**Тришин П.Р.**

доктор філософії, доцент

**Національний
університет «Запорізька
політехніка»****Tryshyn P.**

Ph.D., Associate Professor

**National University
“Zaporizhzhia Polytechnic”****УДК 621.941.08****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-1-5**

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ РІЗАННЯ ЗА ВІБРАЦІЙНИМ СЛІДОМ ПРИ ТОЧІННІ

В роботі розглянуті основні умови різання при точінні в умовах регенеративних автоколивань (АК). Проведено аналіз фізичних основ процесу стружкотворення в умовах різання за вібраційним слідом при точінні. Розглянуто випадок, коли зсув хвиль на поверхні різання на сусідніх обертах деталі дорівнює нулю. У цьому випадку, згідно з теорією регенеративних АК, відсутнє колювання товщини зрізу і як наслідок, відсутнє колювання сили стружкотворення, що є джерелом підтримки вібрацій. Умови експериментального точіння деталі з пазом забезпечували на кожному оберті деталі при врізанні ріжучої кромки в поверхню деталі однакові початкові умови – точка початку колювань була постійною, тобто був відсутній зсув фази між попереднім та поточним вібраційним слідом на поверхні різання. За цих умов згідно теорії регенеративних АК не повинні збуджуватись вібрації. Водночас на отриманих осцилограмах чітко видно, що після врізання йде ділянка на якій супроводжуючі вільні колювання загасають, потім йде ділянка налаштування АК і ділянка стійких АК. При накладенні осцилограм декількох сусідніх обертів деталі видно, що на ділянці врізання відсутній зсув фаз. Супроводжуючі вільні колювання при накладенні сусідніх обертів мають майже однакову форму. Але починаючи з ділянки налаштування АК видно як період колювань має не постійне значення, що призводить до появи зсуву фаз перемінного значення. Результати експериментів показали, що при наявності хвиль на поверхні різання на сусідніх обертах деталі при точінні реальна товщина зрізу завжди змінна та не залежить від значення зсуву фаз. Таким чином спростовано помилкове твердження, що зсув фаз між вібраційними хвилями на поверхні різання сусідніх обертів деталі забезпечує збудження вібрацій. На основі отриманих результатів сформульована фізично вірна картина утворення стружки в умовах різання за вібраційним слідом, коли поздовжній переріз шару, що зрізається, є хвилеподібною смугою.

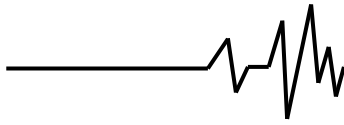
Ключові слова: регенеративні автоколювання, різець-осцилятор, осцилограма, вібраційний слід, точіння.

Вступ. Регенеративні автоколювання (АК) є одним із ключових феноменів, що вивчаються в області динаміки процесів різання. Вони значно впливають на якість обробки, довговічність інструменту і стабільність всього технологічного процесу [1].

Фундаментальна теорія регенеративних АК була розроблена J. Tlustý [2], S.A. Tobias [3], H.E. Merritt [4] та іншими, які для моделювання вібрації використовували лінійні диференціальні рівняння, де період між двома послідовними різаними відповідав часовій затримці в процесі різання. Вони припускали,

що заготовка жорстка, а інструмент податливий, що дозволило їм визначити миттєву товщину шару, що зрізається, на основі поточного і попереднього положення заготовки. Основним механізмом збудження вібрацій в теорії регенеративних АК лежить умова, за якою в кожний момент часу зрізається шар змінної товщини.

За минулі роки було проведено безліч досліджень вібростійкості процесу механічної обробки, що ґрунтуються на теорії регенеративних АК [5, 6, 7]. Амосовим І.С. встановлено [8], що близько 85% енергії, що



йде на підтримку АК, походить від різання саме за вібраційним слідом.

Однак сучасні уявлення про механізм стружкоутворення не узгоджуються з основами закладеними в теорії регенеративних АК. Тому дослідження умов різання за вібраційним слідом при точінні досі залишається актуальним завданням.

Аналіз досліджень та публікацій.

Теорія регенеративних АК, запропонована S.A. Tobias [3] стала основною для подальших досліджень у цій галузі [9, 10, 11]. В основі цієї теорії лежить припущення, що рівень вібрації залежить від величини зсуву фази ψ між вібраційними слідами на поверхні різання сусідніх обертів деталі або проходів інструменту та є ключовим фактором підтримки АК тривалий час.

Механізм виникнення та підтримки регенеративних АК зображений на рис. 1. На рис. 1, а представлена схема різання, при якій хвилясті поверхні різання на поточному та попередньому обертах деталі знаходяться в синфазі, тобто $\psi=0^\circ$. У цьому випадку реальна товщина зрізу $h(t)$ залишається постійною, що не створює умов для збудження стійких АК, на думку засновників теорії регенеративних АК. Проте ситуація кардинально змінюється за наявності фази зсуву. Схема при якій $\psi=180^\circ$, показана на рис. 1, б, реальна товщина зрізу зазнає значних коливань від $h_1(t)$ до $h_2(t)$. Ці коливання товщини зрізу викликають відповідні коливання сили різання, що своєю чергою є основним механізмом підтримки АК протягом тривалого часу.

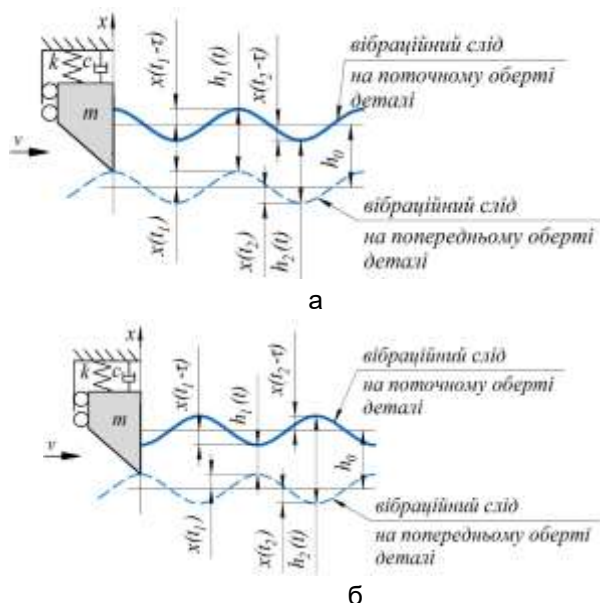


Рис. 1. Вплив фази зсуву хвиль на поверхні різання на величину реальної товщини зрізу $h(t)$ [11] а – $\psi = 0^\circ$, б – $\psi = 180^\circ$.

При регенеративних АК вплив коливання реальної товщини зрізу враховують при визначенні сили різання [9] згідно формули:

$$F(t) = h(t) \cdot b \cdot K_s, \quad (1)$$

де $h(t)$ – змінне значення реальної товщини зрізу;

b – ширина шару, що зрізається;

K_s – питома сила на одиницю площі поперечного перерізу шару, що зрізається. Значення K_s в основному залежать від властивостей оброблюваного матеріалу [11]:

$$K_s = \frac{\tau_{cd}}{\sin \phi \cos(\phi + \mu)}, \quad (2)$$

де ϕ – кут нахилу умовної площини зсуву;

μ – кут дії сили різання F щодо вектору швидкості;

τ_{cd} – дотична напруга зсуву оброблюваного матеріалу.

Реальна товщина шару, що зрізається визначається із залежності [12]:

$$h(t) = h_0 + x(t - \tau) - x(t), \quad (3)$$

де h_0 – номінальна товщина зрізу (при різанні без вібрації);

$x(t - \tau)$ – відхилення хвилі на поверхні різання від номінального значення при попередньому проході інструменту;

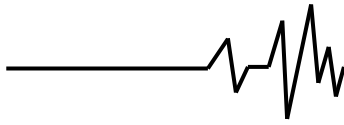
$x(t)$ – відхилення хвилі на поверхні різання від номінального значення при поточному проході інструменту;

τ – час одного оберту деталі при точінні.

Згідно з формулою (3), при різанні за вібраційним слідом, в умовах відсутності зсуву фаз ($\psi=0^\circ$), поточна товщина зрізу $h(t)$ дорівнює номінальній товщині зрізу h_0 . При підстановці умови $h(t)=h_0$ у формулу (1) значення сили різання $F(t)$ залишається постійним у часі і тому не може бути джерелом збудження коливань.

Однак, положення теорії регенеративних АК суперечать фізичним основам процесу стружкоутворення, де шар, що зрізається з поперечним перерізом ($b \times h$) перетворюється на стружку в результаті зсувної деформації в площині зсуву на довжині l , під кутом зсуву ϕ незалежно від форми поздовжнього перерізу шару, що зрізається (наявності хвиль на поверхні).

Також ряд авторів, таких як Еліасберг М.Ю., Жарков І.Г. [8] вважали, що час одного оберту деталі τ при точінні набагато більший за період одного коливання різця-осцилятора T_{AK} . При цьому на поверхні різання формуються десятки, а може і сотні хвиль, коливання довжин яких можуть суттєво впливати на зсув фаз. Результати роботи [13] показали, що при



регенеративних АК величина T_{AK} не постійна та змінюється в певному діапазоні під час точіння. Це призводить до того, що фаза зсуву теж не постійна та коливається в діапазоні від 65° до 135° [13].

S.A. Tobias [3] вважав, що якби на кожній довжині різання одного оберту деталі, вкладалося б ціле число N довжин хвиль λ , то інтенсивність (амплітуда коливань) АК була б мінімальною. Довжина хвилі на поверхні різання визначається як:

$$\lambda = \frac{v}{f_{AK}^{різ}}, \quad (4)$$

де v – швидкість різання;

$f_{AK}^{різ}$ – частота коливань різця-осцилятора під час різання.

Швидкість різання залежить від діаметру оброблюваної поверхні та частоти обертання деталі згідно формули:

$$v = \frac{\pi D n}{1000}, \quad (5)$$

де n – частота обертання деталі;

D – діаметр оброблюваної поверхні.

А кількість хвиль на поверхні різання, в свою чергу, визначається згідно формули:

$$N = \frac{\pi D}{\lambda}, \quad (6)$$

Формулу (4) для довжини хвилі, з урахуванням формули (5), можна переписати наступним чином:

$$\lambda = \frac{\pi D n}{1000 f_{AK}^{різ}}, \quad (7)$$

Частота коливань різця-осцилятора під час різання постійна та залежить тільки від характеристик його пружної системи. Тоді як довжина хвилі на поверхні різання залежить від швидкості різання. S.A. Tobias вважав, що зміною частоти обертання шпинделя згідно з формулою (7) можна отримати умову, при якій на кожному оберті деталі на поверхні різання буде однакова кількість цілих хвиль N . Це означає, що між сусідніми хвилями буде відсутня фаза зсуву ψ і джерело генеративних АК буде усунуто. Найгіршою умовою максимальних АК буде випадок, коли на поверхні різання буде розташовано N цілих

хвиль і залишок довжини однієї хвилі рівний $0,75\lambda$ [11]. На основі цих міркувань, він запропонував пелюсткову діаграму стійкості (SLD – Stability Lobe Diagram) [14], яка дозволяє шляхом зміни частоти обертання шпинделя (деталі) знаходити області безвібраційного різання, вести обробку з більшою глибиною різання.

У роботі [15] експериментально підтверджено те, що залишок довжини однієї хвилі на поверхні різання не може бути оцінкою зсуву фази хвиль на сусідніх обертах деталі. Було встановлено, що розкид залишку довжини хвилі на поверхні різання для кожного оберту деталі змінний та його значення лежать в діапазоні від 0 до 1. Довжина хвилі на поверхні різання не залежить від частоти обертання шпинделя при постійній швидкості різання. Експериментально встановлений факт зменшення хвилястості на поверхні різання зі збільшенням довжини хвилі. Отримані результати [13, 15] підтверджують те, що розробниками теорії регенеративних АК не було враховано фізичні основи процесу стружкотворення.

У роботі [8] викладено фізичні основи точіння з накладеними вібраціями. Дослідження показали ефективність даного методу для дроблення стружки, поліпшення оброблюваності сталей і сплавів. Розглянуто питання кінематики, механіки та фізики процесу різання з вібраціями при використанні спеціального вібросупорту з коливаннями різця в напрямку зміни товщини зрізу. За рахунок накладання вібрацій із частотою f_F на поверхні різання утворювалася хвиля (рис. 2). В.М. Подураєв встановив, що за наявності хвиль на поверхні різання спостерігається постійне коливання довжини і кута площини зсуву. При узгодженні частоти вібрацій вібросупорта з частотою обертання деталі він міг легко встановити будь-яке значення зсуву фаз між сусідніми обертами деталі. На рис. 2 розглянуті умови стружкоутворення при $\psi=0^\circ$ з якого видно, що у кожний момент часу довжина умовної площини зсуву $l(t)$ є змінною величиною і як наслідок змінною величиною є реальна товщина зрізу $h(t)$. Закон коливання довжини площини зсуву (рис. 3) носить строго періодичний характер.

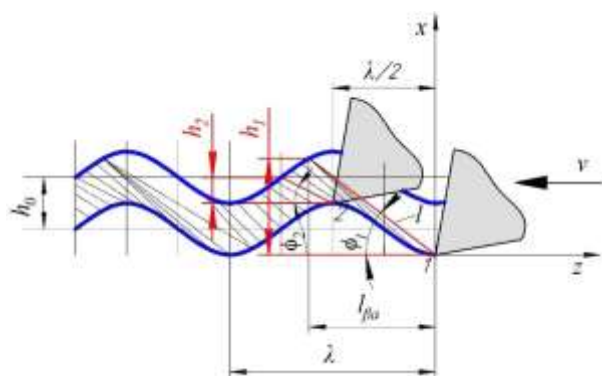
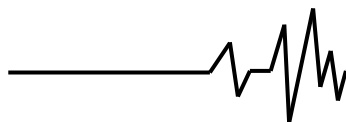


Рис. 2. Залежність умов стружкоутворення від співвідношення розмірів зони випереджальних деформацій I_{ϕ} та довжини хвилі вібрацій λ [8]

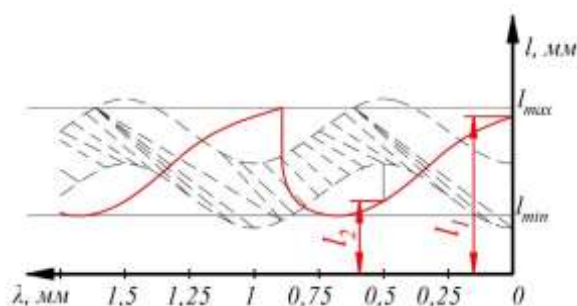


Рис. 3. Закон коливання довжини площини зсуву I з накладеною схемою зміни довжини площини зсуву

Відмінність результатів, отриманих В.М. Подураєвим від основ закладених у теорії регенеративних коливань полягає в тому, що коливання збуджувались штучно вібропідпором з частотою f_F . У той час як при регенеративних АК вібрація збуджується в результаті різання по вібраційному сліді з частотою $f_{AK}^{риз}$, що близька до значення власної частоти пружної системи різця-осцилятора f_n . Однак, умови стружкоутворення в обох випадках залишаються подібними – це зсув матеріалу, що обробляється під кутом ϕ по площині ($I \times b$).

Порівняння схем регенеративного АК С.А. Tobias та схему вібраційного точіння В.М. Подураєва показало однакову закономірність: в обох випадках період вібраційної хвилі на поверхні різання та період зміни довжини площини зсуву I (а також товщини зрізу h) рівні.

Мета роботи. Метою роботи є дослідження умов різання та механізму стружкоутворення при точінні за вібраційним слідом.

Оцінка дійсних умов різання за вібраційним слідом при точінні. Згідно з аналізом наявних досліджень була сформульована фізично вірна картина утворення стружки в умовах різання за вібраційним слідом,

коли поздовжній переріз шару, що зрізається, є хвилеподібною смугою (рис. 4).

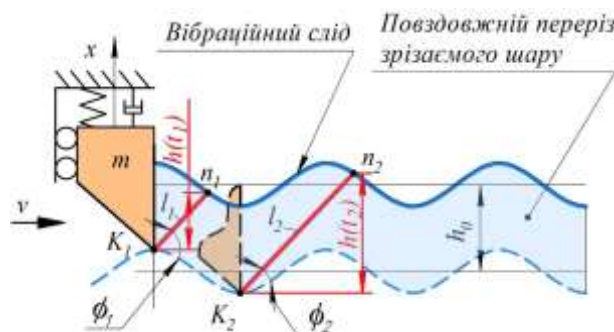


Рис. 4 Зміна реальної товщини зрізу при різанні за вібраційним слідом

На рис. 4 показана схема різання в умовах регенеративних АК, при відсутності зсуву фаз між хвилями на сусідніх обертах деталі $\psi = 0^\circ$. Показано два положення різця в момент часу t_1 та t_2 . В обох випадках вершина різця знаходиться в положенні, коли основна площина P_v , проведена перпендикулярно до вектора швидкості різання, не змінює величину фактичного переднього кута і таким чином не впливає на величину кута нахилу умовної площини зсуву. У положенні різця в момент часу t_1 довжина площини зсуву дорівнює l_1 , а дійсна товщина зрізу $h(t_1)$. У час t_2 довжина площини зсуву дорівнює l_2 , а дійсна товщина зрізу $h(t_2)$.

Таким чином видно, що в кожен момент часу довжина площини зсуву l і дійсна товщина шару, що зрізається $h(t)$ є змінними величинами. Графік зміни цих величин показано на рис. 5. При підстановці змінного значення $h(t)$ у формулу (1) отримуємо періодично змінне значення сили різання F , яке є джерелом збудження вібрацій при різанні за вібраційним слідом. Необхідно відзначити, що при різанні за вібраційним слідом, коливання довжини площини зсуву l , і як наслідок цього, коливання реальної товщини зрізу $h(t)$ спостерігається при будь-якому значенні зсуву фаз від 0° до 360° .

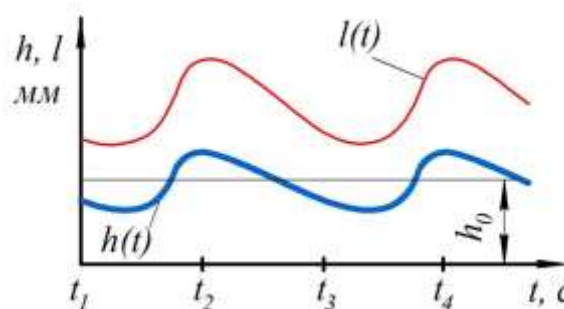
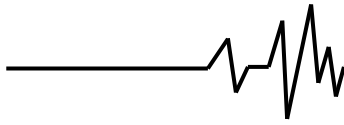


Рис. 5. Теоретичні графіки зміни довжини площини зсуву та реальної товщини зрізу



Для різання по вібраційному сліді період однієї хвилі на поверхні різання завжди залежить від частоти власних коливань пружної системи різця-осцилятора f_n . Період коливання довжини площини зсуву дорівнює періоду коливань хвилі на поверхні різання $1/f_n$. Але оскільки коливання l , визначає коливання сили різання F , то виходить, що частота коливань сили різання f_F дорівнює частоті власних коливань пружної системи різця-осцилятора. Відношення цих частот $f_F/f_n = 1$ відповідає умові резонансу. Таким чином, при різанні за вібраційним слідом коливання завжди збуджуватимуться в умовах резонансу, незалежно від величини фази зсуву.

Методика досліджень. Для перевірки умов різання за вібраційним слідом при точінні була використана експериментальна установка аналогічна [16]. Для дослідження була обрана схема повздовжнього переривчастого точіння в умовах ортогонального різання (рис. 6). При точінні в якості інструменту використовували різець-осцилятор з одним ступенем свободи в напрямку зміни реальної товщини зрізу [16]. Різець-осцилятор через спеціальний пристрій встановлювався в різцетримачі токарного верстата з ЧПК моделі Zenitech WL 320. Програмування верстата виконували за допомогою програми NX CAM. На корпусі спеціального пристрою був встановлений індуктивний датчик переміщень моделі XS4-R12AB110, який вимірював коливання різальної кромки різця-осцилятора при регенеративних АК по вісі X. Сигнал від датчику через аналогово-цифровий перетворювач моделі E14-140-M передавався на персональний комп'ютер та записувався у вигляді осцилограм за допомогою програми LGraph2. Аналіз осцилограм виконували в програмі PowerGraph 3.3 та NX. В якості заготовки використовували кругляк діаметром 110 мм та довжиною 100 мм

зі сталі 45. По осі заготовки був виконаний паз шириною 22 мм. При дослідженні варіювали режими різання: швидкість різання v від 100 до 250 м/хв; глибина різання t від 0,5 до 2 мм, подача інструменту S від 0,05 до 0,5 мм/об. Ріжучу пластинку використовували із твердого сплаву BK8 з кутами: $\alpha=10^\circ$, $\gamma=0^\circ$, $\lambda=0^\circ$, $r=0,4$ мм. Площадка зношення по задній поверхні становила $h_3=0,1\ldots 0,2$ мм. Мазильно-охолоджувальну рідину не використовували.



Рис. 6. Робоче місце для дослідження вібрацій

Результати досліджень та обговорення. Умови точіння деталі з пазом забезпечували на кожному оберті деталі при врізанні ріжучої кромки в поверхню деталі однакові початкові умови – точка початку коливань була постійною, тобто був відсутній зсув фази між попереднім та поточним вібраційним слідом на поверхні різання. За цих умов згідно теорії регенеративних АК не повинні збуджуватись вібрації. Водночас на отриманих осцилограмах чітко видно, що після врізання йде ділянка на якій супроводжуючі вільні коливання налаштування АК і ділянка стійких АК (рис. 7).

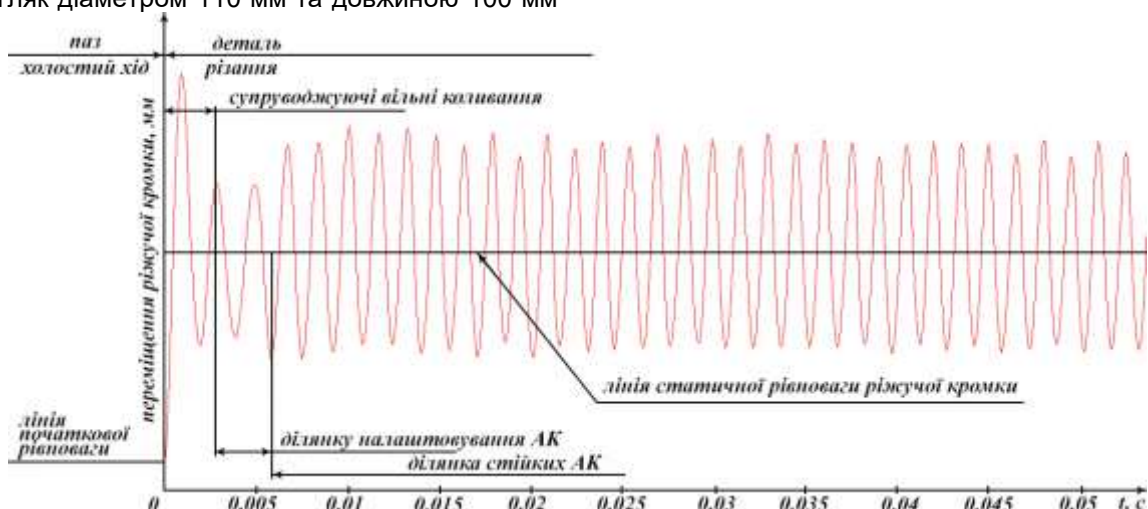
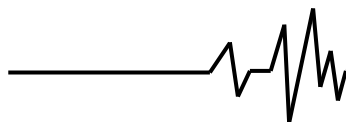


Рис. 7. Осцилограма точіння деталі з пазом на 10 оберті ($v=200$ м/хв; $S=0,2$ мм/об; $t=1$ мм)



При накладенні декількох сусідніх обертів деталі (рис. 8) видно, що на ділянці візання відсутній зсув фаз. Супроводжуючі вільні коливання при накладанні сусідніх обертів мають майже однакову форму. Але

починаючи з ділянки налаштування АК видно як період коливань має не постійне значення що призводить до появи зсуву фаз, також перемінного значення.

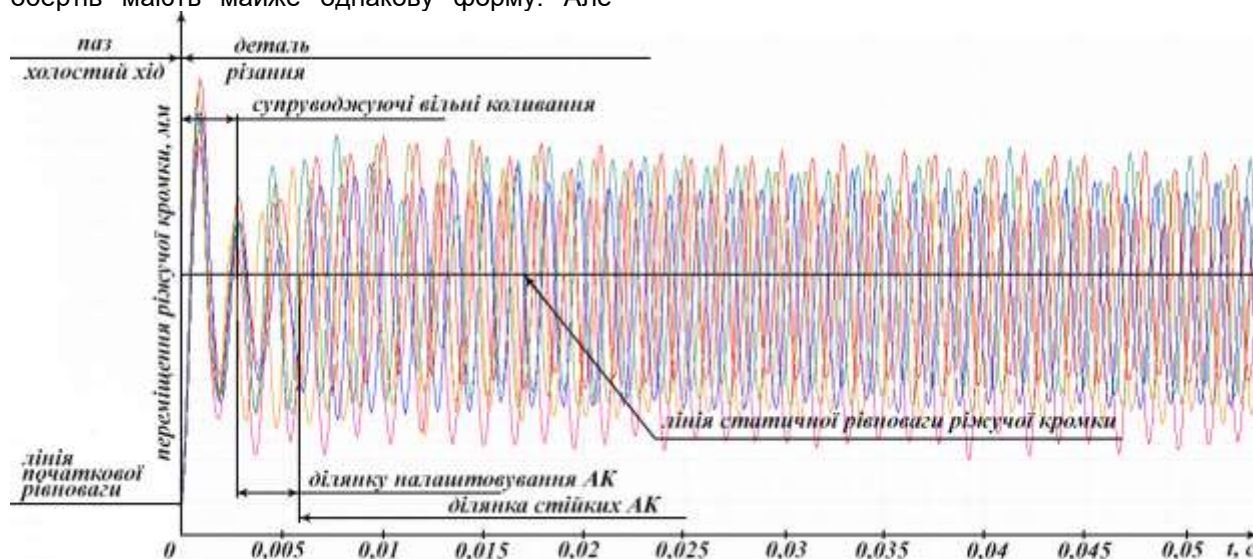


Рис. 8. Накладення осцилограм 10, 11, 12, 13, 14, 15 обертів при точінні деталі з пазом ($v=200\text{м/хв}$; $S=0,2\text{мм/об}$; $t=1\text{мм}$)

Отримані результати підтверджують той факт що зсув фаз не є причиною АК. Він виникає за рахунок коливання періоду однієї хвилі на ділянці стійких АК.

Висновки. Проведено аналіз фізичних основ процесу стружкотворення в умовах різання за вібраційним слідом при точінні. Розглянуто випадок, коли зсув хвиль на поверхні різання на сусідніх обертах деталі дорівнює нулю. У цьому випадку, згідно з теорією регенеративних АК, відсутнє коливання товщини зрізу і як наслідок, відсутнє коливання сили стружкотворення, що є джерелом підтримки вібрацій.

На основі сучасних досліджень регенеративних АК і результатів дослідження фізики процесу стружкотворення при точінні з накладеними вібраціями, було експериментально показано, що при наявності хвиль на поверхні різання на сусідніх обертах деталі при точінні реальна товщина зрізу завжди змінна та не залежить від значення зсуву фаз. Таким чином показано помилкове твердження, що відсутність зсуву фаз між вібраційними хвилями на поверхні різання сусідніх обертів деталі забезпечує безвібраційне різання.

Список використаних джерел

1. Wang, A., Zhou, B., Jin, W. Dynamics of the regenerative turning chatter with little mass eccentricity. *International Journal of Non-Linear*

Mechanics, 2024. 166. P. 104851.

<https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2024.104851>

2. Tlustý, J., Spacek, L. Samobuzene Kmity v obrabecich strojish. Nakl. Cesk. Akad. Ved., 1954. 395 p.

3. Tobias S. A., Fiswick W. Theory of Regenerative Machine Tool Chatter. London : Engineering, 1958. 258 p.

4. Merritt H.E. Theory of Self-Excited Machine Tool Chatter Trans. *ASME Journal of Engineering for Industry*, 1965. 87. P. 447–454. <https://doi.org/10.1115/1.3670861>

5. Hayasaka T., Xu Y., Jung H., Shamoto E., Xu L. Regenerative chatter by teeth allocated in the cutting direction with position-dependent modal displacement ratios. *CIRP Annals*, 2019. Vol. 68(1), P. 409-412.

<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.003>

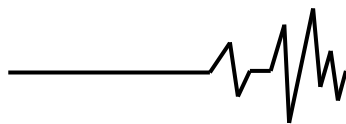
6. Kamada Y., Kitakaze A., Sannomiya K., Nakaya T., Sasahara H. Mechanism to suppress regenerative chatter vibration due to the effect of air-cutting and multiple regeneration during low frequency vibration cutting. *Precision Engineering*, 2022. 78. P. 1-18.

<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2022.07.002>

7. Du J., Liu X., Long X. Time delay feedback control for milling chatter suppression by reducing the regenerative effect. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022. 309. P. 117740.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117740>

8. Динаміка станков : тем. покажчик літ. / уклад. З.Х. Ісламгулова ; наук. кер. Г.О. Оборський. Одеса : ОНПУ, 2008. 43 с.



9. Tlustý G. Manufacturing Process and Equipment. Prentice Hall, 2000. 928 p.

10. Altintas Y. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. *Appl. Mech. Rev.*, 2001. 54(5). B84-B84. <https://doi.org/10.1115/1.1399383>

11. Schmitz T.L., Smith K.S. Machining dynamics: Frequency response to improved productivity (2nd Ed.). New York : Springer, 2019. 382 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-93707-6>

12. Sahu G.N., Vashisht S., Wahi, P., Law, M. Validation of a hardware-in-the-loop simulator for investigating and actively damping regenerative chatter in orthogonal cutting. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2020. 29(A). P. 115-129. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.03.002>

13. Vnukov Y., Tryshyn P., Kozlova O., Dyadya S. Experimental research on regenerative self-oscillations during turning. In Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. P. 358-372. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_32

14. Yuvaraju B. A. G., Srinivas J., Nanda, B. K. Nonlinear dynamics of friction-induced regenerative chatter in internal turning with process damping forces. *Journal of Sound and Vibration*, 2023. 544. P. 117386. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117386>

15. Tryshyn P., Vnukov Y., Kozlova O., Dyadya S. Experimental verification of the impact of phase shift between neighboring waves on the intensity of regenerative oscillations during continuous cutting. In Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. P. 342-357. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_31

16. Vnukov Y., Tryshyn P., Kozlova O., Dyadya S. Cutter-Oscillator with Single-Degree-of-Freedom for the Study of Cutting Vibrations. *Strojnícky časopis-Journal of Mechanical Engineering*, 2024. 74(1). P. 169-180. <https://doi.org/10.2478/scjme-2024-0017>

References

1. Wang A., Zhou B., Jin W. (2024). Dynamics of the regenerative turning chatter with little mass eccentricity. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. Vol. 166. P. 104851. [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2024.104851>

2. Tlustý J., Spacek L. (1954). Samobuzene Kmity v obrábecích strojích. *Nakl. Cesk. Akad. Ved.* P. 395. [in Czech]

3. Tobias S. A., Fiswick W. (1958). Theory of Regenerative Machine Tool Chatter. *Engineering*. 258 p. [in English].

4. Merritt H.E. (1965). Theory of Self-Excited Machine Tool Chatter Trans. *ASME Journal of Engineering for Industry*. Vol. 87. P. 447-454. [in English]. <https://doi.org/10.1115/1.3670861>

5. Hayasaka T., Xu Y., Jung H., Shamoto E., Xu L. (2019). Regenerative chatter by teeth allocated in the cutting direction with position-dependent modal displacement ratios. *CIRP Annals*. Vol. 68(1), P. 409-412. [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.003>

6. Kamada Y., Kitakaze A., Sannomiya K., Nakaya T., Sasahara H. (2022). Mechanism to suppress regenerative chatter vibration due to the effect of air-cutting and multiple regeneration during low frequency vibration cutting. *Precision Engineering*. Vol. 78. P. 1-18. [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2022.07.002>

7. Du J., Liu X., Long X. (2022). Time delay feedback control for milling chatter suppression by reducing the regenerative effect. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 309. P. 117740. [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117740>

8. Islamhulova Z.Kh., H.O. Oborskyi. (2008). Dynamika stankov : tem. pokazhchyk lit. *ONPU*, 43 p. [in Ukrainian].

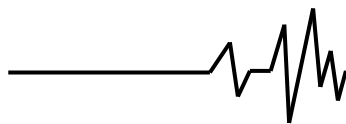
9. Tlustý G. (2000). Manufacturing Process and Equipment. *Prentice Hall*. 928 p. [in English].

10. Altintas Y. (2001). Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. *Appl. Mech. Rev.* Vol. 54(5). P. 84-84. [in English]. <https://doi.org/10.1115/1.1399383>

11. Schmitz T.L., Smith K.S. (2019). Machining dynamics: Frequency response to improved productivity (2nd Ed.). *Springer*. 382 p. [in English]. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-93707-6>

12. Sahu G.N., Vashisht S., Wahi, P., Law, M. (2020). Validation of a hardware-in-the-loop simulator for investigating and actively damping regenerative chatter in orthogonal cutting. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. Vol. 29(A). P. 115-129. [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.03.002>

13. Vnukov Y., Tryshyn P., Kozlova O., Dyadya S. (2025). Experimental research on regenerative self-oscillations during turning. In Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes. Cham: Springer Nature Switzerland. P. 358-372. [in English]. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_32



14. Yuvaraju B. A. G., Srinivas J., Nanda, B. K. (2023). Nonlinear dynamics of friction-induced regenerative chatter in internal turning with process damping forces. *Journal of Sound and Vibration*. 544. P. 117386. [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117386>

15. Tryshyn P., Vnukov Y., Kozlova O., Dyadya S. (2025). Experimental verification of the impact of phase shift between neighboring waves on the intensity of regenerative oscillations during continuous cutting. In *Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes*. Cham: Springer Nature Switzerland. P. 342-357. [in English]. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_31

16. Vnukov Y., Tryshyn P., Kozlova O., Dyadya S. (2024). Cutter-Oscillator with Single-Degree-of-Freedom for the Study of Cutting Vibrations. *Strojnícky časopis-Journal of Mechanical Engineering*. Vol. 74(1). P. 169-180. [in English]. <https://doi.org/10.2478/scjme-2024-0017>

RESEARCH OF CUTTING CONDITIONS BY VIBRATION TRACE DURING TURNING

The paper considers the basic cutting conditions during turning under conditions of regenerative self-oscillations (SO). The physical foundations of the chip formation process under conditions of cutting following a vibration trace during turning are analyzed. The case is considered when the wave shift on the cutting surface on adjacent revolutions of the part is zero. In this case, according to the theory of regenerative SO, there is no fluctuation of the cut thickness and, as a result, there is no fluctuation of the chip formation force, which is a source of vibration support. The conditions of experimental

turning of a part with a groove provided the same initial conditions at each revolution of the part when the cutting edge penetrates the surface of the part - the point of the beginning of the oscillations was constant, that is, there was no phase shift between the previous and current vibration trace on the cutting surface. Under these conditions, according to the theory of regenerative SO, vibrations should not be excited. At the same time, the obtained oscillograms clearly show that after the cutting there is a section in which the accompanying free oscillations are damped, then there is the section of the SO adjustment and the section of stable SO. When superimposing the oscillograms of several adjacent revolutions of the part, it is clear that there is no phase shift in the cutting section. The accompanying free oscillations when superimposing adjacent revolutions have almost the same shape. But starting from the SO adjustment section, it is visible that the oscillation period has a non-constant value, which leads to the appearance of a phase shift of a variable value. The results of the experiments showed that in the presence of waves on the cutting surface on adjacent revolutions of the part during turning, the real thickness of the cut is always variable and does not depend on the value of the phase shift. Thus, the erroneous statement that the phase shift between the vibration waves on the cutting surface of adjacent revolutions of the part provides excitation of vibrations has been refuted. Based on the results obtained, a physically correct picture of chip formation under the conditions of cutting along a vibration trace, when the longitudinal cross-section of the layer being cut is a wavy strip, has been formulated.

Keywords: regenerative self-oscillations, cutter-oscillator, oscillogram, vibration trace, turning.

Відомості про автора

Тришин Павло Романович – д-р філ., доцент кафедри технології машинобудування Національного університету «Запорізька політехніка» (69000, вул. Жуковського, 64 м. Запоріжжя, Україна, e-mail: trishin@zp.edu.ua), ORCID 0000-0002-3301-5124

Tryshyn Pavlo – Ph. D., Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia (69000, 64 Zhukovsky St., Zaporizhia, Ukraine, e-mail: trishin@zp.edu.ua), ORCID 0000-0002-3301-5124