

ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ТА ОБРОБКИ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

TECHNOLOGIES OF OBTAINING AND PROCESSING OF CONSTRUCTION MATERIALS

УДК 621.941.08

Павло Тришин	д-р філософії, доцент кафедри технології машинобудування Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: trishin@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3301-5124
Олена Козлова	канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: kozlova@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3478-5913
Наталя Гончар	канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: gonchar.zntu@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6040-0394
Іван Гембель	аспірант кафедри технології машинобудування Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: gembivan@zp.edu.ua, ORCID: 0009-0005-8442-5288

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОБРОБЛЮВАНОГО МАТЕРІАЛУ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ РЕГЕНЕРАТИВНИХ АВТОКОЛИВАНЬ ПРИ ТОЧІННІ

Мета роботи. Дослідження впливу оброблюваного матеріалу на інтенсивність регенеративних автоколивань при точінні.

Методи дослідження. Дослідження проводили експериментальним методом, при якому записували осцилограми коливальних різальної кромки різця-осцилятора. Аналітичним методом досліджували осцилограми, на яких виміряли параметри коливальної системи різця-осцилятора, що характеризують закон руху різальної кромки при автоколюваннях.

Отримані результати. Встановлено, що на інтенсивність автоколивань при точінні впливає тип кристалічної ґратки та кількість площин зсуву оброблюваного матеріалу. Чим більше кількості площин зсуву, тим легше матеріал піддається пластичній деформації і тим інтенсивніші вібрації можуть генеруватися. Також на здатність збудження або гасіння вібрацій при точінні особливо впливає частота сегментації стружки. Так, наприклад, низька частота сегментації стружки при точінні важкооброблюваних матеріалів (титан) може гасити регенеративні автоколювання. Обробка різних матеріалів при інтенсивних регенеративних автоколюваннях відбувається з утворенням різних типів стружки: суглобистої, надлому, циклічної.

Наукова новизна. Отримані результати підтверджують вплив механічних та фізико-технічних властивостей оброблюваного матеріалу на збудження або гасіння регенеративних автоколивань. Властивості оброблюваного матеріалу впливають на процес стружкоутворення у зоні різання, який у розумінні класичної схеми автоколивальної системи є регулятором.

Практична цінність. Отримані результати доводять вплив властивостей оброблюваного матеріалу на інтенсивність регенеративних автоколивань при точінні і надають можливість проводити необхідні заходи для зменшення вібрацій.

Ключові слова: регенеративні автоколювання, різець-осцилятор, осцилограма, механічні властивості.

Вступ

Токарна обробка використовується в різних галузях промисловості, де потрібне виготовлення циліндричних, конічних, різбових та фасонних деталей. Процес токарної обробки в деяких випадках супрово-

джується інтенсивними вібраціями, спричиненими регенеративними автоколюваннями (АК). Регенеративні АК являють собою вібрацію, що самозбуджується, викликану різанням інструментом хвилеподібної поверхні, утвореної на попередньому оберті деталі. Вібрації

при різанні призводять до надмірного зношення інструменту, поганої якості поверхні, шуму та ін. [1].

Було проведено багато досліджень регенеративних АК [2, 3, 4]. Більшість з них спрямоване на усунення АК при різанні, для цього посилюють пружну систему деталь-інструмент [5], використовують динамічні віброгасники [6], підбирають оптимальну геометрію різця [7] та призначають режими різання [8], які дозволяють вийти із зони стійких вібрацій. Проте до теперішнього часу про механізм збудження регенеративних АК різні автори мають різні погляди [9, 10].

Сьогодні у машинобудуванні застосовується широкий асортимент матеріалів з різними механічними та фізико-технічними властивостями, що функціонують у різних умовах. Використання даних матеріалів вимагає дослідження впливу їх властивостей на збудження вібрацій з метою вдосконалення існуючих методів лезової обробки та підвищення їх продуктивності.

Аналіз досліджень та публікацій

На даний час основним матеріалом для досліджень регенеративних АК є найпоширеніший матеріал у машинобудуванні – сталь. Так наприклад, у роботі [11] досліджувався вплив умов застосування охолодження та мастила на збудження вібрацій при точінні вуглецевої сталі. Виявлення відгуку акустичної емісії на вібрацію заготовки під час точіння валів із середньовуглецевої сталі марки 1045 розглянуто у роботі [12]. У роботі [13] пропонувалося використання технології ISC для зниження вібрацій при токарній обробці сталевого валу з використанням інструменту з великим вильотом.

Один з основних акцентів при вивченні збудження АК займає зона різання. Але більшість досліджень характеру стружкоутворення, деформації та напруги в зоні різання, температури різання для більшості матеріалів здійснено в умовах безвібраційного різання. При дослідженні динаміки процесу різання в наявних публікаціях не проводилось порівняльного аналізу впливу різного оброблюваного матеріалу на збудження АК. Так, наприклад, у роботі [14] лише представлена методика динамічної зміни частоти обертання заготовки для зриву регенерації АК при високошвидкісному точінні деталей з двох різних матеріалів: дюралюмінієвого сплаву Д16Т та сталі 40Х.

Обробка різних матеріалів може суттєво відрізнятися, через різні механічні властивості. Так у роботі [15] встановлено, що при точінні нікелевого сплаву Inconel 718 на низьких швидкостях частота сегментації стружки визначалася частотою вібрації, яка була близька до власної домінуючої частоти пружної системи. Смуги зсуву приводили до сегментованої стружки, що, своєю чергою, викликало коливання сили, яка збуджувала вібрації. У деяких умовах різання важко відрізнити регенеративні АК від смуг зсуву, оскільки обидва процеси виникають через коливання товщини стружки. У той час як вібрація відбувається поблизу власної домінуючої частоти пружної системи, частота утворення смуг зсуву залежить від швидкості різання і товщини стружки і може відбуватися на іншій частоті.

Через відсутність достатнього обсягу досліджень про збудження регенеративних АК при точінні різних матеріалів, а також впливу їх властивостей на інтенсивність вібрацій, проведення додаткових досліджень у цій галузі є актуальним завданням.

Мета роботи

Метою роботи було дослідження впливу оброблюваного матеріалу на інтенсивність регенеративних АК при точінні.

Матеріал і методика досліджень

Для дослідження впливу оброблюваного матеріалу на інтенсивність регенеративних АК була обрана схема повздовжнього точіння в умовах ортогонального різання. При точінні в якості інструменту використовували різець-осцилятор з одним ступенем свободи в напрямку зміни реальної товщини зрізу, вісі x – різець-осцилятор X [16]. Різець-осцилятор X встановлювався в спеціальне пристосування, яке закріплювалось на токарному верстаті з ЧПК моделі Zenitech WL 320. Конструкція спеціального пристосування забезпечувала можливість зміни вильоту L від 80 до 125 мм та прикладання додаткової маси m_0 до головки різця-осцилятора від 0 г до 344 г (рис. 1). Це дозволяло змінювати власну частоту коливання f_n в широкому діапазоні від 350 до 750 Гц. На корпусі спеціального пристосування був встановлений індуктивний датчик переміщень моделі XS4-P12AB110, який вимірював коливання різальної кромки різця-осцилятора при регенеративних АК по вісі x . Аналоговий сигнал від датчика через аналогово-цифровий перетворювач моделі E14-140-M перетворювався в цифровий та передавався на персональний комп'ютер, записувався у вигляді осцилограм. Запис осцилограм здійснювався за допомогою програми LGraph2, а їх аналіз виконували в програмі PowerGraph 3.3.

При точінні використовували різальні пластинки з твердого сплаву BK8 ($\varphi=90^\circ$, $\alpha=10^\circ$, $\gamma=0^\circ$, $r=0,4$ мм) без покриття та викружок. Для кожного експерименту забезпечували постійне значення площадки зношення h_z по задній поверхні шляхом заточування в діапазоні від 0,1 до 0,2 мм.



Рисунок 1. Робоче місце для дослідження вібрацій

Використовували жорсткі заготовки діаметром 100...150 мм та довжиною до 100 мм зі різних металів та сплавів (таблиця 1).

Таблиця 1 – Механічні властивості заготовок

Матеріал	σ_t , МПа	σ_b , МПа	d_5 , %	y , %	KCU, кДж/м ²	Твердість, HB
ХН73МБТЮ	800	1210	31	24	720	217...294
Сталь 45	275	590	20	40	440	156...197
Д16	275	390	8	40	400	42...65
ВТ22	950	1080	7	17	250	285...320
Сталь 12Х18Н10Т	196	510	40	55	215	179...190
СЧ35	-	350	-	-	100	183...241
БрАЖ9-4	420	540	15	50	500	110...180
С2	5	11	30	30	2500	3...5
М2	90	180	32	25	1400	55...95

Примітка. σ_t – границя плинності, МПа; σ_b – границя міцності, МПа; d_5 – відносне подовження, %; y – відносне звуження, %; KCU – ударна в'язкість, кДж/м²; HB – твердість за Брінелем.

Режими різання змінювали в широкому діапазоні: швидкість різання v від 25 до 500 м/хв; глибину різання t від 0,5 до 3 мм, подачу інструменту S від 0,05 до 0,5 мм/об. Під час експериментів використовували охолоджуючу рідину.

Результати досліджень та обговорення

Під час дослідження закономірностей інтенсивності АК при точінні різних матеріалів змінювали режими різання. Закон руху різальної кромки при АК відповідав записаним осцилограмам. На отриманих осцилограмах (рис. 2–5) були виміряні значення амплітуди коливання A_x і статичного відхилення B_x різальної кромки на ділянці АК, що встановилися. Відповідно до цих даних були побудовані графіки залежності амплітуди коливань та статичного відхилення від швидкості різання (рис. 6, 7).

При використанні різальної пластинки з площею зносу 0,1...0,2 мм графіки залежності амплітуди коливань від швидкості різання мали екстремум для ряду досліджуваних матеріалів, таких як сталь 45, сталь 12Х18Н10Т, СЧ35. Тобто спостерігалось певні значення критичної швидкості різання, яким відповідали максимальні амплітуди коливань. Показані залежності підтверджують раніше отримані результати [17, 18].

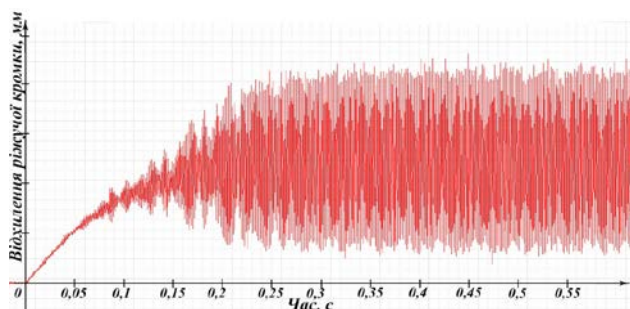


Рисунок 2. Осцилограма, отримана при точінні сталі 45 ($v = 250$ м/хв, $S = 0,2$ мм/хв, $t = 1$ мм, $L = 100$ мм, $m_d = 0$ г)

У той же час при точінні таких матеріалів, як Д16, С2, М2, БРАЖ9-4, у досліджуваному діапазоні швидкостей (до 500 м/хв) графік залежності амплітуди коливань від швидкості різання не мав екстремуму. Амплітуда коливань постійно збільшувалася зі зростанням швидкості різання.

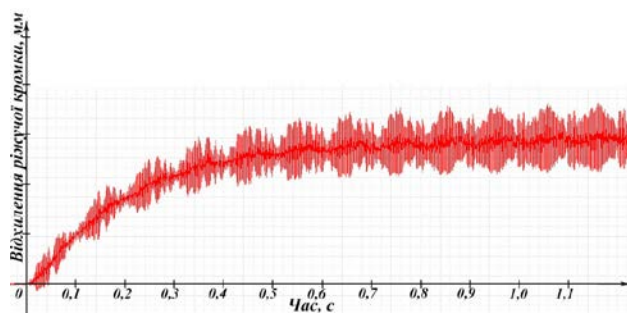


Рисунок 3. Осцилограма, отримана при точінні СЧ35 ($v = 100$ м/хв, $S = 0,2$ мм/хв, $t = 1$ мм, $L = 100$ мм, $m_d = 0$ г)

При точінні ВТ22 та ХН73МБТЮ АК на осцилограмі не спостерігалися, коливання мали періодичний характер, амплітуда яких у досліджуваному діапазоні швидкостей (25...100 м/хв) була досить низькою та не змінювалася зі збільшенням швидкості різання.

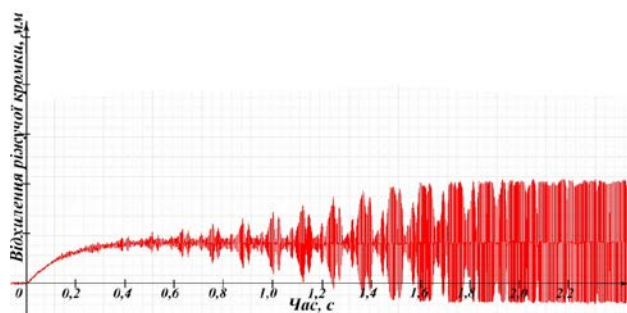


Рисунок 4. Осцилограма, отримана при точінні Д16 ($v = 200$ м/хв, $S = 0,2$ мм/хв, $t = 1$ мм, $L = 100$ мм, $m_d = 0$ г)

Зміна параметрів різця-осцилятора Х (виліт, додаткова маса) не змінювало залежність амплітуди коливань від швидкості різання для різних матеріалів. При зменшенні жорсткості різця-осцилятора Х та прикладанні додаткової маси графік залежності амплітуди коливань від швидкості різання видовжувався по вертикальній вісі (амплітуди). Тобто коливання збільшувались, але критична швидкість, якій відповідало максимальне значення коливань, практично не змінювалось. Отримані раніше схожі залежності для сталі [17] підтвердилися цим дослідженням на інших досліджуваних матеріалах.

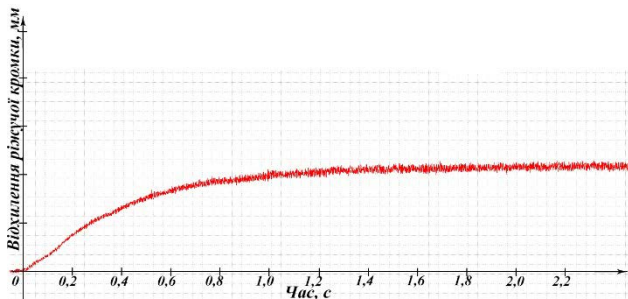


Рисунок 5. Осцилограма, отримана при точінні ВТ22 ($v = 50$ м/хв, $S = 0,2$ мм/хв, $t = 1$ мм, $L = 100$ мм, $m_0 = 0$ г)

Зміна глибини різання пропорційно змінювала інтенсивність АК. Це підтвердило те твердження, що процес стружкоутворення плоский і рівний в кожній точці різальної кромки. Збільшення подачі інструменту в досліджуваному інтервалі трохи зменшувало інтенсивність АК, що підтверджує раніше отримані результати [18].

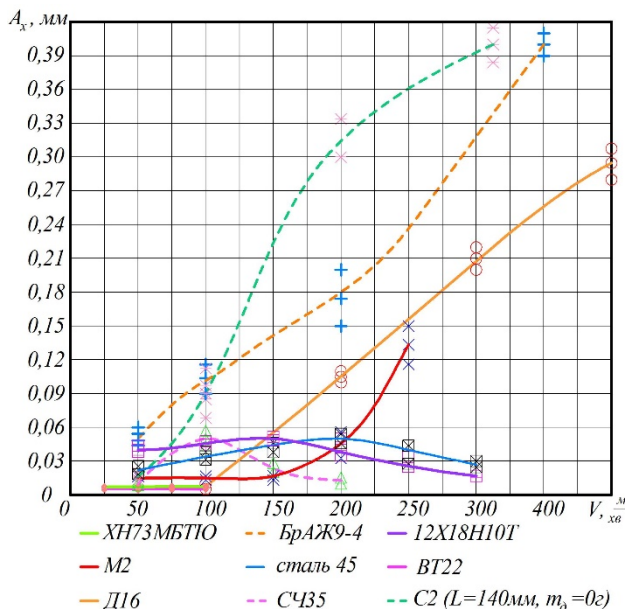


Рисунок 6. Графік залежності амплітуди коливань різальної кромки від швидкості різання ($S = 0,2$ мм/об; $t = 1$ мм; $L = 100$ мм; $m_0 = 0$ г)

Графіки впливу швидкості різання на статичне відхилення різних матеріалів показують однакову тенденцію: зі збільшенням швидкості різання статичне відхилення зменшується (рис. 7).

Зона стружкоутворення у розумінні класичної схеми автоколивальної системи є регулятором. Тому процеси, які у ній відбуваються, відбиваються на амплітуді коливання різця-осцилятора Х. Насамперед, на механізм регулятора впливає пластична деформація, що відбувається в зоні різання.

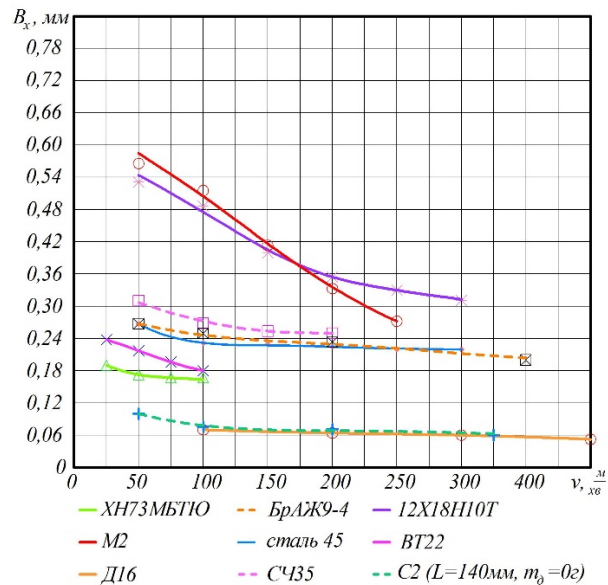


Рисунок 7. Графік залежності статичного відхилення різальної кромки від швидкості різання ($S = 0,2$ мм/об; $t = 1$ мм; $L = 100$ мм; $m_0 = 0$ г)

Пластична деформація в зоні різання різних металів відрізняється через відмінності в їхній атомній структурі, міцності зв'язків, механічних властивостей та хімічному складі. Кожен метал і сплав має свою кристалічну ґратку: об'ємно-центровану кубічну (ОЦК), гранецентровану кубічну (ГЦК), гексагональну щільноупаковану (ГЦУ) (таблиця 2).

Коли різальний інструмент впроваджується в матеріал, у зоні різання виникають напруги, які перевищують границю міцності на зсув. В результаті шари металу зсуваються один відносно другого, утворюючи стружку. Зсув матеріалу відбувається за умовною площиною зсуву, що є основним механізмом утворення стружки. Площина зсуву утворює кут з напрямком руху різального інструменту. Чим вищий кут зсуву, тим легше йде процес різання, оскільки зменшується товщина стружки та сили різання. Кожен матеріал має своє індивідуальне значення кута зсуву (див. табл. 2). Але, наприклад, у титану кут зсуву вдвічі вищий, ніж у сталі, але сили різання не менші, а в рази більші.

Таблиця 2 – Основні характеристики досліджуваних матеріалів

Матеріал	K_m	ϕ , град	Тип кристалічної ґратки
Сталь 45	1,0	15-18°	ОЦК
ВТ22	0,22-0,26	40-45	ГЦУ
ХН73МБТЮ	0,1-0,15	40-45	ГЦК
Д16	2,0-3,0	25-35	ГЦК
Сталь 12Х18Н10Т	0,5-0,6	18-23°	ГЦК
СЧ35	0,7-0,81	30-35	ОЦК
БрАЖ9-4	1,5-2,0	25-30	ГЦК
М2	1,5-2,0	9-10°	ГЦК
С2	4,0-6,0	35-40	ГЦК

Для врахування фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу при різанні використовують критерій, що характеризує оброблюваність матеріалу. Оброблюваність різанням – це здатність матеріалу піддаватися механічній обробці (токарній, фрезерній, свердильній і т. д.) з мінімальними витратами енергії, зносу інструменту та гарною якістю поверхні. Для оцінки оброблюваності користуються коефіцієнтом оброблюваності матеріалу різанням K_m – це відносний показник, що показує, наскільки легко піддається різанню матеріал порівняно з сталлю (як еталонний матеріал використовують сталь 45 ($K_m = 1$)). Оцінку коефіцієнта оброблюваності матеріалу проводять за декількома параметрами: за стійкістю різального інструменту, за силою різання, за якістю обробленої поверхні, за швидкістю різання. У таблиці 2 наведено середні значення K_m при обробці досліджуваних матеріалів інструментом із твердого сплаву, пов'язані зі стандартною стійкістю інструменту та швидкістю різання [19, 20]. Однак K_m не характеризує здатність оброблюваного матеріалу до збудження вібрацій.

Згідно проведених досліджень можна зробити висновки, що, в першу чергу, на здатність оброблюваного матеріалу збуджувати вібрації певної інтенсивності впливає тип кристалічної ґратки. Так, сталь має кристалічну ґратку типу ОЦК або ГЦК, залежно від температурних умов та вмісту вуглецю. Сірий чавун має ОЦК ґратку, проте він більш крихкий за сталь. Алюміній має ГЦК ґратку, що сприяє його високій пластичності. Взагалі ГЦК ґратки мають велику кількість можливих напрямів для ковзання (переміщення) дислокацій, що дає матеріалу можливість деформуватися з більшою податливістю при певних навантаженнях. Титан має ГЦУ ґратку при кімнатній температурі, яка менш піддатлива до деформації порівняно із структурою сталі та алюмінію. Титан обмежений у можливих напрямках ковзання, що робить його більш крихким і менш пластичним при кімнатній температурі. Кількість площин зсуву визначає баланс між пластичністю, міцністю та крихкістю. Чим їх більше, тим легше матеріал піддається пластичній деформації і тим інтенсивніші вібрації може генерувати. У матеріалах з великою кількістю площин зсуву дислокації можуть рухатися вільніше, але зі збільшенням деформації їх рух ускладнюється, що веде до зміцнення і може гасити інтенсивність коливань. Наприклад, у сталі 12 площин зсуву, а у титану тільки 3, що зменшує здатність деформуватися і призводить до низької інтенсивності коливань. Мідь при пластичній деформації спочатку легко змінює форму, але потім зміцнюється, що теж не дає високої інтенсивності коливань.

Також на здатність матеріалу збуджувати вібрації може впливати границя плинності. Сталь часто має більш високу границю плинності, ніж алюміній, що потребує більших зусиль для початку її пластичної деформації. На відміну від сталі, сірий чавун не має чітко вираженої границі плинності через крихкість матеріалу. Титан має високу границю плинності в порівнянні

зі сталлю і зберігає високу міцність при високих температурах. Крім цього, наприклад, сталь зберігає свої пластичні властивості в широкому діапазоні температур до 350 °С. Титан стає пластичним при високих температурах (вище 400...600 °С), завдяки фазовому переходу. Алюміній починає втрачати міцність за температури вище 200...300 °С. При 400–600 °С сірий чавун трохи збільшує свою пластичність, але залишається, в основному, крихким.

При збільшенні швидкості деформації зсуву сталі можуть демонструвати більш високий опір деформації. При збільшенні швидкості зсуву титану спостерігається значне зміцнення. Це пов'язано з ГЦУ ґратками, які ускладнюють ковзання дислокацій. Алюміній та його сплави зазвичай показують менше зміцнення порівняно зі сталлю та титаном зі збільшенням швидкості деформації. Алюміній легше піддається пластичній деформації, оскільки його кристалічна структура сприяє легшому руху дислокацій. Для сірого чавуну чим вища швидкість деформації, тим більша його крихкість, ударна в'язкість різко падає, тому що матеріал не встигає перерозподіляти напруження. Руйнування відбувається лавиноподібно, з миттєвим утворенням тріщин. Руйнування починається по графітовим включенням (вони відіграють роль концентраторів напружень).

В другу чергу, на здатність збудження або гасіння вібрацій при точінні впливає частота сегментації стружки – кількість елементів стружки, на які проходить зсув при різанні за одиницю часу. Вона визначається безліччю факторів, включаючи режими різання, властивості матеріалу тощо. У титану частота сегментації на порядок менше ніж сталей, що робить особливий вплив у гасінні регенеративних АК при дослідженні різцем-осцилятором Х. При обробці різанням сірого чавуну, відсутня сегментація стружки, тому що його обробка дає стружку надлому, що пов'язано з його крихкістю та наявністю графітових включень.

Форма стружки, що утворюється при різанні, характеризує умови процесу стружкоутворення і визначається оброблюваним матеріалом, режимами різання, геометрією інструменту, а так само інтенсивністю регенеративних АК. У ході проведених досліджень при регенеративних АК обробка різних матеріалів відбувалася з утворенням суглобистої стружки, за термінологією І. А. Тімме, в якій окремі частини не відокремлені повністю один від одного, а з'єднані проміжним шаром (див. рис. 8). У багатьох авторів зустрічаються інші назви даного типу стружок: зубчаста, пилкоподібна.

Отримана стружка під час досліджень в умовах вібрацій для одних матеріалів, таких як М2 та С2 (див. рис. 8), мала чітко відокремлені компоненти суглобистої стружки, які через умови тертя на передній поверхні міцно з'єднувались один з одним, утворюючи безперервну стружку. Стружка мала хвилю на вільній стороні, вершини якої були заокругленими. Для інших матеріалів, таких як сталь 45, Д16, Бр.АЖ9-4, стружка на вільній стороні мала хвилю з гострими вершинами (пилкоподібну форму).

Хвиля на вільній стороні стружки утворювалася в умовах циклічної зміни реальної товщини зрізу в результаті регенеративних АК. Її геометрія визначається довжиною хвилі на поверхні різання (швидкістю різання), усадкою і амплітудою регенеративних коливань. Тому для того самого матеріалу, чим більше швидкість різання, тим була більшою довжина хвилі на вільній стороні стружки. А чим більше амплітуда коливань, тим більше співвідношення товщин стружки виміряних по впадині і по вершині хвилі.

При обробці VT22 та ХН73МБТЮ стружкоутворення значно відрізнялося через особливі властивості матеріалу, стружка мала особливу форму – циклічну. Зона різання титану і нікелевого сплаву характеризувалася коротким майданчиком контакту по передній поверхні, і стружка, що утворювалася, мала низький коефіцієнт потовщення в порівнянні з іншими матеріалами. Частота утворених елементів циклічної стружки була на порядок нижча порівняно з іншими матеріалами.

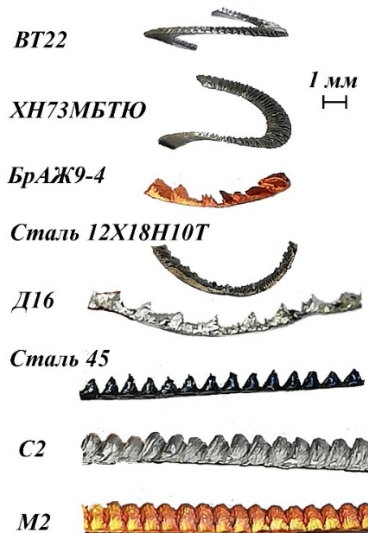


Рисунок 8. Стружка в умовах регенеративних АК

Висновки

В результаті проведених досліджень встановлено, що на здатність оброблюваного матеріалу збуджувати або гасити регенеративні АК впливає тип кристалічної ґратки, кількість площин зсуву, границя плинності та швидкість деформації. Кількість площин зсуву визначає баланс між пластичністю, міцністю та крихкістю. Чим їх більше (сталь, алюміній), тим легше матеріал піддається пластичній деформації і тим інтенсивніше збуджуються вібрації. Наприклад, у сталі 12 площин зсуву, а у титану тільки 3, що зменшує його здатність деформуватися.

Форма стружки, що утворюється при різанні характеризує умови процесу стружкоутворення під час регенеративних АК. На здатність збудження або гасіння вібрацій при точінні особливо впливає частота сегментації стружки, тому що процес стружкотворення дискретний. Так, наприклад, низька частота сег-

ментації стружки при точінні важкооброблюваних матеріалів (титан) може гасити регенеративні АК. Обробка різних пластичних матеріалів (мідь) при інтенсивних регенеративних АК відбувається з утворенням суглобистої стружки. При цьому стружка має хвилю на вільній стороні, вершини якої можуть бути заокругленими або гострими (пилкоподібна форма). Хвиля на вільній стороні стружки утворюється в умовах циклічної зміни реальної товщини зрізу в результаті регенеративних АК. Її геометрія визначається довжиною хвилі на поверхні різання (швидкістю різання), усадкою і амплітудою регенеративних АК. При обробці важкооброблюваних матеріалів стружка мала особливу форму – циклічну. При обробці крихких матеріалів стружка мала тип надлому.

Список літератури

1. Özer A. Numerical Evaluations for Robotic Turning with a Scheduled Modulatory Gain-Based Chatter Controller / A. Özer, A. Sekiguchi // IFAC-PapersOnLine. – 2023. – 56(2). – P. 11111–11116. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.823>
2. Cutting process consideration in dynamic models of machine tool spindle units / Y. Danylchenko, M. Storchak, M. Danylchenko, A. Petryshyn // Machines. – 2023. – 11(6). – 582 p. <https://doi.org/10.3390/machines11060582>
3. A neural network approach for chatter prediction in turning / H. Cherukuri, E. Perez-Bernabeu, M. A. Selles, T. L. Schmitz // Procedia Manufacturing. – 2019. – 34. – P. 885–892. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.159>
4. Beri B. Machining of slender workpieces subjected to time-periodic axial force: stability and chatter suppression / B. Beri, G. Meszaros, G. Stepan // Journal of Sound and Vibration. – 2024. – 504. – 116114 p. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116114>
5. Шевченко О. В. Забезпечення вібростійкості процесу розточування однолезовим інструментом на токарному верстаті / О. В. Шевченко, О. В. Ліщинер-Іващенко // Технічна інженерія. – 2020. – 1 (85). – С. 81–88. [https://doi.org/10.26642/ten-2020-1\(85\)-81-88](https://doi.org/10.26642/ten-2020-1(85)-81-88)
6. Improving optimal chatter control of slender cutting tool through more accurate tuned mass damper modeling / M. Wang, P. Qin, T. Zan et al. // Journal of Sound and Vibration. – 2021. – 513. – 116393 p. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116393>
7. Atsuta, T. (2023). Control of chatter vibration in double inserts turning with phase difference of modulations / Atsuta, T., Yoshimura, H., Matsumura, T. // Precision Engineering. – 2023. – 82. – P. 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2023.03.011>
8. Mohammadi, Y. Finite-amplitude stability in regenerative chatter: The effect of process damping nonlinearity and intermittent cutting in turning / T. Atsuta, H. Yoshimura, T. Matsumura // Journal of Sound and Vibration. – 2022. – 537. – 117158 p. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117158>
9. Schmitz T. L. Machining dynamics / T. L. Schmitz, K. S. Smith // Springer. – 2009. – 303 p.

<https://doi.org/10.1007/978-3-319-93707-6>

10. Experimental verification of the impact of phase shift between neighboring waves on the intensity of regenerative oscillations during continuous cutting / Y. Vnukov, P. Tryshyn, O. Kozlova, S. Dyadya // In Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes. Cham: Springer Nature Switzerland. – 2024. – P. 342–357. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_31

11. Emami M. Theoretical and experimental study of the chatter vibration in wet and MQL machining conditions in turning process // M. Emami, A. Karimipour // Precision Engineering. – 2021. – 72. – P. 41–58. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.04.006>

12. Vibration and acoustic emission monitoring the stability of peakless tool turning: Experiment and modeling / A. V. Filippov, A. Y. Nikonov, V. E. Rubtsov et al. // Journal of Materials Processing Technology. – 2017. – 246. – P. 224–234. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.03.030>

13. Kasprowiak M. Vibration suppression with use of input shaping control in machining / M. Kasprowiak, A. Parus, M. Hoffmann // Sensors. – 2022. – 22(6). – 2186 p. <https://doi.org/10.3390/s22062186>

14. Залога В. О. Методологічні основи підвищення ефективності оброблення деталей шляхом керування динамікою процесу високошвидкісного точіння з високими частотами обертання шпинделя : монографія / В. О. Залога, Ю. В. Шаповал. – Суми : Сумський

державний університет, 2024. – 143 с.

15. Nakagawa J. Identification and effect of chip shear band on chatter vibration in the turning of Nickel Alloy 718 / J. Nakagawa, N. D. Farahani, Y. Altintas // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2023. – 44. – P. 82–90. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.05.004>

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

17. Experimental research on regenerative self-oscillations during turning / Y. Vnukov, P. Tryshyn, O. Kozlova, S. Dyadya // 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

18. Основи теорії різання матеріалів : підручник [для вищ. навч. закладів] / М. П. Мазур, Ю. М. Внуков, В. Л. Доброскок та ін. ; під заг. ред. М.П. Мазура. – 2-е вид. перероб. і доп. – Львів : Новийсвіт-2000, 2011. – 422 с.

19. Стали и сплавы. Марочник : Справ. изд. / [Науч. ред. В.Г. Сорокин, М.А. Гервасьев] – М. : «Ин-термет Инжиниринг», 2001. – 608 с.

20. Краткий справочник металлиста / [Под общ. ред. П. Н. Орлова, Е. А. Скороходова]. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1986. – 960 с.

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF THE MACHINED MATERIAL ON THE INTENSITY OF REGENERATIVE SELF-OSCILLATIONS DURING TURNING

Pavlo Tryshyn	Ph. D., Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: trishin@zp.edu.ua , ORCID: 0000-0002-3301-5124
Olena Kozlova	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kozlova@zp.edu.ua , ORCID: 0000-0002-3478-5913
Natalia Honchar	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: gonchar.zntu@gmail.com , ORCID: 0000-0002-6040-0394
Ivan Hembel	Postgraduate student, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: gembivan@zp.edu.ua , ORCID: 0009-0005-8442-5288

Purpose. To study the influence of the processed material on the intensity of regenerative self-oscillations during turning.

Research methods. The research was conducted by an experimental method, in which oscillograms of oscillations of the cutting edge of the cutter-oscillator were recorded. The analytical method was used to study the oscillograms on which the parameters of the oscillatory system of the cutter-oscillator were measured, which characterize the law of motion of the cutting edge during self-oscillations.

Results. It has been established that the intensity of self-oscillations during turning is influenced by the type of crystal lattice and the number of shear planes of the processed material. The greater the number of shear planes, the easier the material is subjected to plastic deformation and the more intense the vibrations can be generated. Also, the ability to excite or dampen vibrations during turning is particularly affected by the frequency of chip segmentation. For

example, a low frequency of chip segmentation during turning of difficult-to-machine materials (titanium) can dampen regenerative self-oscillation. Processing of different materials with intensive regenerative self-oscillation occurs with the formation of different types of chips: articulated, fractured, cyclic.

Scientific novelty. The obtained results confirm the influence of the mechanical and physical and technical properties of the processed material on the excitation or damping of regenerative self-oscillations. The properties of the processed material influence the chip formation process in the cutting zone, which in the sense of the classical scheme of the self-oscillating system is a regulator.

Practical value. The obtained results prove the influence of the properties of the processed material on the intensity of regenerative self-oscillations during turning and provide an opportunity to take the necessary measures to reduce vibrations.

Key words: regenerative self-oscillations, cutter-oscillator, oscillogram, mechanical properties.

References

1. Özer, A., Sekiguchi, A. (2023). Numerical Evaluations for Robotic Turning with a Scheduled Modulatory Gain-Based Chatter Controller. IFAC-PapersOnLine, 56(2), 11111–11116. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.823>
2. Danylchenko, Y., Storchak, M., Danylchenko, M., Petryshyn, A. (2023). Cutting process consideration in dynamic models of machine tool spindle units. Machines, 11(6), 582. <https://doi.org/10.3390/machines11060582>
3. Cherukuri, H., Perez-Bernabeu, E., Selles, M. A., Schmitz, T. L. (2019). A neural network approach for chatter prediction in turning. Procedia Manufacturing, 34, 885–892. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.159>
4. Beri, B., Meszaros, G., Stepan, G. (2021). Machining of slender workpieces subjected to time-periodic axial force: stability and chatter suppression. Journal of Sound and Vibration, 504, 116114. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116114>
5. Shevchenko, O. V., Lishchyner-Ivashchenko, O. V. (2020). Zabezpechennia vibrosterkosty protsesu roztochuvannia odno-lezovym instrumentom na tokarnomu verstati. Tekhnichna inzheneriia, 1 (85), 81–88. [https://doi.org/10.26642/ten-2020-1\(85\)-81-88](https://doi.org/10.26642/ten-2020-1(85)-81-88)
6. Wang, M., Qin, P., Zan, T., Gao, X., Han, B., Zhang, Y. (2021). Improving optimal chatter control of slender cutting tool through more accurate tuned mass damper modeling. Journal of Sound and Vibration, 513, 116393. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116393>
7. Atsuta, T., Yoshimura, H., Matsumura, T. (2023). Control of chatter vibration in double inserts turning with phase difference of modulations. Precision Engineering, 82, 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2023.03.011>
8. Mohammadi, Y., Ahmadi, K. (2022). Finite-amplitude stability in regenerative chatter: The effect of process damping nonlinearity and intermittent cutting in turning. Journal of Sound and Vibration, 537, 117158. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117158>
9. Schmitz, T. L., Smith, K. S. (2009). Machining dynamics. Springer, 303. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-93707-6>
10. Vnukov, Y., Tryshyn P., Kozlova, O., Dyadya, S. (2024). 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. 342–357. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_31
11. Emami, M., Karimipour, A. (2021). Theoretical and experimental study of the chatter vibration in wet and MQL machining conditions in turning process. Precision Engineering, 72, 41–58. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.04.006>
12. Filippov, A. V., Nikonov, A. Y., Rubtsov, V. E., Dmitriev, A. I., Tarasov, S. Y. (2017). Vibration and acoustic emission monitoring the stability of peakless tool turning: Experiment and modeling. Journal of Materials Processing Technology, 246, 224–234. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.03.030>
13. Kasproviak, M., Parus, A., Hoffmann, M. (2022). Vibration suppression with use of input shaping control in machining. Sensors, 22(6), 2186. <https://doi.org/10.3390/s22062186>
14. Zaloha, V. O., Shapoval, Yu. V. (2024). Metodolohichni osnovy pidvyshchennia efektyvnosti obrobлення detalei shliakhom keruvannia dynamikoiu protsesu vysokoshvydkisnoho tochinna z vysokymy chastotamy obertannia shpyn-delia. Sumskyi derzhavnyi universytet, 143.
15. Nakagawa, J., Farahani, N. D., Altintas, Y. (2023). Identification and effect of chip shear band on chatter vibration in the turning of Nickel Alloy 718. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 44, 82–90. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.05.004>
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, 74(1), 169–180. <https://doi.org/10.2478/scjme-2024-0017>
17. 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, 358–372. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_32
18. Mazur, M. P. et al. (2011). Osnovy teorii rizannia materialiv. Novyi svit-2000, 422.
19. Sorokyn, V.H. (2001). Staly y splavy. Marochnyk. Ynternet Ynzhyrnyh, 608.
20. Orlov, P.N. (1986). Kratkyi spravochnyk metallysta. Mashynostroenye, 960.