

М. ЗЕНКІН, А. ІВАНКО, М. ЧЕРНИШ

ВПЛИВ ВІБРАЦІЙ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТА НА ЯКІСТЬ ПОВЕРХНІ ОБРІЗАНИХ ЛИСТОВИХ МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДИ ЇХ МІНІМІЗАЦІЇ

Предметом дослідження є вплив вібрацій різального інструмента на якість поверхні обрізаних листових матеріалів у процесі механічного оброблення, а також аналіз механізмів виникнення коливань і розроблення методів їх мінімізації для підвищення ефективності технологічних операцій у машинобудуванні. **Мета роботи** – обґрунтувати наукові підходи до прогнозування ресурсу різального інструмента й оптимізації режимів різання способом зменшення вібраційних навантажень, що дасть змогу підвищити якість обробки поверхні листових матеріалів, знизити виробничі витрати та запобігти дефектам обробки. **Завдання:** оцінити вібраційні властивості інструмента залежно від режимів різання та ступеня зносу; проаналізувати вплив коливань на шорсткість і дефекти поверхні (хвилястість, мікротріщини); розробити та протестувати методи мінімізації вібрацій, зокрема демпфувальні системи й ультразвукові коливання; визначити оптимальні умови оброблення для різних матеріалів. **Методи:** експериментальний аналіз із застосуванням акселерометрів для тривісного моніторингу вібрацій; профілометрія та мікроскопія з метою оцінювання якості поверхні; стохастичне моделювання зносу інструмента на основі статистичних показників; тестування демпфувальних систем (пружні муфти, демпфери) та ультразвукових коливань (20–30 кГц); порівняльний аналіз ефективності змашувально-охолоджувальних рідин. **Результати дослідження:** встановлено, що вібрації по осі X мають найбільший вплив на формування дефектів поверхні, особливо внаслідок збільшення глибини різання та зносу інструмента; ультразвукові коливання (22 кГц, амплітуда 10 мкм) знижують тертя та стабілізують процес різання, покращуючи якість оброблених поверхонь; демпфувальні системи ефективно зменшують амплітуду коливань у критичних частотах (до 1,5 кГц); використання води як ЗОР виявилось ефективнішим за мастило для міді, оскільки знижує нерівності поверхні; розроблена вдосконалена модель торцевої фрези з демпфувальними елементами зменшує вібраційні навантаження та дефекти під час оброблення тонколистових матеріалів. **Висновки:** з досліджень випливає, що моніторинг вібрацій є ефективним інструментом для діагностики стану різального інструмента й оптимізації процесу різання; інтеграція демпфувальних систем і ультразвукових коливань дає змогу значно знизити вібраційні впливи, підвищити якість поверхні листових матеріалів і подовжити ресурс інструмента, що сприяє економічній ефективності виробництва та мінімізації дефектів обробки.

Ключові слова: вібрації; різальний інструмент; якість поверхні; листові матеріали; знос; мінімізація коливань.

Вступ

Активний розвиток машинобудівної галузі сприяє тому, що ключовим напрямом забезпечення високої конкурентоспроможності вітчизняної продукції є зниження її собівартості внаслідок підвищення ефективності всіх технологічних процесів, що супроводжують виготовлення деталей і вузлів. Серед таких процесів оброблення матеріалів різанням посідає провідне місце, оскільки, за експертними оцінками, близько 15% вартості виробів машинобудування у світовій практиці припадає саме на операції механічного оброблення з використанням лезового інструмента. Проте, незважаючи на тривале впровадження усталених методик призначення режимів різання та регламентів заміни інструмента, значним бар'єром на шляху до підвищення якості оброблення та зменшення витрат залишається проблема вібрацій, що неминуче виникають під час різання, незалежно від типу обладнання або матеріалу заготовки.

Особливої уваги набуває дослідження впливу вібрацій різального інструмента на якість поверхні листових матеріалів, що часто застосовують у відповідальних конструкціях, адже навіть незначні коливання можуть спричинити погіршення геометричної точності, збільшення шорсткості поверхні, передчасний знос інструмента та зниження стабільності технологічного процесу. Тоді як незначні вібрації зазвичай не беруть до уваги під час аналізу, значні автоколивання можуть призводити до втрати стійкості різання, що потребує впровадження систематичних підходів до їх виявлення, контролю та мінімізації. Відомі режими різання, описані в довідниках, часто є результатом експериментів, що проводилися без уваги до впливу фонових коливань, а отже, не відтворюють повною мірою поведінку системи внаслідок зміни пружних властивостей верстата або інструмента.

Наявність численних фізичних явищ, які можуть одночасно спричинити автоколивання в процесі різання, зокрема залежність сили різання від швидкості,

фазові зсуви або резонансні ефекти, вимагає комплексного підходу до аналізу та моделювання динаміки оброблення. Зважаючи на вищевикладене, актуальність дослідження зумовлена необхідністю глибокого вивчення природи вібрацій у процесі різання листових матеріалів, визначення їх впливу на кінцеву якість обробленої поверхні, а також розроблення ефективних методів мінімізації шкідливих коливань з метою забезпечення стабільності, точності та надійності оброблення в умовах сучасного машинобудівного виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У науковій літературі значна увага приділяється дослідженню впливу вібрацій різального інструмента на якість обробки листових матеріалів, а також методам їх мінімізації. Питанню стану різального інструмента присвячено численні роботи як вітчизняних, так і зарубіжних авторів [1, 2]. Зокрема, у праці [3] подано огляди, які детально висвітлюють сучасний стан окресленої проблеми, що залишається актуальною навіть у контексті автоматизованого виробництва. За результатами досліджень, наведеними в статті [4], до 20% простоїв технологічного обладнання спричинені поломками різального інструмента, що доводить важливість цього аспекту.

У роботі [4] описано універсальний механізм виникнення автоколивань, пов'язаний із координатною залежністю в технологічній системі та дискретністю стружкоутворення. Цей механізм вважається ключовим для появи інтенсивних високочастотних вібрацій, які супроводжуються властивим свистом і високим рівнем звукового тиску, а також менш помітних коливань, що завжди присутні під час різання полікристалічних матеріалів. Такі автоколивання суттєво впливають на якість поверхні оброблених матеріалів, продуктивність процесу та довговічність інструмента [5]. Виникнення вібрацій залежить від динамічних властивостей системи, зокрема від змінної сили, що діє під час різання. У процесі оброблення листових матеріалів можливі коливання різних елементів обладнання. Однак вібрації самого різального інструмента є найбільш критичними, оскільки впливають на знос інструмента, точність обробки, стан верстата й, основне, на якість поверхні обрізаних матеріалів [6].

Вібрації в технологічній системі можуть відбуватися у вертикальній або горизонтальній

площинах, паралельно чи перпендикулярно до напрямку подачі, що далі призводить до зміщення інструмента щодо заготовки, унаслідок чого змінюються режими різання (швидкість, глибина та подача) і, відповідно, виникає змінна сила [1]. Отже, вібрації різального інструмента є основним фактором, що погіршує якість поверхні листових матеріалів, а їх мінімізація вимагає комплексного підходу до контролю та оптимізації процесу різання.

Аналіз проблеми й наявних методів

Дослідження передбачає експериментальний аналіз вібраційних властивостей різального інструмента під час оброблення різних листових матеріалів з подальшим оцінюванням якості поверхні. Методика передбачає кілька етапів.

1. Підготовка експерименту:

- вибір матеріалів заготовок та інструментів (твердосплавні пластини, фрези з різною геометрією);
- налаштування обладнання (токарний / фрезерний верстат із системою ЧПК);
- установлення датчиків вібрації (акселерометри) на інструмент і заготовку для реєстрації коливань у трьох осях (X , Y , Z).

2. Проведення експериментів:

- оброблення заготовок у різних режимах (глибина різання, швидкість, подача) з фіксацією вібраційних сигналів;
- дослідження впливу зносу інструмента на амплітуду коливань;
- аналіз якості поверхні (профілометрія, мікроскопія) для виявлення дефектів (хвилястість, мікротріщини).

3. Методи мінімізації вібрацій:

- тестування демпфувальних систем (пружні муфти, демпфери);
- використання ультразвукових коливань (частота 20–30 кГц) для зменшення тертя;
- оцінювання ефективності різних ЗОР (мастила, емульсії, вода);
- оброблення отриманих показників.

Результати дають змогу визначити оптимальні режими різання та ефективні методи зменшення вібрацій для підвищення якості обробки.

Мета статті – дослідження з виявлення закономірностей впливу вібрацій різального інструмента на якість поверхні обрізаних листових матеріалів

та обґрунтування ефективних методів мінімізації вібраційних коливань для підвищення точності, стабільності та якості процесу механічного оброблення.

Розв'язання завдання

Точність передбачення ресурсу експлуатації різального інструмента, зокрема періоду його зносостійкості, відіграє визначальну роль у забезпеченні ефективності технологічних операцій оброблення різанням у процесі виготовлення високоточних та відповідальних елементів продукції сучасного машинобудування, оскільки раптовий вихід інструмента з ладу або його критичне зношення без належного контролю можуть спричинити суттєве підвищення виробничих витрат, затримку виконання технологічного циклу та зниження якості кінцевого виробу. З огляду на природну стохастичність процесів різання листів металу, пов'язану зі змінністю властивостей матеріалу заготовки, властивостями інструмента та умовами оброблення, все більшого поширення набуває застосування ймовірнісних моделей, що дають змогу оцінювати ризики відмов інструмента на основі законів розподілу тривалості його ефективного функціонування або інтенсивності зношення, а також зважають на залежність цих властивостей від параметрів режимів різання [7].

Практична реалізація подібних стохастичних моделей вимагає збору великого обсягу статистичних показників, що визначають процес поступового зношення інструмента, який відбувається впродовж тривалого часу роботи. Одним з ефективних та інформативних підходів до отримання такої статистики є моніторинг вібраційних параметрів технологічної системи, що містить елементи "станок – пристрій – інструмент – заготовка" (СПІЗ), оскільки вібрації є чутливим індикатором стану різальної частини інструмента й дають змогу виявити навіть незначні зміни, які передують його критичному зносу. Джерелом коливань у цій зоні необхідно вважати складні процеси тертя й деформування, що виникають унаслідок взаємодії інструмента з оброблюваним матеріалом і призводять до виникнення як сил пружних, так і пластичних деформацій [1]. Ці сили, зокрема пружні (P_{np}) та пластичні (P_{nl}) реакції, орієнтовані перпендикулярно до передньої поверхні різального інструмента,

а також сили аналогічного походження (P'_{np} і P'_{nl}), що діють з боку задньої поверхні інструмента, спричиняють виникнення сил тертя, які генерують коливання, що можуть набувати резонансного характеру й негативно позначатися на якості обробленої поверхні (рис. 1).

$$\begin{aligned} T &= \mu \cdot (P_{np} + P_{nl}), \\ T' &= \mu \cdot (P'_{np} + P'_{nl}), \end{aligned} \quad (1)$$

де T – сила тертя вздовж передньої поверхні різального інструмента;

T' – сила тертя вздовж задньої поверхні різального інструмента;

μ – коефіцієнт тертя.

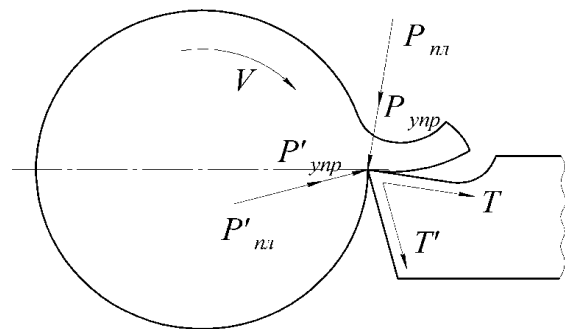


Рис. 1. Деформування оброблюваного матеріалу в процесі різання

Для спрощення розрахунків зазначена система сил наводиться до рівнодійної сили різання R . Рівнодійна сила різання R для зовнішнього точення зображена на рис. 2. Сила різання R у разі токарного оброблення розкладається на три взаємно перпендикулярні складники – P_x , P_y і P_z . Сила різання R та її проекції є нелінійними величинами, що залежать від режимів і фактичних умов різання [8]. Під час різання металу тангенціальний складник сили різання можна оцінювати за емпіричною формулою

$$P_z = C_{pz} \cdot a_p^{xz} \cdot f_n^{yz} \cdot v_c^{nz} \cdot K_{pz}, \quad (2)$$

де C_{pz} , xz , yz , nz – емпіричні коефіцієнти і показники ступеня;

a_p – глибина різання;

f_n – подання на оберт;

v_c – швидкість різання;

K_{pz} – корегувальний коефіцієнт, що бере до уваги фактичні умови різання, зокрема й геометрію різального інструмента.

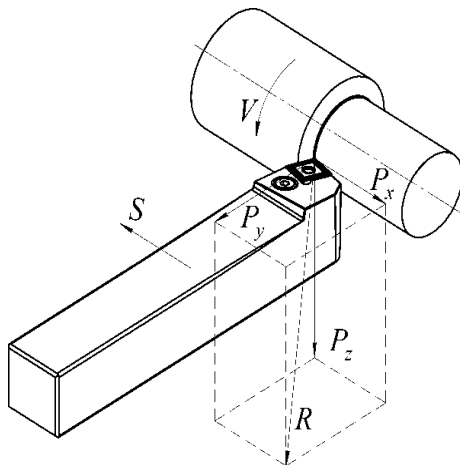


Рис. 2. Сила різання за умови зовнішнього впливу

Під дією сили різання машинна частина технологічної системи здійснює вимушені коливання. Для аналізу системи СПЗ, що здійснює інтенсивні поперечні коливання, можна скористатися принциповою схемою, зображеною на рис. 3.

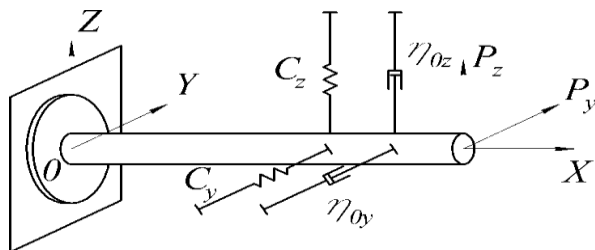


Рис. 3. Принципова схема коливальної системи СПЗ

Відповідно до принципу Даламбера має місце рівність

$$\vec{F}_i + \vec{F}_c + \vec{F}_y + \vec{R} = 0, \quad (3)$$

де $\vec{F}_i$ – сила інерції;

$\vec{F}_c$ – сила опору (демпфування);

$\vec{F}_y$ – сила пружності системи.

У наукових дослідженнях, присвячених питанням зменшення амплітуди коливань, що виникають у процесі оброблення різанням, увагу зосереджено переважно на коливаннях, які відбуваються в площині, перпендикулярній осі заготовки, зокрема в умовах токарного оброблення, де традиційно вважається, що коливання в напрямку осі Y мають найбільш суттєвий вплив на формування якості обробленої поверхні. Проте результати досліджень, виконаних із застосуванням трикомпонентного акселерометра для аналізу вібрацій вершинної частини різального інструмента,

свідчать про те, що зі зростанням глибини різання або зі збільшенням ступеня зношення різальної кромки інструмента амплітуди коливань по координатних осях X та Z можуть зростати випереджальними темпами порівняно з коливаннями по осі Y [5].

Особливо небезпечними для забезпечення високої якості оброблення листових матеріалів є коливання по осі X , тобто в напрямку, що збігається з подовжньою віссю заготовки, оскільки саме такі коливання спричиняють мікроскопічні вбивання інструмента в бокову поверхню оброблюваної кромки, що спричиняє періодичні дефекти на поверхні, які мають характер повторюваних слідів. Ці сліди, що виникають внаслідок кожного оберту інструмента з певним фазовим зсувом, формують хвилястий рельєф, що значно погіршує шорсткість та однорідність поверхні листового матеріалу, особливо в зонах з більшою глибиною різання (рис. 4).

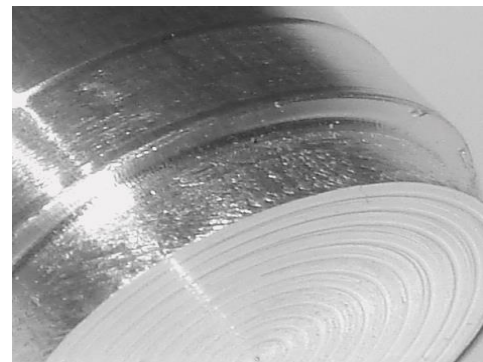


Рис. 4. Зовнішній вигляд поверхні обрізаного валика залежно від глибини різання: вплив параметрів оброблення на якість поверхні [8]

На основі фотоспостережень оброблення валика діаметром 30 мм із варіацією глибини різання було встановлено, що саме збільшення глибини різання приводить до інтенсивнішого зростання амплітуди коливань по осі X , що зі свого боку набуває вигляду видимих періодичних слідів на поверхні заготовки, отриманих у процесі різання з найбільшими глибинами. Водночас із поступовим зменшенням глибини різання спостерігалось зниження інтенсивності цих коливань, що корелювалося зі зменшенням шорсткості обробленої поверхні. Це є свідченням прямої залежності між вібраційними властивостями інструмента й кінцевими параметрами якості поверхні листових матеріалів [7].

Під час усіх етапів оброблення листового матеріалу різання відбувалося без помітних ознак

інтенсивних автоколивань, що є важливим для розуміння стабільності процесу, хоча накопичена потенційна енергія, яка виникає внаслідок взаємодії інструмента з матеріалом, найвиразніше виявляється в момент швидкого розвантаження різального інструмента, зокрема коли він виходить у зону різкої зміни геометрії заготовки, такої як шпонковий паз. На прикладі записів вібраційної швидкості вздовж осі X , отриманих під час оброблення алюмінієвих листів, видно, що вихід різця в паз спричиняє різкий перехід потенційної енергії в кінетичну, що нагадує ефект відриву стружки, до того ж для алюмінієвого сплаву це супроводжується значним стрибком вібраційної швидкості [9].

Експерименти з обрізання листових матеріалів продемонстрували, що навіть за умов роботи інструмента з надмірним зносом автоколивання не виникають у широкому діапазоні глибин різання, що свідчить про меншу схильність таких матеріалів до вібраційних збурень порівняно з металевими сплавами. На графіку вібраційної швидкості вершини різця під час виходу в паз на алюмінієвій заготовці видно, що вектор швидкості різко зростає вздовж осі X (перпендикулярно до поверхні різання за умови кута атаки $\pi/2$). І хоча в процесі формування зливної стружки зазвичай опір матеріалу та поверхні різання обмежують таке зростання, воно все одно присутнє, досягаючи максимуму, після чого швидкість V_x поступово знижується до мінімального значення, до того ж частота цих коливань, близька до власної частоти технологічної системи (приблизно 1,5 кГц), відіграє ключову роль у динаміці процесу.

Ці зміни вібраційної швидкості не відповідають стабільним умовам різання з утворенням зливної стружки, оскільки максимальне значення V_x , досягнуте за дуже нетривалий час (приблизно 0,25 мс), не призводить до значного відхилення вершини різця від тангенціального напрямку (відхилення становить лише 3–4 мкм), однак відрив задньої грані інструмента від поверхні різання руйнує адгезійні зв'язки, даючи змогу інструменту знову контактувати із зоною пластичної деформації з ударом, що за незначних відхилень сприяє розвитку тангенціальних тріщин у попередньо деформованому матеріалі, полегшуючи відокремлення стружки та впливаючи на якість поверхні. Оскільки радіальна вібраційна швидкість у разі зливної стружки значно менша за швидкість різання. Саме остання визначає силу

й напрямок удару, тоді як радіальні коливання відіграють допоміжну роль у руйнуванні адгезії між інструментом і заготовкою, а кут атаки залишається близьким до тангенціального, що підвищує ефективність удару завдяки концентрації енергії руйнування в точці контакту через обмежену швидкість поширення деформацій [10].

Коли в процесі оброблення виникають інтенсивні автоколивання, амплітуда радіальної швидкості, а також відповідні переміщення різального інструмента можуть зростати вдесятеро, що істотно ускладнює стабільність контакту між різальною кромкою та заготовкою. Такий різкий стрибок у динаміці інструмента призводить до того, що після чергового зсуву шару стружки та імпульсного збільшення радіальної швидкості точка нового контакту вершини інструмента може значно зміститися щодо попереднього положення, де вже були частково деформовані зерна матеріалу та сформована випереджальна мікротріщина. Такого плану зміщення ускладнює подальше формування основної тріщини зсуву, порушує сталу геометрію зрізу та сприяє зростанню навантаження на інструмент, що погіршує якість обробленої поверхні обрізаних листових матеріалів.

Крім того, внаслідок порушення стабільності траєкторії інструмента під дією автоколивань кут атаки різальної кромки може суттєво відхилитися від оптимального тангенціального напрямку, що ще більше ускладнює процес утворення стружки й підвищує ризик виникнення дефектів на поверхні. Ця складна динаміка взаємодії між інструментом і заготовкою створює передумови для вивчення альтернативних підходів до керованого введення коливань, зокрема застосування примусових мікроколивань високої частоти, зокрема ультразвукові коливання, які можуть бути ефективним інструментом для покращення процесу різання внаслідок стабілізації режимів оброблення та зниження рівня контактного тертя [8].

Зокрема використання ультразвукових тангенціальних коливань із частотою близько 22 кГц і амплітудою порядку 10 мікрометрів виявилось перспективним методом мінімізації негативного впливу вібрацій на якість обробленої поверхні за швидкості різання до 80 м/хв. У таких умовах між передньою поверхнею інструмента та стружкою періодично виникає мікрозазор, який руйнує адгезійні зв'язки, що спричиняють нарід на різальній кромці.

Внаслідок цього різальний інструмент не накопичує надлишкову потенціальну енергію, яка в інших випадках могла б викликати різкі стрибки й нерівномірні переміщення інструмента, а, навпаки, енергія розсіюється в кожному циклі мікроколивань, що позитивно впливає на стабільність оброблення [11].

Проте необхідно зауважити, що навіть за умови дії ультразвукових коливань у тангенціальному напрямку існує ризик погіршення якості поверхні через фрикційний контакт задньої грані інструмента з оброблюваною поверхнею, який може спричинити утворення мікроподряпин або втиснення частинок знімного матеріалу в поверхневий шар. Це було підтверджено в експерименті з обробленням сталеві заготовки марки 18ХГТ за допомогою різальної пластини з нульовим заднім кутом: результати продемонстрували, що без використання змащувально-охолоджувальної технологічної рідини (ЗОТР) фрикційний контакт зберігався, а якість поверхні залишалася незадовільною [12]. Водночас унаслідок додавання в зону різання індустріального мастила спостерігалось помітне покращення візуального та структурного стану обробленої поверхні, що підтверджує ефективність комплексного підходу до зменшення фрикційних впливів (рис. 5).

Однак застосування змащувальних речовин, хоча й покращує ситуацію, не є універсальним розв'язком усіх проблем, пов'язаних із вібраціями. Недостатня радіальна жорсткість технологічної системи може призводити до так званого "спливання" різального інструмента під час його ковзання у в'язкому середовищі, що спричиняє зміщення його позиції щодо заготовки, суттєво впливаючи на точність

оброблення та стан поверхні. На профілограмі поверхні мідного листового матеріалу, отриманої внаслідок оброблення з використанням ультразвукових вібрацій різального інструмента, чітко видно, що додавання мастила в зону різання викликає зміщення вершини інструмента в радіальному напрямку на відстань до 60 мкм, що свідчить про нестабільність процесу та може погіршувати якість поверхні через нерівномірний контакт із матеріалом. Зміна ситуації можлива завдяки збільшенню заднього кута різального інструмента, що посилює тиск на шар змащувально-охолоджувальної технологічної суміші (ЗОТС) на обробленій поверхні, запобігаючи "спливанню" інструмента, хоча в цьому разі виникає ризик пошкодження поверхні безпосередньо інструментом під час вібрацій, особливо якщо зважати, що поява фаски зносу на задній поверхні інструмента знову підвищує ймовірність його неконтрольованого зміщення (рис. 6).

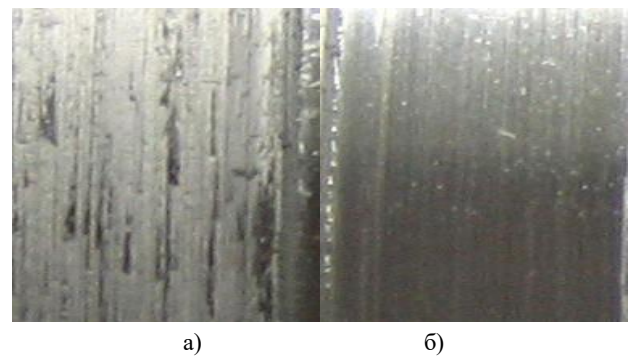


Рис. 5. Зовнішній вигляд поверхні листа сталі 18ХГТ у процесі оброблення з тангенціальними вібраціями: а – без застосування системи охолодження та змащення; б – з подачею мастила в зону різання

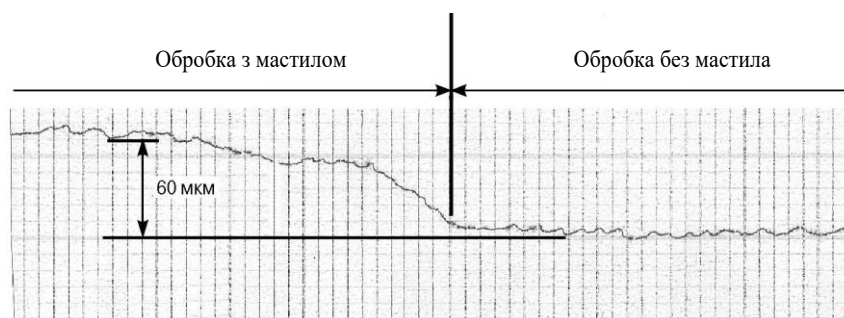


Рис. 6. Профілограма поверхні металевго листа в процесі різання з використанням ультразвукових вібрацій різального інструмента (ВУ = 200, ГУ = 50)

Оптимізація процесу ультразвукового оброблення, що розглядається як один із методів мінімізації вібрацій, ускладнюється можливістю варіювання в'язкості та інших властивостей ЗОТС, що потребує

ретельного підбору умов для забезпечення стабільності різання та покращення якості поверхні листових матеріалів. На прикладі профілограми видно, що нанесення води на поверхню заготовки замість

мастила значно покращує зовнішній вигляд обробленої поверхні. Це може бути пов'язано з меншою в'язкістю води, яка сприяє кращому контролю вібрацій і стабільності позиціонування різального інструмента, зменшуючи цим нерівності та дефекти на обрізаній поверхні (рис. 7) [13, 14].

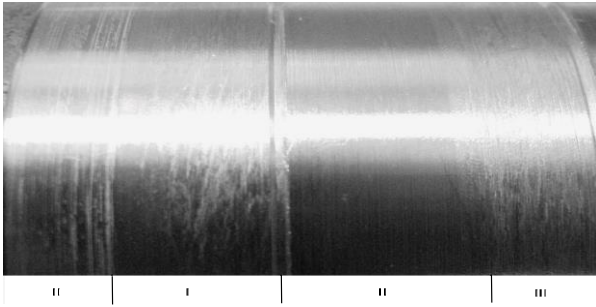


Рис. 7. Вплив різних типів систем охолодження та змащення (ЗОТС) на різання листів:
I – без ЗОТС; II – із застосуванням води;
III – з використанням мастила [10]

Однією з конструктивних переваг аналізованого технічного рішення є наявність можливості гнучкого регулювання демпфувальної здатності різального інструмента внаслідок зміни сили затягування фіксувального гвинта, що зі свого боку дає змогу впливати на величину сили тертя між верхнім і нижнім кільцями демпфувального вузла, яка разом із властивостями пружного елемента конструкції визначає загальні демпфувальні властивості інструмента. Як було встановлено в попередніх дослідженнях, підвищення рівня демпфування сприяє

суттєвому зниженню амплітуди коливань незалежно від маси інструментального вузла або жорсткості всієї вібраційної системи, що є надзвичайно важливим для стабілізації процесу оброблення листових матеріалів.

Жорсткість самого інструмента в цьому контексті залежить від властивостей пружного елемента, виготовленого зі спеціально підібраного матеріалу з визначеним модулем пружності, що забезпечує адаптацію системи до конкретних умов різання та типу оброблюваної заготовки [14]. Водночас варто наголосити, що запропонована конструкція не монолітна жорстка система, а є складальним вузлом, у якому верхнє та нижнє кільця демпфувального блоку з'єднані між собою за допомогою пружної муфти. Така архітектура дає змогу істотно зменшити масу коливної частини інструмента, що автоматично знижує власну частоту його вібрацій та сприяє уникненню резонансних явищ у критичних режимах оброблення [15].

Крім того, завдяки змінному співвідношенню між власною частотою інструментального вузла й частотою збурювального впливу, яка залежить від швидкості обертання шпинделя або режиму подачі, запропонована конструкція забезпечує вихід системи з резонансної ділянки, що є особливо цінним у процесі оброблення тонколистових металевих матеріалів, де навіть незначні резонансні коливання можуть призвести до появи хвилястих дефектів, мікротріщин або нерівностей на поверхні зрізу (рис. 8).

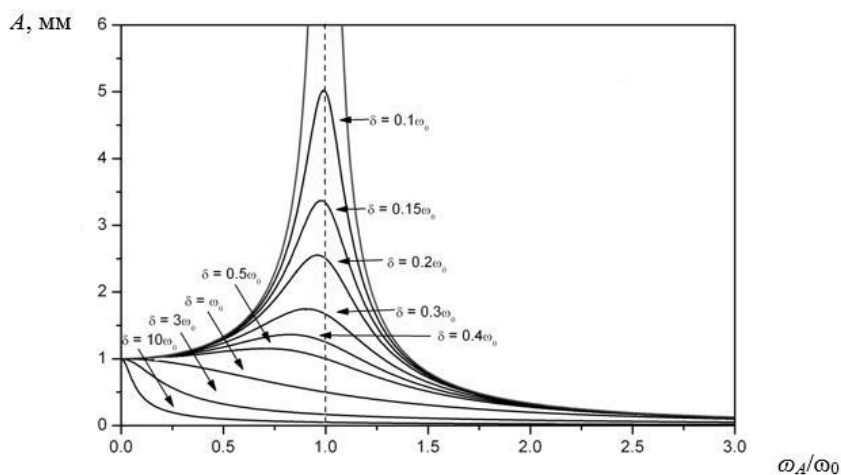


Рис. 8. Прояв резонансних коливань у системі різання за різних коефіцієнтів демпфування [5]

На основі проведених досліджень, спрямованих на виявлення механізмів впливу вібрацій різального інструмента на якість обробки поверхні листових

матеріалів, а також на пошук ефективних шляхів зменшення амплітуди коливань у процесі різання було запропоновано та сконструйовано вдосконалену

модель торцевої фрези, яка містить вбудовані демпфувальні елементи, функціональне призначення яких полягає в зниженні рівня вібраційних навантажень способом часткового поглинання енергії коливань у критичних діапазонах частот (рис. 9), що покращує чистоту обробленої поверхні та зменшує ризик формування дефектів під час обрізання листових металевих заготовок [16].

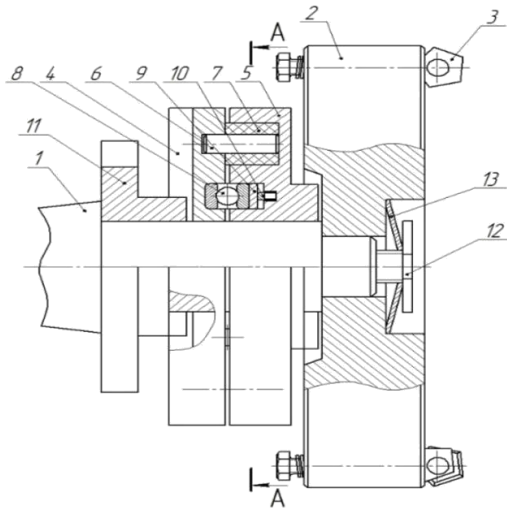


Рис. 9. Збірна торцева фреза з демпфувальними елементами для зменшення вібрацій у процесі оброблення: 1 – оправка; 2 – торцева фреза; 3 – різальні пластини; 4 – верхнє кільце демпфувального вузла; 5 – нижнє кільце демпфувального вузла; 6 – сталеві кульки; 7 – демпфувальний елемент; 8 – повідець; 9 – гвинт; 10 – пружна шайба [16]

Отже, моніторинг рівня вібрацій різального інструмента може слугувати ефективним методом оцінювання його стану під час оброблення листових матеріалів за особливих умов, що дає змогу брати до уваги мінливість процесу різання, оптимізувати тривалість використання інструмента, підвищити якість поверхні обрізаних заготовок і, як наслідок, знизити витрати на виробництво завдяки мінімізації вібраційних впливів.

Висновок

Унаслідок проведеного дослідження встановлено взаємозв'язок між вібраційними властивостями різального інструмента під час оброблення листових матеріалів та якістю обробленої поверхні. Зокрема виявлено, що амплітудно-частотні характеристики коливань, особливо в напрямку осі X , безпосередньо впливають на шорсткість, хвилястість та структурну

однорідність кромки заготовки. Досліджено механізми виникнення та поширення коливань, спричинених силами тертя та деформації в зоні різання. Визначено ключові фактори, що призводять до переходу системи в резонансний режим, особливо за умов недостатнього демпфування або критичних параметрів оброблення. Проаналізовано динамічні зміщення вершини різального інструмента під впливом раптових змін геометрії заготовки. Доведено, що навіть незначні мікроколивання можуть спричинити формування повторюваних дефектів на поверхні, що суттєво знижує її експлуатаційні якості.

Обґрунтовано ефективність застосування ультразвукових тангенціальних мікроколивань для зменшення контактної енергії в зоні різання. Цей метод дає змогу стабілізувати процес формування стружки, знизити ризик появи мікротріщин та покращити якість поверхні, навіть у складних умовах оброблення тонколистових матеріалів. Розроблено аналітичну модель взаємодії інструмента із заготовкою, яка бере до уваги деформаційні, інерційні та демпфувальні сили в динамічній системі. Модель забезпечує точне прогнозування поведінки інструмента за різних режимів різання та рівнів зношення. Запропоновано вдосконалену конструкцію торцевої фрези з вбудованими демпфувальними елементами. Нова конструкція дає змогу знизити рівень вібрацій у критичних частотних діапазонах, покращити стабільність оброблення та зменшити ймовірність появи хвилястих або структурно неоднорідних дефектів на поверхні листових матеріалів.

Подальші дослідження доцільно присвятити вдосконаленню математичних моделей, що описують динаміку системи "інструмент – заготовка – верстат" з огляду на зміни пружних і демпфувальних властивостей інструментального вузла в реальному часі. Перспективним є розроблення адаптивних систем керування різанням, які інтегрують показники з тривісних акселерометрів і миттєво регулюють режими оброблення для уникнення резонансних коливань. Важливим напрямом подальших робіт є дослідження комбінованого впливу ультразвукових мікроколивань і властивостей змашувально-охолоджувальних рідин на зниження шорсткості поверхні. Крім того, актуальним є вивчення впливу наноструктурованих покриттів на різальну кромку інструмента з метою зменшення тертя й стабілізації траєкторії різання. Доцільно також створити

цифрову платформу прогнозування зносу на основі вібраційних режимів та оптимізації технологічних машинного навчання для визначення критичних параметрів різання.

Список літератури

1. Бойко Ю. І., Литвиненко О. А., Яновський В. А. Оцінка впливу режимів різання на вібрацію розточувального різця і точність оброблюваних отворів на верстатах з ЧПК. *Технічна інженерія*. 2020. № 2(86). С. 34–40. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2020-2\(86\)-34-40](https://doi.org/10.26642/ten-2020-2(86)-34-40)
2. Tsiakoumis V. I. An investigation into vibration assisted machining: Application to surface grinding processes. Doctoral thesis. Liverpool John Moores University. 2011. URL: <https://researchonline.ljmu.ac.uk/id/eprint/6113/1/555817.pdf>
3. Rauf A., Khan M. A., Jaffery S. H. I., Butt S. I. Effects of machining parameters, ultrasonic vibrations and cooling conditions on cutting forces and tool wear in meso scale ultrasonic vibrations assisted end-milling (UVAEM) of Ti-6Al-4V under dry, flooded, MQL and cryogenic environments. A statistical analysis. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. P. 8287–8303. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.202>
4. Томашевський О. О., Балицька Н. О. Процес мікрофрезерування металів і сплавів: аналітичний огляд. *Технічна інженерія*. 2023. № 2(92). С. 74–88. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-2\(92\)-74-88](https://doi.org/10.26642/ten-2023-2(92)-74-88)
5. Chamble P., Bharath M. R., Lokesh K., Ezhil Singh S. C. Machine tool vibration on dimensional accuracy and surface roughness during milling operation of Al6082 with indexable carbide inserts. *Journal of Applied Research and Technology*. 2020. 18(2). P. 69–76. DOI: <https://doi.org/10.22201/icat.24486736e.2020.18.2.999>
6. Zhang C., Cheung C., Bulla B., Zhao C. An investigation of the high-frequency ultrasonic vibration-assisted cutting of steel optical moulds. *Micromachines*. 2021. 12(4). 460 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi12040460>
7. Химич Г. М., Куцевський М. О. Вібрація як джерело динамічних навантажень. Вісник Хмельницького національного університету. 2014. № 1 (209). С. 36–40.
8. Степчин Я. А., Отаманський В. В. Аналіз та вдосконалення алгоритмів модульного принципу створення металорізальних верстатів з ЧПК. *Технічна інженерія*. 2020. № 1(85). С. 23–29. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2020-1\(85\)-23-29](https://doi.org/10.26642/ten-2020-1(85)-23-29)
9. Сліпчук А. М. Симуляція процесу power skiving для нарізання внутрішнього зубчастого колеса з моделюванням недеформованої стружки. *Інформаційні системи, механіка та керування*. 2023. № 57. С. 46–58. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcipa2023.57.046>
10. Makedon V., Myachin V., Plakhotnik O., Fisunen N., Mykhailenko O. Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. No 2(13(128)). P. 47–57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>
11. Пуховський Є. С. Вплив вібрацій на стійкість багатолезового інструменту. *Технічна інженерія*. 2022. № 2 (90). С. 44–51. DOI: [10.26642/ten-2022-2\(90\)-44-51](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-44-51)
12. Kolomy S., Maly M., Sedlak J., Zouhar J., Slany M., Hrabec P., Kouril K. Machinability of extruded H13 tool steel: Effect of cutting parameters on cutting forces, surface roughness, microstructure, and residual stresses. *Ain Shams Engineering Journal*. 2024. P. 394–407. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.05.018>
13. Han G., Ye Z., Xu J., Ma Y. Investigation on cutting forces and tool wear in high-speed milling of Ti-6Al-4V assisted by longitudinal torsional ultrasonic vibrations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. 129(1–2). P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12306-z>
14. Rigas K., Willers B., Eckert S., Glaser B. Investigations on vibrational interpretations of bubbles in metal-making processes. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2023. № 54. P. 2105–2120. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-023-02820-6>
15. Македон В. В., Холод О. Г., Ярмоленко Л. І. Модель оцінки конкурентоспроможності високотехнологічних підприємств на засадах формування ключових компетенцій. *Академічний огляд*. 2023. № 2 (59). С. 75–89. DOI: [10.32342/2074-5354-2023-2-59-5](https://doi.org/10.32342/2074-5354-2023-2-59-5)
16. Wang S.M., Tsou W.S., Huang J.W., Chen S.E., Wu C.C. Development of a method and a smart system for tool critical life real-time monitoring. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2024. 8(5). 194 p. <https://doi.org/10.3390/jmmp8050194>

References

1. Boiko, Yu. I., Lytvynenko, O. A., Yanovskyi, V. A. (2020), "Evaluation of the influence of cutting regimes on the vibration of the boring tool and the accuracy of machined holes on CNC machines" ["Otsinka vplyvu rezhymiv rizannia na vibratsiiu roztockhuvalnoho rizzia i tochnist obrobliuvanykh otvoriv na verstatakh z ChPK"], *Technical Engineering*, No. 2(86), P. 34–40. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2020-2\(86\)-34-40](https://doi.org/10.26642/ten-2020-2(86)-34-40)

2. Tsiakoumis, V. I. (2011), "An investigation into vibration assisted machining: Application to surface grinding processes", Doctoral thesis, Liverpool John Moores University. available at: <https://researchonline.ljmu.ac.uk/id/eprint/6113/1/555817.pdf>.
3. Tomashevskiy, O. O., Balytska, N. O. (2023), "Micro-milling process of metals and alloys: analytical review" ["Protses mikrofrezeruvannia metaliv i splaviv: analitychnyi ohliad"], *Technical Engineering* [Tekhnichna Inzheneriia], No. 2(92), P. 74–88. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-2\(92\)-74-88](https://doi.org/10.26642/ten-2023-2(92)-74-88)
4. Rauf, A., Khan, M. A., Jaffery, S. H. I., Butt, S. I. (2024), "Effects of machining parameters, ultrasonic vibrations and cooling conditions on cutting forces and tool wear in meso scale ultrasonic vibrations assisted end-milling (UVAEM) of Ti-6Al-4V under dry, flooded, MQL and cryogenic environments – A statistical analysis", *Journal of Materials Research and Technology*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.202>
5. Chamble, P., Bharath, M. R., Loksha, K., Ezhil Singh, S. C. (2020), "Machine tool vibration on dimensional accuracy and surface roughness during milling operation of Al6082 with indexable carbide inserts", *Journal of Applied Research and Technology*, Vol. 18, No. 2, P. 69–76. DOI: <https://doi.org/10.22201/icat.24486736e.2020.18.2.999>
6. Zhang, C., Cheung, C., Bulla, B., Zhao, C. (2021), "An investigation of the high-frequency ultrasonic vibration-assisted cutting of steel optical moulds", *Micromachines*, Vol. 12, No. 4, 460 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi12040460>
7. Khimych, H. M., Kushchevskiy, M. O. (2014), "Vibration as a source of dynamic loads" ["Vibratsiia yak dzherelo dynamichnykh navantazhen"], *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*. [Herald of Khmelnytskyi National University], No. 1(209), P. 36–40.
8. Stepchyn, Ya. A., Otamanskyi, V. V. (2020), "Analysis and improvement of algorithms of the modular principle for creating CNC machine tools" ["Analiz ta vdoskonalennia alghorytmiv modulnoho pryntsyphu stvorennia metalozrizalnykh verstativ z ChPK"], *Technical Engineering* [Tekhnichna Inzheneriia], No. 1(85), P. 23–29. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2020-1\(85\)-23-29](https://doi.org/10.26642/ten-2020-1(85)-23-29)
9. Slipchuk, A. M. (2023), "Simulation of the power skiving process for cutting an internal gear with undeformed chip modeling" ["Symuliatyia protsesu power skiving dlia narizannia vnutrishnoho zubchastoho kola z modeliuvanniam nedeformovanoi struzhky"], *Information Systems, Mechanics and Control* [Informatsiini systemy, mekhanika ta keruvannia], No. 57, P. 46–58. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcipa2023.57.046>
10. Makedon, V. V., Kholod, O. H., Yarmolenko, L. I. (2023), "Model for assessing the competitiveness of high-tech enterprises based on the formation of key competencies" ["Model otsinky konkurentospromozhnosti vysokotekhnolohichnykh pidpriemstv na zasadakh formuvannia kliuchovykh kompetentsii"], *Academic Review* [Akademichnyi ohliad], No. 2(59), P. 75–89. DOI: [10.32342/2074-5354-2023-2-59-5](https://doi.org/10.32342/2074-5354-2023-2-59-5)
11. Pukhovskiy, Ye. S. (2022), "Influence of vibrations on the durability of multi-blade tool" ["Vplyv vibratsii na stiiikist bahatozozovoho instrumentu"], *Technical Engineering* [Tekhnichna Inzheneriia], No. 2(90), P. 44–51. DOI: [10.26642/ten-2022-2\(90\)-44-51](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-44-51)
12. Kolomy, S., Maly, M., Sedlak, J., Zouhar, J., Slany, M., Hrabec, P., Kouril, K. (2024), "Machinability of extruded H13 tool steel: Effect of cutting parameters on cutting forces, surface roughness, microstructure, and residual stresses", *Ain Shams Engineering Journal*. P. 394–407. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.05.018>
13. Han, G., Ye, Z., Xu, J., Ma, Y. (2023), "Investigation on cutting forces and tool wear in high-speed milling of Ti-6Al-4V assisted by longitudinal torsional ultrasonic vibrations", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 129, No. 1–2, P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12306-z>
14. Rigas, K., Willers, B., Eckert, S., Glaser, B. (2023), "Investigations on vibrational interpretations of bubbles in metal-making processes", *Metallurgical and Materials Transactions*. Vol. 54, P. 2105–2120. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-023-02820-6>
15. Makedon, V., Myachin, V., Plakhotnik, O., Fisunen, N., Mykhailenko, O. (2024), "Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No 2(13(128)), P. 47–57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>
16. Wang, S.-M., Tsou, W.-S., Huang, J.-W., Chen, S.-E., & Wu, C.-C. (2024), "Development of a method and a smart system for tool critical life real-time monitoring", *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, Vol. 8, No. 5, 194 p. <https://doi.org/10.3390/jmmp8050194>

Відомості про авторів / About the Authors

Зенкін Микола Анатолійович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", професор кафедри машин та агрегатів поліграфічного виробництва, Київ, Україна; e-mail: nikolay_zenkin@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8840-0572>

Іванко Андрій Іванович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", доцент кафедри машин та агрегатів поліграфічного виробництва, Київ, Україна, e-mail: ivanko-a@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4735-9665>

Черниш Максим Леонідович – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", аспірант кафедри машин та агрегатів поліграфічного виробництва, Київ, Україна; e-mail: maxim073074@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-9376-6055>

Zenkin Mykola – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of Printing Machines and Automated Complexes, Kyiv, Ukraine.

Ivanko Andrii – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Printing Machines and Automated Complexes, Kyiv, Ukraine.

Chernysh Maksym – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Postgraduate Student at the Department of Printing Machines and Automated Complexes, Kyiv, Ukraine.

INFLUENCE OF CUTTING TOOL VIBRATIONS ON THE SURFACE QUALITY OF CUT SHEET MATERIALS AND METHODS FOR THEIR MINIMIZATION

The subject of the study is the influence of cutting tool vibrations on the surface quality of cut sheet materials during mechanical processing, as well as the analysis of the mechanisms of vibration occurrence and the development of methods for their minimization to increase the efficiency of technological operations in mechanical engineering. **The purpose** of the work is to develop scientifically based approaches to predicting the resource of cutting tools and optimizing cutting modes by reducing vibration loads, which will allow to improve the quality of surface processing of sheet materials, reduce production costs and prevent processing defects.

Tasks: assessment of the vibration characteristics of the tool depending on the cutting modes and the degree of wear; analysis of the influence of vibrations on surface roughness and defects (waviness, microcracks); development and testing of vibration minimization methods, including damping systems and ultrasonic vibrations; determination of optimal processing conditions for various materials.

Methods: experimental analysis using accelerometers for three-axis vibration monitoring; profilometry and microscopy for surface quality assessment; stochastic modeling of tool wear based on statistical data; testing of damping systems (elastic couplings, dampers) and ultrasonic vibrations (20–30 kHz); comparative analysis of the effectiveness of lubricating and cooling fluids.

Research results: it was found that vibrations along the X axis have the greatest impact on the formation of surface defects, especially with increasing cutting depth and tool wear; ultrasonic vibrations (22 kHz, amplitude 10 μm) reduce friction and stabilize the cutting process, improving the quality of machined surfaces; damping systems effectively reduce the amplitude of vibrations at critical frequencies (up to 1.5 kHz); the use of water as a coolant turned out to be more effective than copper oil, reducing surface irregularities; an improved model of an end mill with damping elements was developed, which reduces vibration loads and defects when processing thin-sheet materials. **Conclusions:** the conducted studies show that vibration monitoring is an effective tool for diagnosing the condition of the cutting tool and optimizing the cutting process; the integration of damping systems and ultrasonic vibrations allows you to significantly reduce vibration effects, improve the surface quality of sheet materials and extend the tool life, which contributes to the economic efficiency of production and minimizing processing defects.

Keywords: vibrations, cutting tool, surface quality, sheet materials, wear, vibration minimization.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Зенкін М. А., Іванко А. І., Черниш М. Л. Вплив вібрацій різального інструмента на якість поверхні обрізаних листових матеріалів та методи їх мінімізації. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2025. № 2 (32). С. 188–198. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.2.188>

Zenkin, M., Ivanko, A., Chernysh, M. (2025), "Influence of cutting tool vibrations on the surface quality of cut sheet materials and methods for their minimization", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (32), P. 188–198. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.2.188>