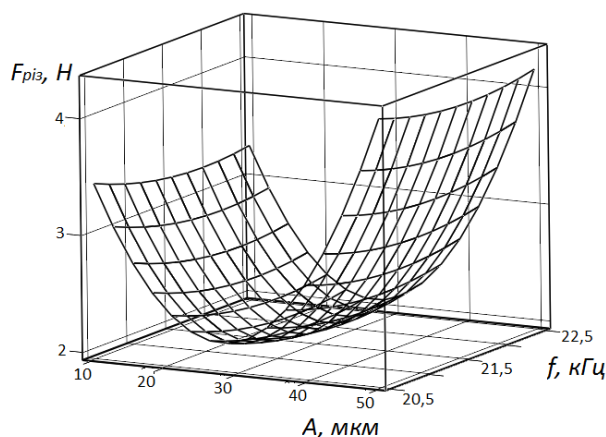


Рис. 4. Графік залежності сили різання від амплітуди і частоти, отриманий за рівнянням (3) при $X_3 = 0$

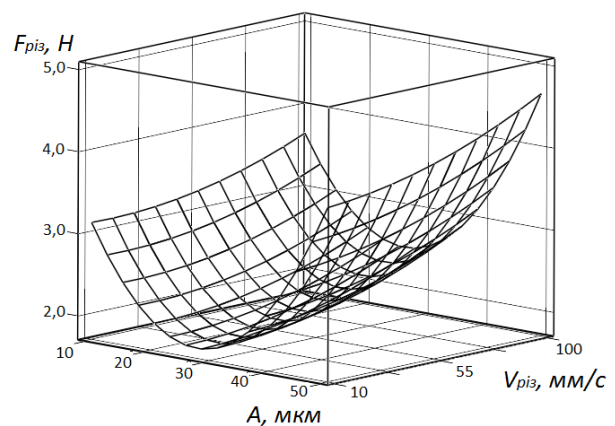


Рис. 5. Графік залежності сили різання від амплітуди і швидкості подання матеріалу на ніж, отриманий за рівнянням (3) при $X_2 = 0$

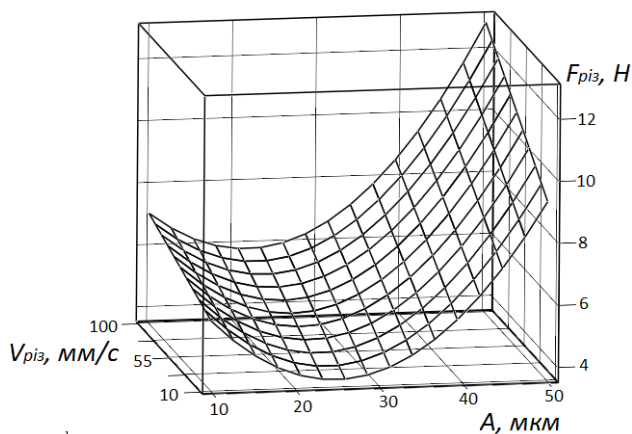


Рис. 6. Графік залежності сили різання від амплітуди і швидкості подання матеріалу на ніж, отриманий за рівнянням (4) при $X_2 = 0$

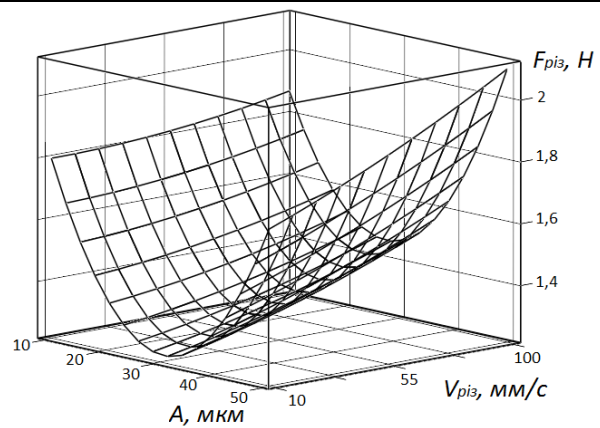


Рис. 7. Графік залежності сили різання від амплітуди і швидкості подання матеріалу на ніж, отриманий за рівнянням (5) при $X_2 = 0$

Як видно з графіків (рис. 4–7), залежність сили різання від амплітуди ультразвукових коливань ножа в радіальному напрямі найбільш значима і має яскраво виражений екстремальний характер при різанні всіх вибраних матеріалів. При збільшенні амплітуди коливань від мінімальної (10 мкм) зусилля різання спочатку зменшуються досягаючи мінімального значення в області 20...35 мкм, а потім зростають. При амплітудах вище 30...35 мкм відбувається інтенсивне розігрівання матеріалів в області різання, а для синтетичної шкіри з полівінілхлоридним покриттям навіть її оплавлення з деструкцією полімеру (про це свідчив інтенсивний запах хлористого водню). Отримані результати експерименту, при варіюванні факторів на трьох рівнях не дають можливість встановити найбільш раціональне значення амплітуди коливань для кожного з матеріалів, а лише підтверджують наявність таких значень, що було нами передбачено при теоретичних дослідженнях [4]. Для уточнення характеру залежності сили різання від амплітуди коливань ножа було проведено однофакторний експеримент, при варіюванні амплітуди в межах 10...40 мкм, з кроком 5 мкм.

В результаті експерименту встановлено, що мінімальне значення сили різання має місце при наступних амплітудах:

- для шкіри натуральної для верху взуття $A_{рац} = 20...25$ мкм, при якій $A_{pi3} = 1,5...1,8$ Н;
- для шкіри натуральної для виготовлення ремін $A_{рац} = 15...20$ мкм, при якій $A_{pi3} = 3,5...4,0$ Н;
- для заміни шкіри з полівінілхлоридним покриттям на нетканій основі $A_{рац} = 10...15$ мкм, при якій $A_{pi3} = 1,1...1,3$ Н.

Висновки

В результаті проведених експериментальних досліджень встановлено що при різанні взуттєвих і шкіргалантерейних матеріалів при коливанні інструменту з ультразвуковою частотою в радіальному напрямі можливе зменшення сил різання в 2...3 рази, що призведе до покращення якості і точності деталей (в результаті зменшення спучування матеріалу перед зоною різання), зменшення технологічних навантажень на відповідні механізми обладнання і підвищення енергетичної ефективності технологічних процесів розкroювання.

Література

1. Кумабэ Д. Вибрационное резание / Кумабэ Д. ; перевод с яп. С.Л. Масленникова ; под ред. И.И. Портнова и В.В. Белова. – М. : Машиностроение, 1985. – 424 с.
2. Макаров Л.О. Акустические измерения в процессах ультразвуковой технологии / Макаров Л.О. – М. : Машиностроение, 1983. – 56 с.
3. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / Спиридонов А.А. – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.
4. Параска Г.Б. Математичне моделювання ультразвукового різання в'язко-пружних матеріалів / Параска Г.Б., Аль-Яфаї Наср, Місяць В.П. // Тези доповідей VIII Українсько-польськ. конф. молодих науковців. – Хмельницький : ХНУ, 2011. – 214 с.

Рецензія/Peer review : 12.2.2016 р.

Надрукована/Printed : 18.4.2016 р.
Рецензент : д.т.н., проф. Параска Г.Б.