

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 в процесі механічного оброблення деталі лезовим інструментом.

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.

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

Залишкові напруження та деформація впливають на працездатність деталей. Як рівень так і розподіл напружень, може бути критичним для робочих характеристик і повинен враховуватися при виготовленні виробів. У зв'язку з цим, постало питання, щодо дослідження впливу технологічних параметрів на залишкові напруження та деформації, які виникають при обробленні.

Комплексний підхід до технологічного забезпечення оптимальної працездатності виробів машинобудування базується на оцінці показників якості деталей в залежності від технологічних чинників і результатів прогнозування експлуатаційних властивостей деталей в залежності від їх показників якості. Кількісні та якісні показники функціональної ефективності виконавчих поверхонь деталей, такі як зносостійкість, втомна міцність, корозійна стійкість, трибомеханічна якість спряжень тощо, в значній мірі визначаються показниками мікротопології спряжених поверхонь виробу, якості поверхневого шару (в. т.ч. залишковими напруженнями та деформаціями), макрогеометричними властивостями деталей, що, в першу чергу, 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 долів 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. При різанні 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 напрямки дослідження розглядаються у багатьох літературних джерелах. Серед існуючих методів контролю залишкових напружень, одним з найбільш перспективних є саме даний метод, в якому для оцінки залишкових напружень використовують зміну швидкості розповсюдження 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]. При деформації розтягу швидкість проходження акустичної хвилі збільшується, а при деформації стиску – зменшується. Найбільш складним етапом експериментальних досліджень є врахування похибок дослідження, що викликані внутрішніми дефектами, зміною текстури та власною анізотропією дослідного зрізця. Наприклад, текстура, що виникає при прокатці 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 оцінка взаємного впливу основних технологічних параметрів (режимів різання) на формування залишкових напружень та деформацій в процесі механічного оброблення деталі лезовим інструментом. Складний математичний апарат, що використовувався для вирішення систем диференціальних 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 провести ряд експериментальних досліджень [2].

Вплив режимів різання на формування залишкових напружень та деформацій в процесі механічного оброблення деталі представляють, як правило, у вигляді статичних залежностей [9], заснованих на проведенні експериментів по методиці одно- або багатофакторного експерименту. Переважним є багатофакторне планування експерименту [10], що дозволяє при проведенні малого числа дослідів в граничних точках області експериментування отримувати у вигляді математичних моделей вичерпний опис досліджуваного процесу. Залежність стискаючих чи розтягувальних залишкових напружень $\sigma_{\pm}$ від досліджуваних чинників: швидкості (V), подачі (S) та глибини різання (t) буде мати 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 в рівнянні (1) чинників;

α_{M1} , α_{M2} , α_{M3} – показники ступеня при змінних чинниках.

Для рівняння (1) шляхом логарифмування слід привести в більш простий вид рівняння лінійної регресії, які для 3-факторного експерименту матимуть вигляд:

$$y_M = b_{M0} + b_{M1}x_1 + b_{M2}x_2 + b_{M3}x_3 + b_{M12}x_1x_2 + b_{M13}x_1x_3 + b_{M23}x_2x_3 + b_{M123}x_1x_2x_3 \quad (2)$$

де $y_M = \lg(\sigma_{\pm})$ – логарифмічний вираз параметра $\sigma_{\pm}$ (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 по наступних залежностях:

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

де $V_{\max}$, $S_{\max}$, $t_{\max}$ відповідають максимальним значенням, а $V_{\min}$, $S_{\min}$, $t_{\min}$ – мінімальним значенням змінних чинників при проведенні дослідів в граничних точках області експериментування.

Після знаходження коефіцієнтів регресії b_{M0} , b_{M1} , b_{M2} , b_{M3} в рівнянні (2) здійснюють оцінку їх значущості з виключенням з розгляду незначущих коефіцієнтів. Адекватність отриманої залежності (моделі) досліджуваному процесу оцінюють по F-критерію Фішера [10], розрахункове значення якого повинне бути більше 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 якого напруження σ і деформація ε є пропорційними, виконується наближено. Більш точною є залежність ступеневого вигляду:

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

де C_1 - модуль пружності, а C_2 - коефіцієнт Мурнагана.

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

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

При деформації розтягу швидкість збільшується, а при деформації стиску – зменшується. Найбільш складним етапом експериментальних досліджень є врахування похибок дослідження, що викликані внутрішніми дефектами, зміною текстури та власною анізотропією дослідного зрізця. Наприклад, текстура, що виникає при прокатці 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 [11]. З метою анігіляції цих чинників, лабораторні зрізці підлягають відпалу. Таким чином, залишкові напруження практично пропадають, а мікродфекти 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 зрізця.

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 фіксованого відстані між випромінюючим і приймальним п'єзоперетворювачем. Принцип дії імпульсного приладу з осцилокопічною індикацією (рис. 1) полягає в наступному. Генератор імпульсів 5 формує короткі імпульси амплітудою 35 ... 100 В, які подаються на випромінюючий п'єзоперетворювач 2. Ультразвуковий імпульс проходить по

досліджуваному зрізці 1 і через проміжок часу τ досягає приймального п'єзоперетворювача 2, де трансформується 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 зрізці. Запуск очікуваної розгортки осцилографа 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 імпульсом, що надходить 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 блоку затримки часу дозволяє істотно збільшити швидкість розгортки і тим самим підвищити точність вимірювань.

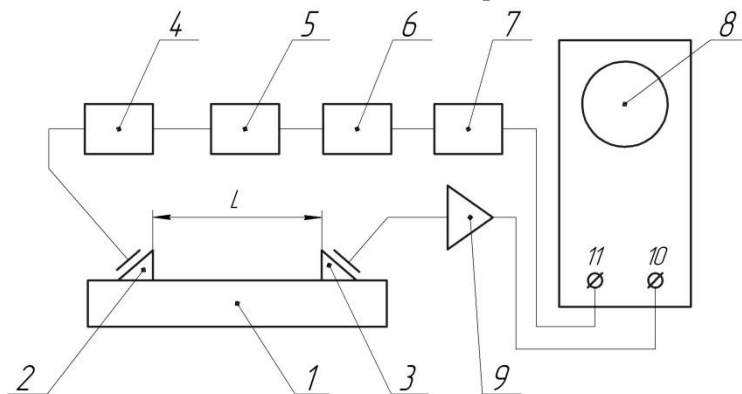


Рис.1. Принципова схема експериментальної установки:

1 – досліджуваний зразок; 2,3 - випромінюючий 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 конектор 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 , що 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 випромінюючим і прийомним п'єзоперетворювачами;

c – швидкість поширення ультразвуку у зрізці.

Підставивши **Ошибка! Источник ссылки не найден.** у рівняння **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, отримаємо:

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

Очевидно, точність вимірювання буде тим вище, чим більша величина x , але це значення не може перевищувати розмірів екрану трубки осцилографа. При заданих розмірах екрану більшу точність можна отримати, збільшуючи швидкість розгортки Ψ при зменшенні 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 екрану дефектоскопа, або ж 8-ми великим поділкам екрану (для дефектоскопа УД2-12 це відповідає показанням БЦВ 00.00 - 00.20). Значення послаблення, за якого рівень сигналу на екрані ЕПТ дорівнює стандартному, фіксують і приймають за браковочний для даних умов контролю. Сканування виконують двічі в двох взаємноперпендикулярних напрямках. Відстань зміщення перетворювача під час сканування не повинна перевищувати 1/2 ширини п'єзoeлементу. Крім того, сканування здійснюють шляхом поздовжньо-поперечного переміщення 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 ($\varnothing 200$ мм) з твердосплавною пластиною R300-1040D-PL S30T ($\gamma = 8^\circ$, $\alpha = 15^\circ$). Діапазони досліджуваних чинників знаходяться в інтервалі: швидкості різання $V = 600 \dots 1000$ м/хв, подачі $S = 0,05 \dots 0,5$ мм/зуб та глибини різання $t = 0,25 \dots 4$ мм. Ці значення змінних чинників і були прийняті в експерименті як граничні точки області експериментування.

Факторний простір прийнятої області експериментування представлений на (Рис.2.) у вигляді куба, побудованого на координатних осях змінних чинників V , S і t .

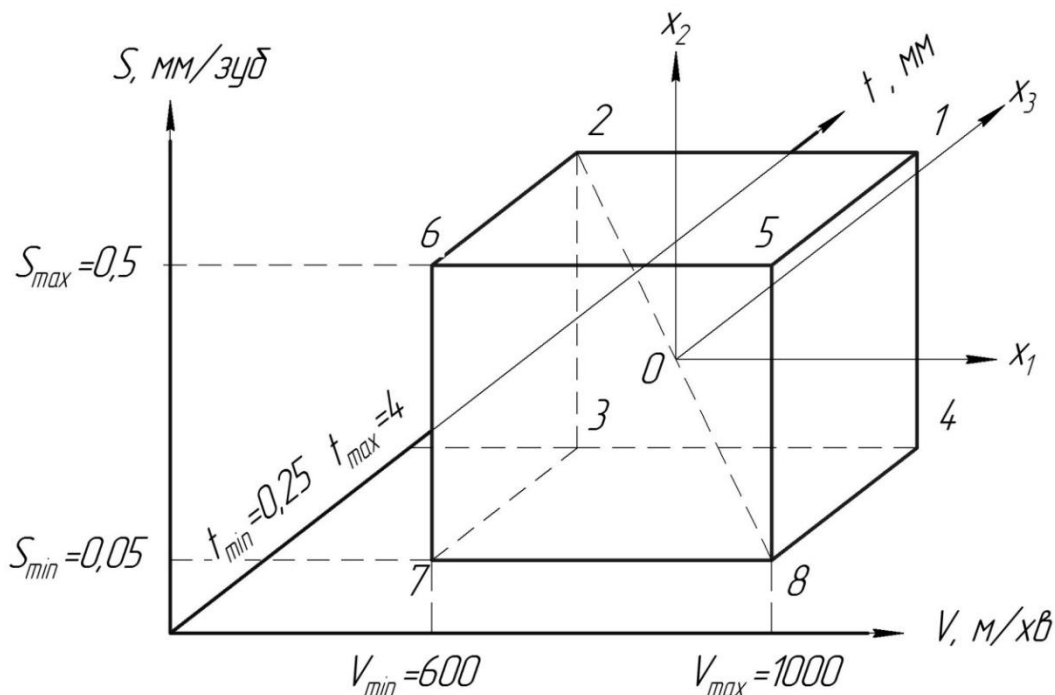


Рис.2. Графічна інтерпретація факторного простору з граничними точками (1-8) області експериментування.

По методиці проведення експерименту [10] перенесемо початок координат в центр куба (т.

0) і присвоємо новим осям значення x_1, x_2, x_3 , відповідні напрямам 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 представляють максимально-мінімальні значення змінних чинників, є граничними точками області експериментування в досліджуваному факторному просторі. У табл.1. наведені числові значення рівнів варіювання і коди змінних чинників.

Табл. 1.

Рівні варіювання і схема кодових позначень змінних чинників

Рівень варіювання	Швидкість різання		Подача		Глибина різання	
	$V, v/\text{хв}$	x_1	$S, \text{мм}$	x_2	$t, \text{мм}$	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 методики проведення повного факторного експерименту з трьома змінними чинниками на двох (max-min) рівнях потрібно провести (по формулі [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 приведена матриця плану проведення експерименту, в якого рядки (1-8) відповідають дослідом, що проводяться, а стовпці x_j – чинникам незалежного і взаємного їх впливу по структурі рівняння. Знаку (+) відповідає максимальне значення чинника в експерименті, знаку (-) – мінімальне значення. Табл. 4.3 доповнена також даними розрахунку математичної моделі і є узагальнюючою 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 експериментальним шляхом значення параметра $\sigma_{\pm}$ залишкового напруження, слід представляти як логарифм їх значень з символом y_{ik} , а середнє арифметичне - $\overline{y_i}$.

Оцінка відтворюваності паралельних дослідів в логарифмічному виразі здійснюється за G-критерієм Кохерна [178], згідно якому гіпотеза відтворюваності дослідів приймається, якщо розрахункове значення G_p -критерію буде менше 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 (число дослідів); f_i – число ступенів вільності 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 складає: $G_T(0,95; 8; 2) = 0,5157$.

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 дослідів;

$S_{i\max}^2$ - максимальне значення дисперсії відтворюваності всіх дослідів;

N – загальна кількість дослідів ($N=8$).

Дисперсія відтворюваності по кожному досліді визначається як:

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

де $k = 3$ – число паралельних дослідів.

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

Табл. 2.

Результати досліджень залишкових напружень і оцінка їх відтворюваності у дослідів

№ досл.	Параметр $\sigma_{\pm k}$				Логарифм параметра $\sigma_{\pm k}$				Дисперсія відтворюваності S_i^2
	$\sigma_{\pm 1}$	$\sigma_{\pm 2}$	$\sigma_{\pm 3}$	$\bar{\sigma}_{\pm k}$	y_{i1}	y_{i2}	y_{i3}	$\bar{y}_{ik}$	
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

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

Повний розрахунок дисперсій відтворюваності в експерименті наведений в узагальнюючій таблиці матриці планування експерименту (табл. 3.), з якої виходить, що максимальне значення дисперсії складає $S_{i\max} = 0,0045$ (дослід № 4), а сума дисперсій $\sum_{i=1}^8 (S_i^2) = 0,0227$.

Розрахункове значення G_p - критерію Кохерна за даними табл. 3. складає:

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

що менше табличного його значення, рівного $G_{\tau}(0,95; 8; 2) = 0,5157$.

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

Розрахунок коефіцієнтів регресії $b_0, b_1, b_2, \dots, b_{123}$ здійснюється шляхом підсумовування по стовпцях матриці (табл. 3.) експериментально набутих значень y_i з урахуванням знаку (± 1) при змінних x_{ji} відповідного стовпця по наступних залежностях:

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

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

Оцінка значущості коефіцієнтів регресії здійснюється за допомогою t-критерія 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.

При рівні довірчої вірогідності $p = 0,95$ і числі ступенів вільності дисперсії адекватності $f_y = N(k - 1) = 8 \cdot (3 - 1) = 16$, табличне значення критерію Стьюдента складає $t_{\tau(95, 0; 16)} = 2,12$ [10].

Середнє квадратичне відхилення коефіцієнтів регресії визначається з виразу:

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

Табл. 3

Матриця плану, результати експерименту і їх математичне опрацювання

№ дослідів	Матриця плану експерименту $N=2^3$								$\bar{\sigma}_{\pm k}$	$\bar{y}_i$	$\hat{y}_i$	$(\bar{y}_i - \hat{y}_i)$	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 $y = 1,363 + 0,141x_2 +$			0,0175	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	$b_1b_2b_3$	$0,099x_3 - 0,084x_1x_2 + 1,363 x_2x_2x_3$	S_{ad}^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, здійснимо оцінку значущості розрахованих коефіцієнтів. Середнє значення дисперсії відтворюваності паралельних дослідів в експерименті склало: $S_{y_i}^2 = 0,0076$. Середньоквадратичне відхилення коефіцієнтів регресії в цьому випадку буде:

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

Статично значущі коефіцієнти регресії повинні задовольняти умові:

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

Як видно з табл. 3, цьому значенню 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_2, x_3 та x_1x_3 на значення залишкових напружень є незначним вони виключаються з рівняння регресії. З урахуванням оцінки значущості коефіцієнтів рівняння регресії прийме вигляд:

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

Перевірка адекватності отриманої залежності (18) експериментально отриманим даним по значенню залишкового напруження $\sigma_{\pm}$ здійснюється за F-критерієм Фішера, розрахункове значення якого не повинне бути менше його табличного значення за прийнятих умов експерименту, тобто

$$F_p \geq F_T(p; f_{ad}; f_y) \quad (19)$$

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

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

де S_{ad} – дисперсія адекватності;

S_y^2 – середнє значення дисперсії відтворюваності дослідів.

Дисперсія адекватності розраховується за формулою:

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

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

Розрахункові значення відгуків моделі y_i визначаються підсумовуванням по рядках всіх значущих коефіцієнтів b_j з урахуванням знаку (± 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 раніше певного числа ступенів її вільності, як $f_{ад} = 4$, складе:

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

Розрахункове значення задовольняє F - критерію Фішера, оскільки:

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

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 в процесі 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 НУ «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. Карнаш А.М. Аналіз відомих методів контролю фізико-механічних характеристик металу / А.М. Карнаш // 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. Карнаш А.М. Аналіз відомих методів контролю фізико-механічних характеристик металу / А.М. Карнаш // Нафтогазова енергетика. Енергетика, контроль та діагностика об'єктів нафтогазового комплексу.- 2012.- № 1(17).- С.8-23.