

УДК 621.9.02

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-22

Швець С. В., Швець Р. С., Швець У. С.

Сумський державний університет

ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ НА СИЛУ РІЗАННЯ

В статті виконане дослідження впливу швидкості деформування на змінювання сил опору. Відомо, що експериментальні точки не збігаються зі степеневою лінією тренду і така ситуація пояснюється похибкою експерименту. Аналіз результатів робіт, отриманих за різних умов різними дослідниками показав можливість синусоїдальної залежності сили різання від швидкості різання. Для перевірки такої гіпотези, проведено змінювання швидкості різання за рахунок змінювання діаметра оброблюваної деталі при незмінній частоті обертання шпинделя. Такий підхід виключає можливий вплив обертань деталей верстата. Отримані в такий спосіб під час точіння результати (значення сил різання) дозволили передбачити екстремальні значеннями функції. Вони не пов'язані з обертанням деталей верстата, що підтверджує вплив виключно швидкості деформування на синусоїдальну залежність сили опору.

Ключові слова: швидкість, деформація, сила, різання, синусоїда, залежність.

Постановка проблеми. Для формування емпіричних залежностей сил різання від параметрів режиму різання використовуються переважно степеневі вирази [1, 2, 10] виду

$$P_t = C_t \cdot t^x, P_s = C_s \cdot s^y, P_v = C_v \cdot v^z. \quad (1)$$

Проте експериментальні точки не завжди збігаються з лінією тренду, рис. 1, і така ситуація пояснюється похибкою експерименту. Експериментальні результати на рисунку 1 апроксимуються виразом $P = 430,11 \cdot v^{-0,044}$. Як видно, похибка, відхилення від лінії тренду, сягає майже 16%.

v, м/с	P, Н	Пох., %
0.07	506	4,7
0.11	489	3,2
0.23	469	2,2
0.29	405	10,8
0.46	375	15,7
0.58	394	10,5
0.72	494	13,2
0.92	450	4,3
1.15	469	9,8
1.82	431	2,9
2.3	469	13,1
2.63	431	4,6
4.6	375	6,7
5.76	366	8,1

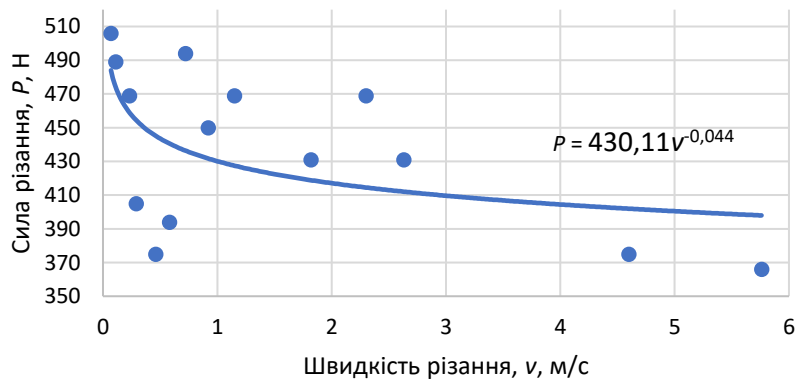


Рисунок 1 – Експериментальні значення головної складової сили різання сталі 40Х під час змінювання швидкості різання, $t = 1$ мм, $s = 0,12$ мм/об.

Отримані результати набагато точніше окреслюються залежністю

$$P = 436 + 70 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{0,59}\right), \quad (2)$$

показаною на рисунку 2. Тому виникає припущення про синусоїдальну залежність сили опору деформації від швидкості деформування.

Аналіз останніх досліджень. Для підтвердження цієї гіпотези проаналізовано результати робіт, отримані за різних умов різними дослідниками.

Ококріє І. Р. та Tartibu L. К. експериментально досліджували вплив швидкості різання при фрезеруванні титанового сплаву TI-6AL-4V-ELI [3]. Цей метал містить 89,69 % Ti, 6 % Al, 4 % V, 0,13 % O2. Швидкість різання змінювалася за зміни частоти обертання шпинделя n . Використовувалися три значення n (2000, 2500, 3000 об/хв) при трьох значеннях хвилинної подачі (150, 200, 300 мм/хв) та трьох значеннях глибини різання (0,3, 0,6, 0,9 мм), табл. 1.

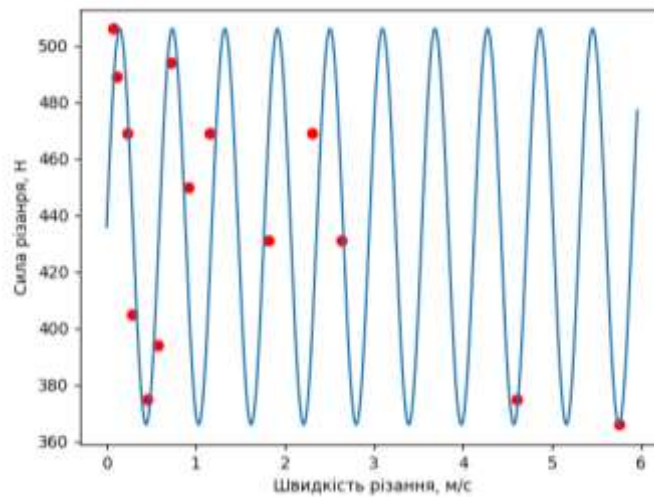


Рисунок 2 – Синусоїда через експериментальні точки

Таблиця 1 – Експериментальні результати сили різання під час обробки сплаву ТІ-6АL-4V-ЕLІ [3, табл. 6]

Частота обертання шпинделя, об/хв	Хвилинна подача, мм/хв	Глибина різання, мм	Сила різання, Н
200	150	0,3	80
200	200	0,6	65
200	300	0,9	56
2500	150	0,6	35
2500	200	0,9	75
2500	300	0,3	70
3000	150	0,9	58
3000	200	0,3	30
3000	300	0,6	75

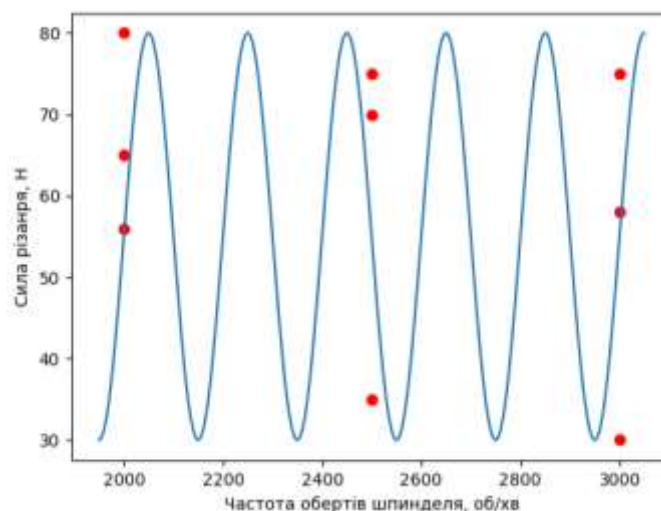


Рисунок 3 – Синусоїдальна залежність сили різання від частоти обертання шпинделя [3]

Сили різання при кожній частоті обертання шпинделя вимірювалися три рази, але використовувалися різні значення хвилинної подачі і глибини різання. Незважаючи на відмінності в площі зрізування при отриманні залежності експериментальних точок сили різання від кожної швидкості різання, вони досить близько розташовуються по відношенню до синусоїдальної кривої (3), рис. 3,

$$P = 55 + 25 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{200}\right). \quad (3)$$

Thangarasu S. K., Shankar S., Thomas A Tony, Sridhar G. вимірювали сили різання при точінні заготовки з м'якої сталі для різних комбінацій швидкості різання, подачі та глибини різання [4]. Експерименти заплановані на основі конструкції Тагучі для створення емпіричної формули, табл. 2.

Таблиця 2 – Залежність сили різання від частоти обертання шпинделя при різних значеннях

глибини різання та подачі [4, табл. 6.1, 10.1]

n , об/хв	S , мм/об	t , мм	P , Н	n , об/хв	S , мм/об	t , мм	P , Н
90	0,2	0,2	366,75	90	0,2	0,2	374,74
90	0,2	0,4	372,39	90	0,2	0,4	381,60
90	0,2	0,6	380,85	90	0,2	0,6	386,38
90	0,4	0,2	393,08	90	0,4	0,2	394,36
90	0,4	0,4	400,60	90	0,4	0,4	403,19
90	0,4	0,6	410,01	90	0,4	0,6	412,02
90	0,6	0,2	423,92	90	0,6	0,2	421,83
90	0,6	0,4	433,14	90	0,6	0,4	436,54
90	0,6	0,6	444,24	90	0,6	0,6	447,33
180	0,2	0,2	472,26	180	0,2	0,2	475,78
180	0,2	0,4	478,47	180	0,2	0,4	480,69
180	0,2	0,6	492,76	180	0,2	0,6	494,42
180	0,4	0,2	505,93	180	0,4	0,2	510,12
180	0,4	0,4	513,64	180	0,4	0,4	520,91
180	0,4	0,6	523,23	180	0,4	0,6	527,77
180	0,6	0,2	534,14	180	0,6	0,2	544,45
180	0,6	0,4	541,85	180	0,6	0,4	551,32
180	0,6	0,6	551,44	180	0,6	0,6	558,18
270	0,2	0,2	583,23	270	0,2	0,2	591,54
270	0,2	0,4	589,43	270	0,2	0,4	594,48
270	0,2	0,6	598,09	270	0,2	0,6	606,25
270	0,4	0,2	608,62	270	0,4	0,2	613,12
270	0,4	0,4	616,33	270	0,4	0,4	626,85
270	0,4	0,6	624,98	270	0,4	0,6	637,65
270	0,6	0,2	637,77	270	0,6	0,2	644,51
270	0,6	0,4	646,80	270	0,6	0,4	659,23
270	0,6	0,6	656,01	270	0,6	0,6	668,06

Тому в таблиці немає відомостей про вплив швидкості різання на сили різання при постійних подачі та глибині різання. У зв'язку з цим із таблиці 2 вибрані швидкості різання і відповідні значення сил різання при однакових значеннях площі зрізування, $S \cdot t$. Отримано такі залежності:

$$S \cdot t = 0,08 \text{ мм}^2, P = 452,6 + 159,52 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{36,4}\right), \quad (4)$$

$$S \cdot t = 0,12 \text{ мм}^2, P = 509,31 + 128,4599 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{36}\right), \quad (5)$$

$$S \cdot t = 0,24 \text{ мм}^2, P = 534,62 + 124,61 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{36}\right), \quad (6)$$

$$S \cdot t = 0,36 \text{ мм}^2, P = 556,15 + 111,909 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{36}\right). \quad (7)$$

Залежність (4), при $S \cdot t = 0,08 \text{ мм}^2$, показана на рисунку 4.

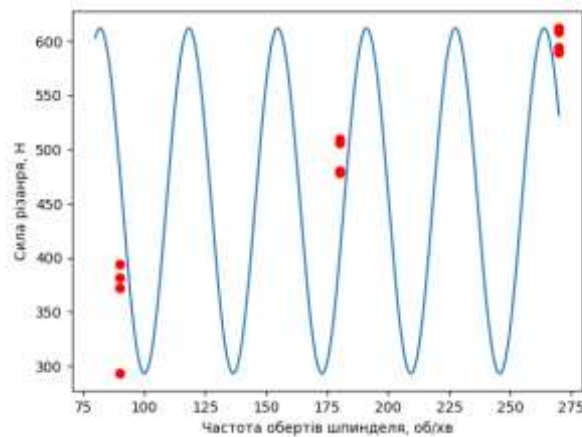


Рисунок 4 – Залежність сили різання від частоти обертання шпинделя [4] при площі зрізування $S \cdot t = 0,08 \text{ мм}^2$

Gunay M., Korkut I., Aslan E., Seker U. представили дослідження впливу швидкості різання на основну силу різання за різних значень переднього кута [5, табл. 4].

Таблиця 3 – Залежність сили різання від швидкості різання за різних значень переднього кута [5, табл. 4]

Передній кут, γ°	Швидкість різання, v , м/хв				
	80	100	120	150	180
- 5	1676	1680	1658	1682	1665
-2,5	1666	1659	1652	1640	1658
0	1660	1654	1650	1643	1601
2,5	1618	1615	1614	1624	1600
5	1608	1610	1612	1617	1599
7,5	1605	1606	1608	1604	1597
10	1602	1600	1599	1596	1568
12,5	1568	1576	1569	1559	1577

Виконувалося точіння сталі AISI 1040. Основна сила різання вимірювалася для восьми різних передніх кутів в діапазоні від негативного до позитивного та п'яти швидкостей різання,

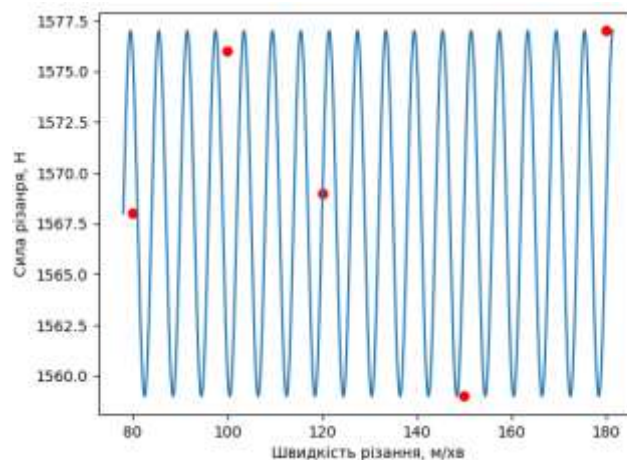


Рисунок 5 – Вплив швидкості різання на силу різання [5], формула (15)

при цьому глибина різання та подача залишалися постійними. Експериментальні точки залежностей сили різання від швидкості різання за різних значень переднього кута потрапляють на відповідну синусоїду (8) – (15), рисунок 5.

$$\gamma = -5, P = 1670 + 12 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6}\right), \quad (8)$$

$$\gamma = -2,5, P = 1653 + 13 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,02}\right), \quad (9)$$

$$\gamma = 0, P = 1630,5 + 29,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,02}\right), \quad (10)$$

$$\gamma = 2,5, P = 1612 + 12 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,02}\right), \quad (11)$$

$$\gamma = 5, P = 1608 + 9 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6}\right), \quad (12)$$

$$\gamma = 7,5, P = 1602,5 + 5,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6}\right), \quad (13)$$

$$\gamma = 10, P = 1585 + 17 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,02}\right), \quad (14)$$

$$\gamma = 12,5, P = 1568 + 9 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6}\right). \quad (15)$$

Korkmaz M. E., Yasar N., Günaş M. провели експериментальне дослідження сил різання [6, рис. 6] при точінні жаростійкого сплаву Nimonic 80A, який містить 0,052 відсотка С, 0,06 Si, 0,02 Mn, 1,35 Al, 0,05 Co, 0,8 Fe, 2,43 Ti, 19,2 Cr і близько 70 відсотків Ni. Представлена в [6]

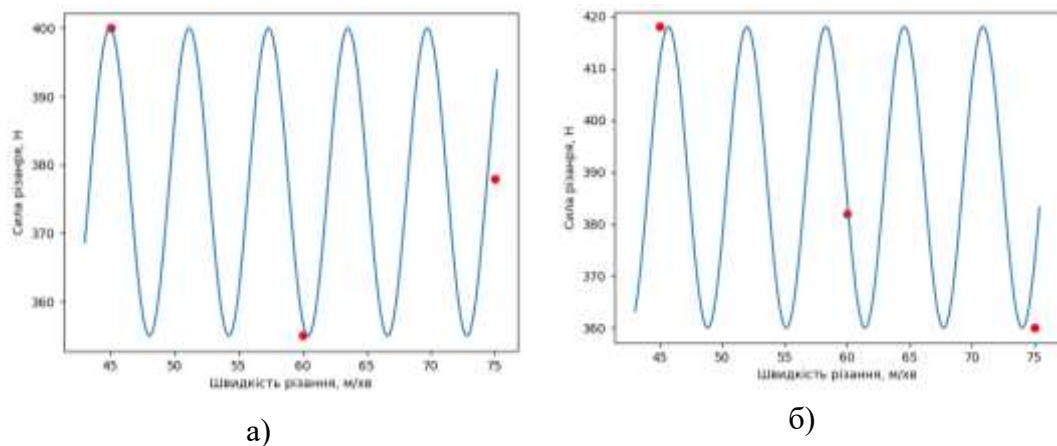


Рисунок 6 – Вплив швидкості різання на величину сил різання [6]:

$$a) t = 0,5 \text{ мм}, s = 0,2 \text{ мм/об}, P = 377,5 + 22,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,2}\right);$$

$$б) t = 1 \text{ мм}, s = 0,1 \text{ мм/об}, P = 389 + 29 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,3}\right)$$

гістограма відбиває вплив швидкості різання на сили різання при глибинах різання 0,5, 1 і 1,5 мм. За кожної з глибин призначалися подачі 0,1, 0,2, 0,3 мм/об. Вплив швидкості різання на сили різання апроксимується синусоїдальними кривими (16) – (23) та показано на рисунку 6.

$$t = 0,5 \text{ мм}, s = 0,2 \text{ мм/об}, P = 377,5 + 22,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,2}\right), \quad (16)$$

$$t = 0,5 \text{ мм}, s = 0,3 \text{ мм/об}, P = 498,5 + 13,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,2}\right), \quad (17)$$

$$t = 1 \text{ мм}, s = 0,1 \text{ мм/об}, P = 389 + 29 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,3}\right), \quad (18)$$

$$t = 1 \text{ мм}, s = 0,2 \text{ мм/об}, P = 601,5 + 36,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,3}\right), \quad (19)$$

$$t = 1 \text{ мм}, s = 0,3 \text{ мм/об}, P = 862,5 + 62,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,32}\right), \quad (20)$$

$$t = 1,5 \text{ мм}, s = 0,1 \text{ мм/об}, P = 525 + 25 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,3}\right), \quad (21)$$

$$t = 1,5 \text{ мм}, s = 0,2 \text{ мм/об}, P = 830 + 30 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,3}\right), \quad (22)$$

$$t = 1,5 \text{ мм}, s = 0,3 \text{ мм/об}, P = 1157,5 + 37,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,32}\right). \quad (23)$$

Korkut I. та Mehmet B. визначили значення сил різання при точінні сталі AISI 1117 на верстаті з ЧПК Johnford TC35 [7, табл. 3]. Вимірювання виконані при швидкостях різання 50, 75, 100, 125, 150 м/хв для глибин різання 1 та 2 мм. При кожній призначеній швидкості різання та глибині різання використовувалися 5 подач: 0,1, 0,15, 0,2, 0,25, 0,3 мм/об. Охолоджувальна рідина при випробуваннях не використовувалась. Через отримані експериментальні точки

залежності сили різання від швидкості різання з достатньою точністю проходить синусоїдальна крива (рис. 7) та результати експерименту апроксимуються формулами (24)-(33).

$$t=1 \text{ мм}, s=0,1 \text{ мм/об}, P = 255,5 + 27,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,06}\right), \quad (24)$$

$$t=1 \text{ мм}, s=0,15 \text{ мм/об}, P = 315,5 + 48,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,06}\right), \quad (25)$$

$$t=1 \text{ мм}, s=0,2 \text{ мм/об}, P = 326,5 + 52,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6}\right), \quad (26)$$

$$t=1 \text{ мм}, s=0,25 \text{ мм/об}, P = 379,5 + 53,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,06}\right), \quad (27)$$

$$t=1 \text{ мм}, s=0,3 \text{ мм/об}, P = 448,5 + 34,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,06}\right), \quad (28)$$

$$t=2 \text{ мм}, s=0,1 \text{ мм/об}, P = 610,5 + 134,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,06}\right), \quad (29)$$

$$t=2 \text{ мм}, s=0,15 \text{ мм/об}, P = 866,5 + 126,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,02}\right), \quad (30)$$

$$t=2 \text{ мм}, s=0,2 \text{ мм/об}, P = 1070 + 190 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,06}\right), \quad (31)$$

$$t=2 \text{ мм}, s=0,25 \text{ мм/об}, P = 1156,5 + 216,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,06}\right), \quad (32)$$

$$t=2 \text{ мм}, s=0,3 \text{ мм/об}, P = 1331 + 255 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,06}\right). \quad (33)$$

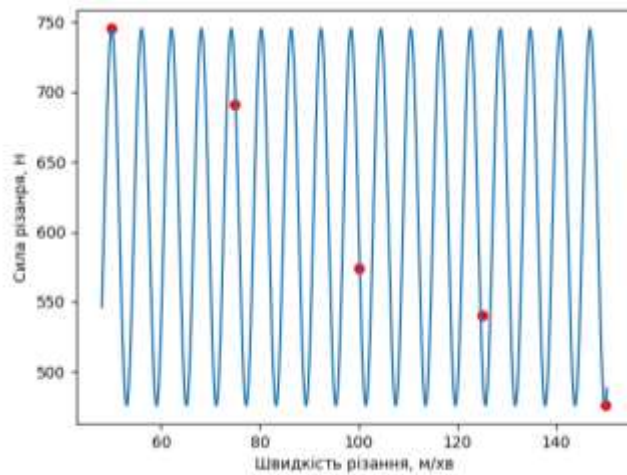


Рисунок 7 – Синусоїдальна залежність сили опору від швидкості різання за експериментом [7] при $t = 2 \text{ мм}$, $s = 0,1 \text{ мм/об}$,

$$P = 610,5 + 134,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,06}\right)$$

Ślusarczyk L., Franczyk E. досліджували вплив швидкості різання на сили різання при точінні титанового сплаву GRADE 2 [8] до складу якого входять 0,3 відсотка Fe, 0,08 C, 0,03 N, 0,25 O, 0,015 H відповідно до стандарту EN 10204-3.1. Експериментальні залежності представлені в таблицях 6, 9, 12 [8] апроксимовані формулами (34) - (42), одна з яких відображена на рисунку 8 та 9.

$$t=0,5 \text{ мм}, s=0,048 \text{ мм/об}, \text{ file } t05-0048.txt, P = 61,55 + 10,0499 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,01}\right), \quad (34)$$

$$t=0,5 \text{ мм}, s=0,153 \text{ мм/об}, \text{ file } t05-0153.txt, P = 139,3 + 14,399 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{5,9}\right), \quad (35)$$

$$t=0,5 \text{ мм}, s=0,249 \text{ мм/об}, \text{ file } t05-0249.txt, P = 225,7 + 58,6 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{5,95}\right), \quad (36)$$

$$t=2,77 \text{ мм}, s=0,249 \text{ мм/об}, \text{ file } t277-0249.txt, P = 833,8499 + 8,4499 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{5,9}\right), \quad (37)$$

$$t=2,77 \text{ мм}, s=0,153 \text{ мм/об}, \text{ file } t277-0153.txt, P = 576,15 + 2,35 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{5,9}\right), \quad (38)$$

$$t=2,77 \text{ мм}, s=0,048 \text{ мм/об}, \text{ file } t277-0048.txt, P = 207,7 + 28,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6}\right), \quad (39)$$

$$t=1,77 \text{ мм}, s=0,048 \text{ мм/об}, P = 169,35 + 6,5499 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{5,9}\right), \quad (40)$$

$$t=1,77 \text{ мм}, s=0,153 \text{ мм/об}, \text{ file } t177-0153.txt, P = 386,75 + 17,55 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{5,95}\right), \quad (41)$$

$$t=1,77 \text{ мм}, s=0,249 \text{ мм/об}, \text{ file } t177-0249.txt, P = 569,75 + 9,75 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{5,93}\right). \quad (42)$$

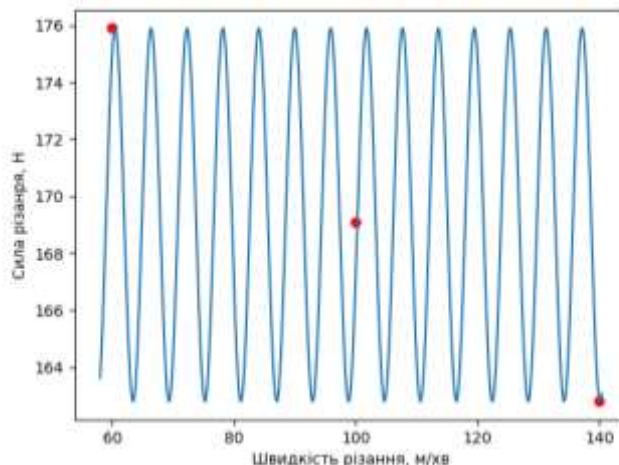


Рисунок 8 – Синусоїдальна залежність сили опору від швидкості різання за даними [8, табл. 9] при $t = 1,77$ мм, $s = 0,048$ мм/об.

$$P = 169,35 + 6,5499 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{5,9}\right)$$

Chuangwen X., Ting X., Xiangbin Y., Jilin Z., Wenli L., Hua yuan L. провели експериментальні випробування при різанні нержавіючої мартенситної сталі 1X13 твердосплавним інструментом з покриттям [2]. Використовувалася подача в межах $s = 0,05 - 0,085$ мм/об та глибина різання $t = 1,5 - 5$ мм.

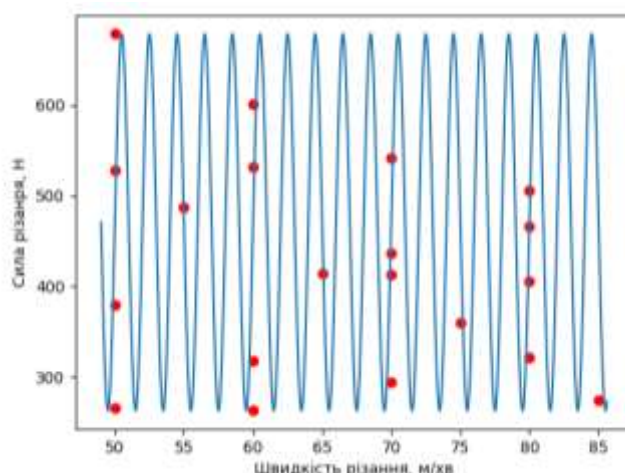


Рисунок 9 – Синусоїдальна залежність сили опору від швидкості різання за даними [2, табл. 3]

Результати [2, табл. 3] апроксимуються, рис. 9, формулою

$$P = 470,5 + 207,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{2}\right). \quad (43)$$

Zoltan Iosif Korka Z., Micloşină C.-O., Sojocaru V. провели експериментальне дослідження сил різання при точінні металу [9]. При подачі 0,2 мм/об та глибині різання 0,5 мм швидкість різання змінювалася від 43,96 до 175,84 м/хв [9, табл. 2]. Результати апроксимуються, рисунок 10, формулою:

$$P = 399 + 61 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{5,9}\right). \quad (44)$$

Harun Gökçe виконав дослідження впливу швидкості різання на сили різання при фрезеруванні нержавіючої сталі Custom 450 [11].

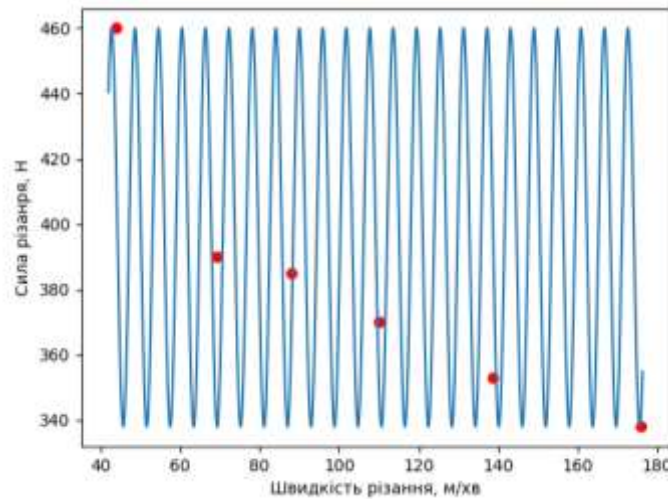


Рисунок 10 – Синусоїдальна залежність сили опору від швидкості різання за даними [9, табл. 2]

Таблиця 4 – Залежність сили різання від швидкості різання за різних подач [11, табл. 5]

v , м/хв	40	80	120	160	40	80	120	160
P , Н	311,2	308,8	306,1	325,5	315,4	287,3	334,7	315,6
s , мм/об	0,05	0,1	0,15	0,2	0,1	0,05	0,2	0,15
v , м/хв	40	80	120	160	40	80	120	160
P , Н	325,7	343,4	289,1	309,5	336,4	330,4	321,2	296,7
s , мм/об	0,15	0,2	0,05	0,1	0,2	0,15	0,1	0,05

При подачі $s = 0,05$ мм/об [11, табл. 5] залежність апроксимується формулою

$$F = 299,25 + 11,95 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6,3}\right). \quad (45)$$

Графік залежності (45) показаний на рисунку 11 а.

При подачі $s = 0,15$ мм/об [11, табл. 5] залежність апроксимується формулою

$$F = 254,205 + 76,195 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{5,6}\right). \quad (46)$$

Графік залежності (46) показаний на рисунку 11 б.

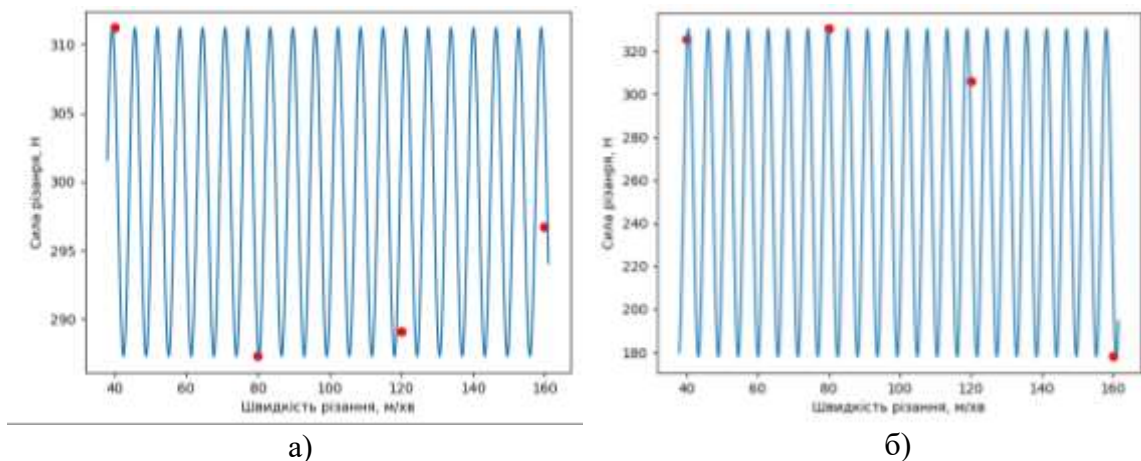


Рисунок 11 – Залежність сили різання від швидкості різання [11, табл. 5], а) $s = 0,05$ мм/об; б) $s = 0,15$ мм/об

При подачах $s = 0,05; 0,1; 0,15; 0,2$ мм/об [11, табл. 5] залежність апроксимується формулою

$$F = 260,705 + 82,695 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{5,6}\right). \quad (47)$$

Графік залежності (47) показаний на рисунку 12.

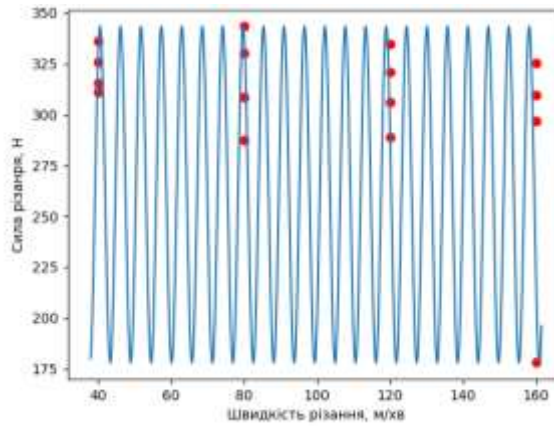


Рисунок 12 – Залежність сили різання від швидкості різання [11, табл. 5],
 $s = 0,05; 0,1; 0,15; 0,2$ мм/об

Balasubramaniyan Singaravel, Thangiah Selvaraj експериментально досліджували сили різання при точінні сталі HSLA [12]. За різних подач, $s = 0,07; 0,15; 0,23$ мм/об, та глибин різання, $t = 0,5; 0,1; 1,5$ мм, визначалися сили різання залежно від швидкості різання, табл. 5. Залежність як формула

$$F = 536,5 + 279,5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{6}\right). \quad (48)$$

Таблиця 5 – Залежність сили різання від швидкості різання за різних подач і глибин різання [12, табл. 3]

v , м/хв	95	95	95	155	155	155	215	215	215
P , Н	379	429	816	312	414	507	262	364	402
s , мм/об	0,07	0,15	0,23	0,07	0,15	0,23	0,07	0,15	0,23
t , мм	0,5	1	1,5	0,5	1	1,5	1	1,5	0,5
v , м/хв	95	95	95	155	155	155	215	215	215
P , Н	373	455	526	276	342	397	257	335	364
s , мм/об	0,07	0,15	0,23	0,07	0,15	0,23	0,07	0,15	0,23
t , мм	1,5	0,5	1	1	1,5	0,5	1,5	0,5	1

Графік залежності (48) показаний на рисунку 13.

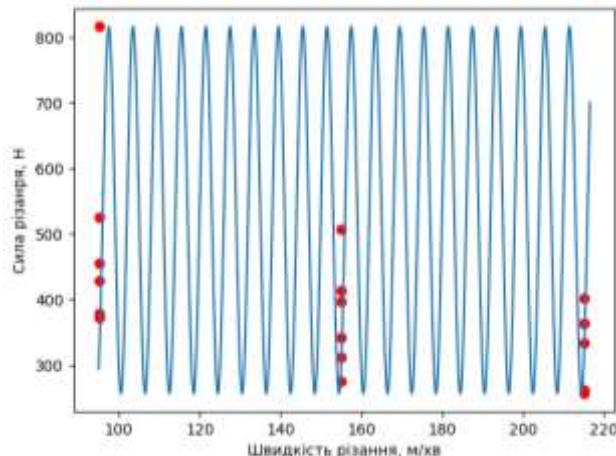


Рисунок 13 – Залежність сили різання від швидкості різання при різних подачах [12],
 $s = 0,07; 0,15; 0,23$ мм/об, та глибинах різання, $t = 0,5; 0,1; 1,5$ мм

Мета роботи - дослідження впливу швидкості деформування на поведінку сил опору.

Експериментальна перевірка гіпотези. Для підтвердження синусоїдальної залежності сил різання саме від швидкості деформування, проведено змінювання швидкості різання за рахунок змінювання діаметра оброблюваної деталі при незмінній частоті обертання шпинделя. Такий підхід виключає можливий вплив обертань деталей верстата.

За формулою (2), рисунок 2, визначені значення швидкостей різання, при яких можливі екстремальні значення функції. Швидкості різання, за яких можливі мінімальні значення сили різання на рисунку 2

$$v_{min} = v_0 + i \cdot p, \quad (49)$$

де $v_0 = 1,01$ м/с – найменше значення швидкості різання, якому відповідає мінімум функції (2) на графіку, рис. 2;

$i = 1, \dots, 7$ – порядковий номер і кількість мінімальних значень функції (2);

$p = 0,59$ м/с – крок залежності (2).

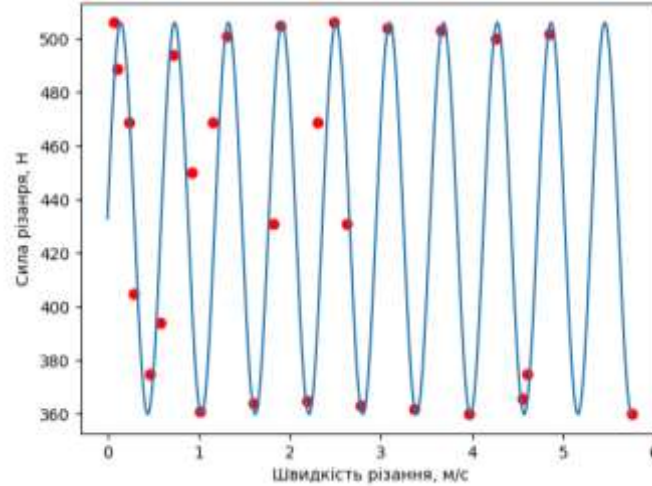


Рисунок 14 – Прогнозовані екстремальні значення функції (2) і рис. 2

За формулою (49) $v_{min} = 1,01; 1,6; 2,19; 2,78; 3,37; 3,96; 4,55$ м/с. На підстав цього, при частоті обертання шпинделя $n = 1250$ об/хв, визначені відповідні діаметри деталі, які забезпечать саме такі швидкості різання

$$d_{min} = (v_{min} \cdot 1000 \cdot 60) / (\pi \cdot n), \quad (50)$$

$$d_{min} = 15,432; 24,446; 33,461; 42,475; 51,49; 60,504; 69,519 \text{ мм.}$$

Значення швидкості різання, за яких можливі максимальні значення сили різання на рисунку 2

$$v_{max} = v_0 + i \cdot p + p/2, \quad (51)$$

За формулою (51) $v_{max} = 1,305; 1,895; 2,485; 3,075; 3,665; 4,255; 4,845$ м/с. Відповідні діаметри деталі, які забезпечать саме такі швидкості різання

$$d_{max} = (v_{max} \cdot 1000 \cdot 60) / (\pi \cdot n), \quad (52)$$

$$d_{max} = 19,939; 28,953; 37,968; 46,983; 55,997; 65,012; 74,026 \text{ мм.}$$

Отримані в такий спосіб під час точіння результати (значення сил різання) виявилися екстремальними значеннями функції (2), рисунок 14. Вони були спрогнозовані і не пов'язані з обертанням деталей верстата, що підтверджує вплив виключно швидкості деформування на синусоїдальну залежність сили опору.

Висновки. Проведені дослідження літературних джерел та експериментальні результати дозволяють зазначити:

1. Спостерігається синусоїдальна залежність сил опору деформування від швидкості деформації.
2. Екстремальні значення синусоїдальної функції можна передбачити.
3. Період синусоїди залежить від властивостей матеріалу, що обробляється.
4. При змінюванні подачі та глибини різання змінюється величина сили різання, рис. 3, 4, 12, 13, а період синусоїдальної залежності залишається незмінним.
5. Залежність не пов'язана з обертанням деталей верстата, а формується виключно швидкістю деформування.
6. На даний час немає задовільних пояснень такого явища, а тому неможливо надати рекомендації щодо практичного застосування встановлених фактів.

Інформаційні джерела

1. Dubovska, R.; Majerik, J. & Baska, I. Experimental measurement of cutting forces in the turning technology / DAAAM International scientific book 2012 pp. 255-266 Chapter 22
2. Chuangwen X., Ting X., Xiangbin Y., Jilin Z., Wenli L., Huaiyuan L. Experimental tests and empirical models of the cutting force and surface roughness when cutting 1Cr13 martensitic stainless steel with a coated carbide tool / Advances in Mechanical Engineering 2016, Vol. 8(10) 1-10, 2016, doi: 10.1177/1687814016673753
3. Okokpujie I., Tartibu L. Experimental analysis of cutting force during machining difficult to cut materials under dry, mineral oil, and TiO₂ nano-lubricant / Journal of measurements in engineering. december 2021, volume 9, issue 4.
4. Thangarasu S. K. , Shankar S., Thomas A Tony, Sridhar G. Prediction of Cutting Force in Turning Process-an Experimental Approach / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 310 (2018) 012119, doi:10.1088/1757-899X/310/1/012119
5. Gunay M., Korkut I., Aslan E., Seker U. Experimental investigation of the effect of cutting tool rake angle on main cutting force / Journal of Materials Processing Technology 166 (2005) 44–49, doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.07.092
6. Korkmaz M., Yasar N., Günay M. Numerical and experimental investigation of cutting forces in turning of Nimonic 80A superalloy / Engineering Science and Technology, an International Journal 23 (2020) 664-673.
7. Korkut I., Boy M. Experimental Examination of Main Cutting Force and Surface Roughness Depending on Cutting Parameters / Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering 54(2008)7-8, 531-538.
8. Łukasz Ślusarczyk, Emilia Franczyk. The experimental determination of cutting forces in a cutting zone during the orthogonal turning of a GRADE 2 titanium alloy tube / Technical transactions mechanics, 8(2019) doi: 10.4467/2353737XCT.19.088.10867.
9. Zoltan Iosif Korka Z., Micloșină C.-O., Cojocaru V. An Experimental Study of the Cutting Forces in Metal Turning / Analele universității “Eftimie murgu” reșita, anul XX, No. 2, 2013, p 25-32.
10. Kuzinovski, M., Trajčevski, N., Cichosz, P. Investigation of cutting forces during machining process by high speed turning, Journal of Production Engineering, Vol. 12, No.1, pp. 29-32.
11. Gökçe H. Experimental and numerical investigation of cutting forces and temperatures in milling of custom 450 steel / Archiwes of Metallurgy and Materials, 67 (2022), 3, pp. 843-853, doi: <https://doi.org/10.24425/amm.2022.139674>.
12. Balasubramanian Singaravel, Thangiah Selvaraj. Experimental investigation on cutting forces, specific cutting pressure, co-efficient of friction and shear energy in turning of HSLA steel / Management and Production Engineering Review, Volume 7, Number 1 (2016), pp. 71-76 doi: 10.1515/mper-2016-0008

Shvets S., Shvets R., Shvets U.

Sumy State University

INFLUENCE OF SPEED OF DEFORMATION ON CUTTING FORCE

In the article, a study of the influence of the deformation rate on the change in the resistance forces was carried out. It is known that the experimental points do not coincide with the power line of the trend and this situation is explained by the error of the experiment. Analysis of the results of work obtained under different conditions by different researchers showed the possibility of a sinusoidal dependence of the cutting force on the cutting speed.

To test this hypothesis, the cutting speed was changed by changing the diameter of the processed part at a constant spindle speed. This approach excludes the possible influence of rotations of machine parts. The results (values of cutting forces) obtained in this way during turning made it possible to predict the extreme values of the functions. They are not related to the rotation of the machine parts, which confirms the influence of only the deformation rate on the sinusoidal dependence of the resistance force.

Key words: speed, deformation, force, cutting, sinusoid, dependence.