

В. В. Ступницький, Я. В. Долиняк
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра технології машинобудування

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ ТА ДЕФОРМАЦІЙ МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ АКУСТИЧНОЇ ТЕНЗОМЕТРІЇ

© Ступницький В. В., Долиняк Я. В., 2015

Наведено результати експериментальних досліджень залишкових напружень та деформацій за допомогою методу ультразвукової акустичної тензометрії. Проаналізовано вплив режимів різання на формування залишкових напружень та деформацій під час механічного оброблення деталі лезовим інструментом.

Ключові слова: технологічний процес, процес різання, напружено-деформований стан, залишкові напруження, деформації, ультразвукова акустична тензометрія, експериментальні дослідження

The results of experimental studies of residual stresses and deformations by the method of ultrasonic acoustic strain gauges. The influence of the cutting, the formation of residual load and deformations during machining tool parts.

Key words: technological process, cutting process, mode of deformation, residual stress, deformation, ultrasonic acoustic, experimental study.

Постановка проблеми. З використанням нових матеріалів висувають нові вимоги до створення деталей. Забезпечення міцності, точності, якості, працездатності деталей багато в чому визначається рівнем напруженого стану, що виникає під час їх виготовлення та експлуатації.

Залишкові напруження та деформація впливають на працездатність деталей. І рівень, і розподіл напружень можуть бути критичними для робочих характеристик і їх потрібно враховувати під час виготовлення виробів. У зв'язку з цим актуальним є дослідження впливу технологічних параметрів на залишкові напруження та деформації, які виникають під час оброблення.

Комплексний підхід до технологічного забезпечення оптимальної працездатності виробів машинобудування базується на оцінці показників якості деталей залежно від технологічних чинників і результатів прогнозування експлуатаційних властивостей деталей залежно від їх показників якості. Кількісні та якісні показники функціональної ефективності виконавчих поверхонь деталей, такі як зносостійкість, втомна міцність, корозійна стійкість, трибомеханічна якість спряжень тощо, значною мірою визначаються показниками мікротопології спряжених поверхонь виробу, якості поверхневого шару (зокрема залишковими напруженнями та деформаціями), макрогеометричними властивостями деталей, що, передусім, є наслідком реалізації технологічного процесу виготовлення цих виробів [3]. У інженерній практиці проектування технологічних процесів виготовлення деталей з заданими параметрами якості ґрунтується, як правило, на технологічних принципах послідовного підвищення точності і зниження шорсткості поверхонь деталей.

Наявність залишкових напружень та пластичних деформацій, генерованих внаслідок процесу різання, підтверджується результатами вимірювання мікротвердості [6]. Тонкий поверхневий шар деталей машин має інші механічні, фізичні, хімічні властивості і напружений стан, ніж в глибинній частині металу. Хоча глибина деформованого поверхневого шару, залежно від виду оброблення, знаходиться в межах від декількох десятитисячних до сотих і десятих часток міліметра, проте ця величина має визначальний вплив на триботехнічні властивості, а відтак і працездатність деталей машин [1]. Як зазначалось вище, відмінність властивостей тонких поверхневих шарів від властивостей серцевини заготовки обумовлена сумою механічних, теплових і фізико-хімічних дій на поверхню металу і формується як результат силового та термодинамічного процесу, що

супроводжує виконання технологічного переходу. Це призводить до зростання вільної енергії поверхні, збільшення її адсорбційної активності і інших змін, що мають істотний вплив на експлуатаційні характеристики деталі [5].

Особливо важливим є те, що пластична деформація супроводжується структурними змінами в матеріалі поверхневого шару. У кристалічній ґратці різко зростає кількість дислокацій, вакансій і інших дефектів. Під час різання відбувається пластична деформація, що супроводжується подрібненням і витягуванням кристалічних зерен у напрямі деформації (утворення текстури), викривленням площин ковзання і появою на них уламків кристалічних зерен, виникненням міжкристалічних напружень [7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тема та напрямок дослідження розглядаються у багатьох літературних джерелах. Серед наявних методів контролю залишкових напружень, одним з найперспективніших є саме цей метод, в якому для оцінювання залишкових напружень використовують зміну швидкості поширення ультразвуку.

Акустична тензометрія базується на явищі акустопружності, що полягає у зміні швидкості поширення пружних хвиль під впливом залишкових напружень, дефектів та деформацій поверхневого шару деталей [4]. Під час деформації розтягу швидкість проходження акустичної хвилі збільшується, а деформації стиску – зменшується. Найскладнішим етапом експериментальних досліджень є врахування похибок дослідження, що зумовлені внутрішніми дефектами, зміною текстури та власною анізотропією дослідного взірця. Наприклад, текстура, що виникає під час прокатування дюралюмінія Д16, може викликати зміну швидкості до 0,26 %, а зміна швидкості під впливом залишкових напружень – близько 0,08 %, для сталі 45 – 0,64 та 0,04 %, відповідно [8].

Мета та постановка задачі експерименту. Основною метою проведення експериментальних досліджень є оцінювання взаємного впливу основних технологічних параметрів (режимів різання) на формування залишкових напружень та деформацій під час механічного оброблення деталі лезовим інструментом. Складний математичний апарат, що використовувався для виконання систем диференційних рівнянь та аналізу збіжності результатів МСЕ, передбачає використання наближених методів обчислення, що може позначитись на точності результатів розрахунку. Тому для верифікації адекватності реальних даних та результатів імітаційного моделювання необхідно виконати низку експериментальних досліджень [2].

Вплив режимів різання на формування залишкових напружень та деформацій під час механічного оброблення деталі подають, як правило, у вигляді статичних залежностей [9], заснованих на проведенні експериментів за методикою одно- або багатофакторного експерименту. Переважним є багатофакторне планування експерименту [10], що дозволяє у разі проведення малої кількості дослідів у граничних точках ділянки експериментування отримувати у вигляді математичних моделей вичерпний опис досліджуваного процесу. Залежність стискаючих чи розтягувальних залишкових напружень σ_{\pm} від досліджуваних чинників: швидкості (V), подачі (S) та глибини різання (t) матиме вигляд:

$$\sigma_{\pm} = C_M \cdot V^{\alpha_{M1}} \cdot S^{\alpha_{M2}} \cdot t^{\alpha_{M3}}, \quad (1)$$

де C_M – коефіцієнт, що враховує сумарний вплив неврахованих у рівнянні (1) чинників; α_{M1} , α_{M2} , α_{M3} – показники ступеня при змінних чинниках.

Для рівняння (1) логарифмуванням слід привести до простішого вигляду рівняння лінійної регресії, які для 3-факторного експерименту матимуть вигляд:

$$y_M = b_{M0} + b_{M1} x_1 + b_{M2} x_2 + b_{M3} x_3 + b_{M12} x_1 x_2 + b_{M13} x_1 x_3 + b_{M23} x_2 x_3 + b_{M123} x_1 x_2 x_3, \quad (2)$$

де $y_M = \lg(\sigma_{\pm})$ – логарифмічний вираз параметра σ_{\pm} (відгук моделі); x_1 , x_2 , x_3 – змінні чинники в закодованому вигляді, відповідні режимам різання V , S і t , відповідно; b_{M0} , b_{M1} , b_{M2} , b_{M3} – коефіцієнти регресії при змінних чинниках, що є оцінками їх значущості; b_{M12} , b_{M13} , b_{M23} , b_{M123} – коефіцієнти регресії, що характеризують значимість взаємного впливу змінних чинників на досліджуваний процес.

Кодування змінних чинників x_1, x_2, x_3 в рівнянні регресії (2) здійснюється за такими залежностями:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{2(\lg V - \lg V_{\max})}{\lg V_{\max} - \lg V_{\min}} + 1 \\ x_2 &= \frac{2(\lg S - \lg S_{\max})}{\lg S_{\max} - \lg S_{\min}} + 1 \\ x_3 &= \frac{2(\lg t - \lg t_{\max})}{\lg t_{\max} - \lg t_{\min}} + 1 \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

де $V_{\max}, S_{\max}, t_{\max}$ – відповідають максимальним значенням, а $V_{\min}, S_{\min}, t_{\min}$ – мінімальним значенням змінних чинників під час проведення дослідів у граничних точках ділянки експериментування.

Після знаходження коефіцієнтів регресії $b_{M0}, b_{M1}, b_{M2}, b_{M3}$ в рівнянні (2) оцінюють їх значущість з вилученням з розгляду незначущих коефіцієнтів. Адекватність отриманої залежності (моделі) досліджуваному процесу оцінюють за F-критерієм Фішера [10], розрахункове значення якого повинне бути більше від його табличного значення для прийнятих умов експериментування.

Опис методики експериментальних акустотензометричних досліджень. Акустична тензометрія базується на явищі акустопружності, що полягає у зміні швидкості поширення пружних хвиль під впливом залишкових напружень, дефектів та деформацій поверхневого шару деталей [4]. Закон Гука, згідно з яким напруження σ і деформація ε є пропорційними, виконується наближено. Точнішою є залежність ступеневого вигляду:

$$\sigma = C_1 \cdot \varepsilon + C_2 \cdot \varepsilon^2, \quad (4)$$

де C_1 – модуль пружності; C_2 – коефіцієнт Мурнагана.

Зміна швидкості проходження акустичної хвилі Δc вздовж об'єкта дослідження є пропорційною до напруження або деформації поверхневого шару:

$$\Delta c / c = \varepsilon \cdot \frac{C_2}{C_1} \approx \sigma \cdot \frac{C_2}{C_1^2}. \quad (5)$$

Під час деформації розтягу швидкість збільшується, а деформації стиску – зменшується. Найскладнішим етапом експериментальних досліджень є врахування похибок дослідження, що викликані внутрішніми дефектами, зміною текстури та власною анізотропією дослідного взірця. Наприклад, текстура, що виникає під час прокатування дюралюмінію Д16, може викликати зміну швидкості до 0,26 %, а зміна швидкості під впливом залишкових напружень – близько 0,08 %, для сталі 45 – 0,64 та 0,04 %, відповідно [11]. З метою анігіляції цих чинників, лабораторні взірці підлягають відпалу. Отже, залишкові напруження практично пропадають, а мікрodefекти поверхневого шару залишаються. Тоді зміна швидкості проходження акустичної хвилі:

$$\Delta c = c_1 - c_2, \quad (6)$$

де c_1, c_2 – швидкість проходження арктичної хвилі до і після відпалу дослідного взірця.

Для експериментальних досліджень використовувався метод контролю за допомогою акустичних хвиль, генерованих імпульсним методом збудження ультразвукових коливань. Використання імпульсного сигналу дозволяє застосувати жорстке, без демпфуючих прокладок, з'єднання п'єзоперетворювачів один з одним і підвищити тим самим точність вимірювань швидкості звуку за часом проходження імпульсом фіксованої відстані між випромінюючим і приймальним п'єзоперетворювачем. Принцип дії імпульсного приладу з осцилоскопічною індикацією (рис. 1) полягає в такому. Генератор імпульсів 5 формує короткі імпульси амплітудою 35–100 В, які подаються на випромінюючий п'єзоперетворювач 2. Ультразвуковий імпульс проходить по досліджуваному взірці 1 і через проміжок часу τ досягає приймального п'єзоперетворювача 2, де трансформується у електричний імпульс, який посилюється підсилювачем 9 і подається на вхід 10 електронно-променевого осцилографа 8. При постійній швидкості розгортки положення імпульсу на екрані залежить від часу проходження ультразвуком відстані між п'єзоперетворювачами 2 і 3, а отже, від швидкості поширення ультразвуку у дослідному взірці. Запуск очікуваної розгортки

осцилографу відбувається не в момент формування в блоці 5 імпульсу, а після закінчення проміжку часу τ_0 , меншого за час τ проходження ультразвуковим імпульсом відстані між п'єзоперетворювачами (рис. 1).

Тимчасова затримка сигналу здійснюється спеціальним блоком затримки часу 6, який запускається імпульсами, що надходять з генератора 5, і формує прямокутний імпульс тривалістю τ_0 . Після закінчення часу затримки на виході осцилографа 11 з'являється імпульс негативної полярності, перетворений формувачем імпульсів 7 в імпульс позитивної полярності, який і запускає генератор очікуваної розгортки. Введення блока затримки часу дозволяє істотно збільшити швидкість розгортки і, отже, підвищити точність вимірювань.

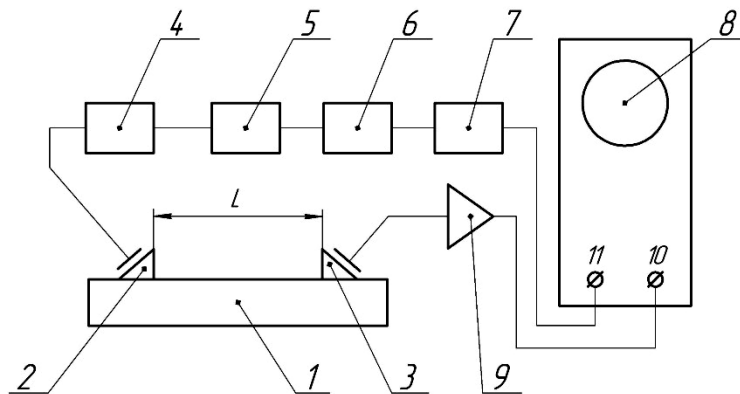


Рис. 1. Принципова схема експериментальної установки:

- 1 – досліджуваний зразок; 2, 3 – випромінювальний і прийомний п'єзоперетворювачі;
 4 – тригер; 5 – генератор імпульсів; 6 – блок затримки часу;
 7 – формувач імпульсів; 8 – електронно-променевий осцилограф;
 9 – підсилювач; 10 – вхідний та вихідний коннектор осцилографа

Якщо позначити τ' час від моменту включення розгортки до появи на екрані осцилографа імпульсу від приймального п'єзоперетворювача, то час проходження імпульсу становитиме:

$$\tau = \tau_0 + \tau' . \quad (7)$$

Відстань x , яку пройшов промінь на екрані осцилографа від моменту запуску генератора розгортки до приходу імпульсу з приймального п'єзоперетворювача, дорівнюватиме

$$x = \Psi \cdot \tau' = \Psi \cdot (\tau - \tau_0) , \quad (8)$$

де Ψ – швидкість розгортки.

При цьому:

$$\tau = \frac{L}{c} , \quad (9)$$

де L – відстань між випромінювальним і прийомним п'єзоперетворювачами; c – швидкість поширення ультразвуку у взірці.

Підставивши (9) у рівняння (8), отримаємо:

$$x = \Psi \cdot \left(\frac{L}{c} - \tau_0 \right) . \quad (10)$$

Очевидно, точність вимірювання буде тим вища, чим більша величина x , але це значення не може перевищувати розмірів екрана трубки осцилографа. За заданих розмірів екрана більшу точність можна отримати, збільшуючи швидкість розгортки Ψ за зменшення часу τ_0 . Зафіксований на екрані електронно-променевої трубки осцилографа 8 максимум сигналу доводять до наперед заданого стандартного рівня (за допомогою атенюатора та регулятора “Амплітуда”). Стандартний рівень може дорівнювати 1/2 висоти екрана дефектоскопа, або ж 8-ми великим поділкам екрана (для дефектоскопа УД2-12 це відповідає показам БЦВ 00.00 – 00.20). Значення послаблення, за

якого рівень сигналу на екрані ЕПТ дорівнює стандартному, фіксують і приймають за браковочний для певних умов контролю. Сканування виконують двічі в двох взаємно перпендикулярних напрямках. Відстань зміщення перетворювача під час сканування не повинна перевищувати 1/2 ширини п'єзоелемента. Крім того, сканують поздовжньо-поперечним переміщенням перетворювача з його одночасним поворотом на кут 10–15° навколо вертикальної осі.

Планування та опрацювання результатів експериментальних досліджень. Приймаємо умови проведення експерименту – дослідження технологічної операції високошвидкісного фрезерування деталі з алюмінієвого сплаву AL 6061 фрезою CoroMill 300 (Ø200 мм) з твердосплавною пластиною R300-1040D-PL S30T ($\gamma = 8^\circ$, $\alpha = 15^\circ$). Діапазони досліджуваних чинників є в інтервалі: швидкості різання $V = 600\text{--}1000$ м/хв, подачі $S = 0,05\text{--}0,5$ мм/зуб та глибини різання $t = 0,25\text{--}4$ мм. Ці значення змінних чинників і були прийняті в експерименті як граничні точки ділянки експериментування.

Факторний простір прийнятої ділянки експериментування представлений на рис. 2 у вигляді куба, побудованого на координатних осях змінних чинників V , S і t .

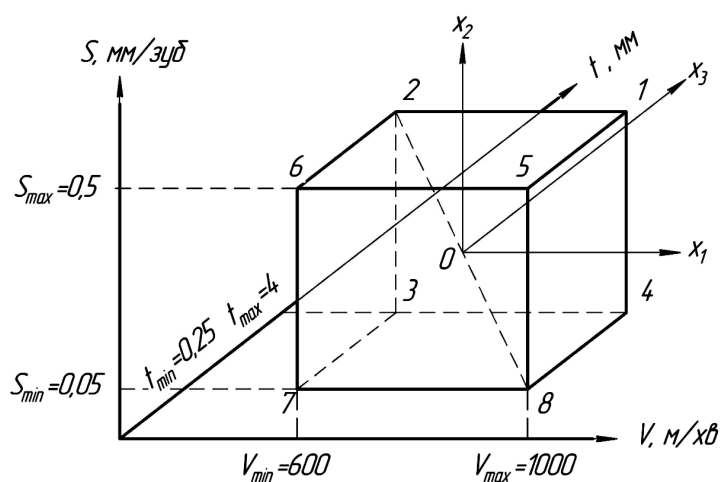


Рис. 2. Графічна інтерпретація факторного простору з граничними точками (1–8) ділянки експериментування

За методикою проведення експерименту [10] перенесемо початок координат у центр куба (т. 0) і присвоїмо новим осям значення x_1 , x_2 , x_3 , відповідні напрямкам векторів n , v і V . Точка “0” нових координат повинна відповідати основному “нуль”-рівню. Тоді максимальні значення змінних чинників V , S і t , відповідно, закодовані як x_1 , x_2 , x_3 , в новій системі прийматимуть позначення як “+1” або просто “+”, а мінімальні значення – як “-1” або просто “-”. Точки вершини куба 1–8, що становлять максимально-мінімальні значення змінних чинників, є граничними точками ділянки експериментування в досліджуваному факторному просторі. У табл. 1 наведені числові значення рівнів варіювання і коди змінних чинників.

Таблиця 1

Рівні варіювання і схема кодових позначень змінних чинників

Рівень варіювання	Швидкість різання		Подача		Глибина різання	
	V , м/хв	x_1	S , мм	x_2	t , мм	x_3
Основний	800	0	0,25	0	2,0	0
Верхній	1000	+1	0,5	+1	4,0	+1
Нижній	600	-1	0,05	-1	0,25	-1

Згідно з методикою проведення повного факторного експерименту з трьома змінними чинниками на двох (max–min) рівнях потрібно виконати (за формулою [10] $N = 2^3$) вісім незалежних дослідів. Кожен з дослідів повинен відповідати граничній точці експериментування. Відповідно до прийнятої схеми розташування точок була намічена послідовність проведення дослідів.

У табл. 2 наведена матриця плану проведення експерименту, в якого рядки (1–8) відповідають дослідом, що проводяться, а стовпці x_j – чинникам незалежного і взаємного їх впливу за структурою рівняння. Знаку (+) відповідає максимальне значення чинника в експерименті, знаку (–) – мінімальне значення. Табл. 3 доповнена також даними розрахунку математичної моделі і є узагальнювальною таблицею, на яку надалі будуть відповідні посилання.

З метою підтвердження достовірності отриманого результату по кожному незалежному досліді, за рекомендаціями [178, 251] було проведено $k = 3$ паралельних дослідів з вимірюванням кожного разу параметра залишкового напруження обчисленням його середнього арифметичного значення, як $\overline{\sigma_{\pm}} = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^3 \sigma_{\pm_k}$.

Враховуючи побудову регресійного рівняння в логарифмічних координатах, отримані експериментально значення параметра σ_{\pm} залишкового напруження, слід подавати як логарифм їх значень з символом y_{ik} , а середнє арифметичне – $\overline{y_i}$.

Оцінюють відтворюваність паралельних дослідів у логарифмічному виразі за G -критерієм Кохерна [178], згідно з яким гіпотеза відтворюваності дослідів приймається, якщо розрахункове значення G_p -критерію буде менше від його табличного значення, тобто:

$$G_p \leq G_T(p, N, f_i), \quad (11)$$

де p – рівень довірчої вірогідності, що приймається в експерименті; N – загальна кількість незалежних дисперсій (кількість дослідів); f_i – число ступенів вільності в кожній з них.

Для прийнятих в експерименті умов дослідів: $p = 0,95$; $N = 8$; $f_i = k - 1 = 3 - 1 = 2$ табличне значення критерію Кохерна становить: $G_T(0,95; 8; 2) = 0,5157$.

Розрахункове значення G_p -критерію Кохерна визначається за формулою

$$G_p = \frac{S_{i\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (12)$$

де S_i^2 – дисперсія відтворюваності кожного i -го незалежного досліді; $S_{i\max}^2$ – максимальне значення дисперсії відтворюваності всіх дослідів; N – загальна кількість дослідів ($N = 8$).

Дисперсія відтворюваності по кожному досліді визначається як:

$$S_i^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{k=1}^3 (y_{ik} - \overline{y_i})^2, \quad (13)$$

де $k = 3$ – кількість паралельних дослідів.

Для систематизації розрахунків результати вимірювань параметра залишкового напруження σ_{\pm} , в експерименті оформлені і внесені до табл. 2.

Таблиця 2

Результати досліджень залишкових напружень і оцінка їх відтворюваності у досліді

№ досл.	Параметр σ_{\pm_k}				Логарифм параметра σ_{\pm_k}				Дисперсія відтворюваності S_i^2
	σ_{\pm_1}	σ_{\pm_2}	σ_{\pm_3}	$\overline{\sigma_{\pm_k}}$	y_{i1}	y_{i2}	y_{i3}	$\overline{y_{ik}}$	
1	40,1	48,3	46,3	44,90	1,60	1,68	1,67	1,651	0,00179
2	34,3	39,2	31,7	35,07	1,54	1,59	1,50	1,543	0,00217
3	18,4	20,3	15,2	17,97	1,26	1,31	1,18	1,251	0,00408
4	23,5	29,4	21,9	24,93	1,37	1,47	1,34	1,393	0,00446
5	31,3	35,8	29,4	32,17	1,50	1,55	1,47	1,506	0,00191
6	20,4	18,5	22,3	20,40	1,31	1,27	1,35	1,308	0,00165
7	10,6	8,4	11,3	10,10	1,03	0,92	1,05	1,001	0,00459
8	16,5	19,1	15,6	17,07	1,22	1,28	1,19	1,231	0,00206
Сума дисперсій $\sum_{i=1}^8 (S_i^2)$									0,02271

У табл. 2 наведені результати вимірювання залишкових напружень і розрахунок дисперсій відтворюваності для дослідів № 1–8.

Повний розрахунок дисперсій відтворюваності в експерименті наведений в узагальнювальній таблиці матриці планування експерименту (табл. 3), з якої виходить, що максимальне значення дисперсії становить $S_{i_{\max}} = 0,0045$ (дослід № 4), а сума дисперсій $\sum_1^8 (S_i^2) = 0,0227$.

Розрахункове значення G_p -критерію Кохерна за даними табл. 3 становить

$$G_p = \frac{0,0045}{0,0227} = 0,198,$$

що менше від табличного його значення, яке дорівнює $G_m(0,95; 8; 2) = 0,5157$.

Отже, гіпотеза відтворюваності дослідів у проведеному експерименті приймається, і отримані результати можна використовувати для подальших розрахунків параметрів моделі.

Розраховують коефіцієнтів регресії b_0, b_1, b_2, b_{123} підсумовуванням по стовпцях матриці (табл. 3) експериментально набутих значень y_i з урахуванням знака (± 1) при змінних x_{ji} відповідного стовпця за такими залежностями:

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{y}_i; \\ b_j &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ij} \cdot \bar{y}_i \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

де $N = 8$ – кількість незалежних дослідів експерименту.

Оцінюють значущість коефіцієнтів регресії за допомогою t -критерію Стьюдента. Коефіцієнт регресії b_j статично значущий, якщо виконується умова [10]:

$$b_j \geq \pm t_{T(p,f,y)} S_{b_j}, \quad (15)$$

де $t_{m(pfy)}$ – табличне значення критерію Стьюдента; S_{b_j} – середнє квадратичне відхилення коефіцієнтів регресії.

За рівня довірчої вірогідності $p = 0,95$ і числа ступенів вільності дисперсії адекватності $f_y = N(k - 1) = 8 \cdot (3 - 1) = 16$, табличне значення критерію Стьюдента становить $t_{m(0,95, 0; 16)} = 2,12$ [10].

Середнє квадратичне відхилення коефіцієнтів регресії визначається з виразу:

$$S_{b_j} = \sqrt{\frac{S_{y_i}^2}{N}}. \quad (16)$$

Таблиця 3

Матриця плану, результати експерименту і їх математичне опрацювання

№ дослідів	Матриця плану експерименту $N = 2^3$								$\bar{\sigma}_{\pm k}$	\bar{y}_i	\hat{y}	$(\bar{y}_i - \hat{y})$	S_i^2
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$					
1	+	+	+	+	+	+	+	+	44,90	1,651	1,6522	0,0014	0,00179
2	+	-	+	+	-	-	+	-	35,07	1,543	1,5449	0,0017	0,00217
3	+	+	-	+	-	+	-	-	17,97	1,251	1,2545	0,0031	0,00408
4	+	-	-	+	+	-	-	+	24,93	1,393	1,3968	0,0035	0,00446
5	+	+	+	-	+	-	-	-	32,17	1,506	1,5074	0,0015	0,00191
6	+	-	+	-	-	+	-	+	20,40	1,308	1,3096	0,0013	0,00165
7	+	+	-	-	-	-	+	+	10,10	1,001	1,0043	0,0034	0,00459
8	+	-	-	-	+	+	+	-	17,07	1,231	1,2321	0,0016	0,00206
$\sum_{N=1}^8$	10,9	-0,07	1,13	0,79	0,68	-0,01	-0,03	10,9	Рівняння регресії при $y = 1,363 + 0,141x_2 +$ $0,099x_3 - 0,084x_1x_2 +$ $+ 1,363 x_2x_3$			0,0175	0,02271
$\frac{1}{N} \sum_{N=1}^8$	b_0	b_1	b_2	b_3	b_1b_2	b_1b_3	b_2b_3	$b_1b_2b_3$				S_{a0}^2	$S_{\bar{y}_i}^2$
	1,36	-0,008	0,14	0,099	0,084	-0,001	-0,004	1,33		0,0011	0,0028		

де $S_{y_i}^2$ – оцінка середнього значення дисперсії відтворюваності дослідів, тобто,

$$S_{y_i}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i^2), \quad (17)$$

де S_i^2 – дисперсія відтворюваності паралельних дослідів (див. табл. 2).

За результатами експерименту, наведеними в табл. 3, оцінимо значущість розрахованих коефіцієнтів. Середнє значення дисперсії відтворюваності паралельних дослідів в експерименті становило $S_{y_i}^2 = 0,0076$. Середньоквадратичне відхилення коефіцієнтів регресії в цьому випадку буде:

$$S_{b_j} = \sqrt{\frac{0,0076}{8}} = 0,031.$$

Статично значущі коефіцієнти регресії повинні задовольняти умову:

$$b_j \geq \pm 2,12 \cdot 0,031 = \pm 0,065.$$

Як видно з табл. 3, це значення інтервалу задовольняють коефіцієнти: $b_0 = 1,363$; $b_2 = 0,141$; $b_3 = 0,099$; $b_{12} = 0,084$, $b_{123} = 1,363$.

Вплив решти коефіцієнтів: b_1 , b_{23} та b_{13} , а отже, і взаємний вплив чинників x_1 , x_2x_3 та x_1x_3 на значення залишкових напружень є незначним, їх вилучають з рівняння регресії. З урахуванням оцінки значущості коефіцієнтів рівняння регресії набуде вигляду:

$$y = 1,363 + 0,141x_2 + 0,099x_3 - 0,084x_1x_2 + 1,363 x_2x_2x_3. \quad (18)$$

Перевірка адекватності отриманої залежності (18) до експериментально отриманих даних за значенням залишкового напруження σ_{\pm} здійснюється за F-критерієм Фішера, розрахункове значення якого не повинне бути менше від його табличного значення за прийнятих умов експерименту, тобто

$$F_p \geq F_T(p; f_{ad}; f_{\bar{y}}). \quad (19)$$

За прийнятих в експерименті відомих $p = 0,95$, $f_{\bar{y}} = 16$ і новій умові – числі ступенів вільності дисперсії адекватності, визначуваному, як $f_{ad} = N - (k + 1) = 8 - (3 - 1) = 4$, табличне значення критерію Фішера становить $F_{(0,95;4;16)} = 3,01$ [10]. Розрахункове значення критерію Фішера визначається з порівняння оцінок дисперсій:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_{\bar{y}}^2}, \quad (20)$$

де S_{ad} – дисперсія адекватності; $S_{\bar{y}}^2$ – середнє значення дисперсії відтворюваності дослідів.

Дисперсія адекватності розраховується за формулою:

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{f_{ad}} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y})^2 = 0,02271 \quad (21)$$

$f_{ad} = N - (k + 1)$ – число ступенів вільності дисперсії адекватності.

Розрахункові значення відгуків моделі y_i визначаються підсумовуванням по рядках всіх значущих коефіцієнтів b_j з урахуванням знака (± 1) при змінних чинниках x_{ji} , що обумовлені режимами проведення дослідів. Результати розрахунку відгуків та їх розбіжності з експериментальними даними оформлені у вигляді табл. 3. Дисперсія адекватності математичної моделі з урахуванням певного числа ступенів її вільності, як $f_{ad} = 4$, становитиме

$$S_{ad} = \frac{0,0175}{4} = 0,0043.$$

Розрахункове значення задовольняє F-критерію Фішера, оскільки

$$F_p = \frac{0,0227}{0,0043} = 5,27 > F_T(p; f_{ad}; f_{\bar{y}}) = 3,01.$$

Ця умова є основою для прийняття моделі (18) як робочої при опису залежності параметра залишкових напружень від режимів різання в дослідному факторному просторі.

Висновки. Згідно з проведеними експериментальними дослідженнями подано характеристику впливу основних технологічних параметрів (режимів різання) на залишкові напруження та деформації під час механічного оброблення деталі лезовим інструментом.

1. Ступницький В. В. Дослідження напружено-деформованого стану деталей машин під час їх механічного оброблення у зоні стружкоутворення / В. В. Ступницький // Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Динаміка, міцність та проектування машин і приладів”. - Львів, 2012. - № 730. – С. 125–129. 2. Ступницький В. В. Моделювання напружено-деформованого стану матеріалу в зоні різання для структурно-параметричної оптимізації технологічної операції токарного оброблення / В. В. Ступницький // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні і приладобудуванні”. - 2011. – № 713. – С. 45–49. 3. Ступницький В. В. Проектування функціонально-орієнтованих технологій механічного оброблення деталей засобами паралельного інжинірингу / В. В. Ступницький // Вісник Донецького національного технічного університету “Прогресивні технології і системи машинобудування”. – 2013. - Вип. 1 (45). – 2 (46). - С. 249–256. 4. Карпаш А. М. Аналіз відомих методів контролю фізико-механічних характеристик металу / А. М. Карпаш // Нафтогазова енергетика. Енергетика, контроль та діагностика об’єктів нафтогазового комплексу. – 2012. - № 1(17). - С. 8–23. 5. Яцерицын П. И. Теория резания / П. И. Яцерицын, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – Минск: Новое знание, 2006. – 512 с. 6. Технологические остаточные напряжения / [А. В. Подзей, А. М. Сулима, М. И. Евстигнеев и др.]. - М.: Машиностроение, 1973. - 216 с. 7. Технологические остаточные напряжения / [А. В. Подзей, А. М. Сулима, М. И. Евстигнеев и др.]. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с. 8. Муравьев В. В. Взаимосвязь скорости ультразвука в сталях с режимами их термической обработки / В. В. Муравьев // Дефектоскопия. – 1989. – № 2. – С. 66–68. 9. Рыжов Э. В. Математические методы в технологических исследованиях / Э. В. Рыжов, О. А. Горленко. – К.: Наукова думка, 1990. – 184 с. 10. Кузнецова Е. В. Математическое планирование эксперимента / Е. В. Кузнецова. - Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2011. – 35 с. 11. Муравьев В. В. Взаимосвязь скорости ультразвука в сталях с режимами их термической обработки / В. В. Муравьев // Дефектоскопия. – 1989. – № 2. – С. 66–68. 12. Карпаш А. М. Аналіз відомих методів контролю фізико-механічних характеристик металу / А. М. Карпаш // Нафтогазова енергетика. Енергетика, контроль та діагностика об’єктів нафтогазового комплексу. – 2012. - № 1(17). - С. 8–23.