

**Лежнін К.В.**Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз  
Служби безпеки України

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЗАСТОСУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКУ ПІД ЧАС МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ КРИХКИХ МАТЕРІАЛІВ

У статті проаналізовано вплив застосування ультразвуку під час механічної обробки крихких матеріалів. Розкрито характеристики крихких матеріалів, включаючи їх високу термостійкість, низьку швидкість зносу та малу вагу порівняно з металами. Наведено проблематику обробки крихких матеріалів. Розкрито алгоритм обробки крихких матеріалів ультразвуком, зазначено, що під час механічної обробки матеріалів ультразвуком крихкий матеріал виколоється з виробу ударами зерен більш твердого абразиву, які направляються торцем робочого інструменту, а кавітаційні процеси в рідкій абразивній суспензії забезпечують винесення матеріалу і подачу свіжої суспензії. За такої технології у виробі, що підлягає обробці, формуються порожнини, які копіюють форму робочого інструмента. Наголошено, що вплив ультразвуку на крихкі матеріали дає змогу змінювати їхні властивості та структуру. Досліджено ефект свердління карбиду кремнію за допомогою різних методів обробки, до яких віднесено: звичайне свердління, осьово-спрямоване свердління з ультразвуком, кавітаційне свердління та гібридне свердління, що включає у себе осьово-спрямоване свердління з ультразвуком та кавітаційне свердління. Запропоновано схему ультразвукової установки для проведення механічної обробки крихких матеріалів. Підкреслено, що продуктивність процесу залежить від багатьох чинників, переважно від механічних параметрів оброблюваного матеріалу, що характеризується критерієм крихкості. Проаналізовано використання ультразвукових коливань у процесі механічної обробки на базі ріжучої рідини. Зазначено негативні та позитивні боки використання ультразвуку під час механічної обробки крихких матеріалів та визначено напрями зниження негативних чинників свердління за допомогою ультразвуку в осьовому напрямі.

**Ключові слова:** вплив, ультразвук, механічна обробка, крихкі матеріали, обладнання, інструмент, кромка, свердління.

**Постановка проблеми.** Останнім часом використання крихких матеріалів поширилося в таких галузях промисловості, як аерокосмічна, автомобільна, оптична та напівпровідникова промисловість, через їхні особливі властивості. Характеристики крихких матеріалів, включаючи їх високу термостійкість, низьку швидкість зносу та малу вагу порівняно з металами [1], є цінними у виробництві прецизійного механічного обладнання. Однак механічна обробка крихких матеріалів усе ще залишається великою проблемою через підвищений ризик руйнування, незважаючи на великі розробки інструментів та ріжучих матеріалів [2]. Сьогодні попит на мікрообробку зріс через мініатюризацію механічних, електричних та оптичних компонентів. А дія ультразвуку під час механічної обробки дає змогу реалізовувати технологічні процеси, які не реалізовані або важко реалізовані, традиційними методами обробки. Під час механічної обробки матеріалів ультразвуком крихкий матеріал виколоється з виробу ударами зерен більш твердого абразиву, які направляються

торцем робочого інструменту, а кавітаційні процеси в рідкій абразивній суспензії забезпечують винесення матеріалу і подачу свіжої суспензії. За такої технології у виробі, що підлягає обробці, формуються порожнини, які копіюють форму робочого інструмента. Вплив ультразвуку на крихкі матеріали дає змогу змінювати їхні властивості та структуру. Звичайна механічна обробка крихких матеріалів забезпечує високі зусилля різання і, як правило, призводить до зносу інструменту та низької якості оброблюваної поверхні [3]. Зокрема, такі технології мікрообробки, як мікросвердління та процес мікрофрезерування, мають проблему низької жорсткості ріжучого інструменту. У результаті було проведено багато досліджень із використанням гібридних методів виготовлення, таких як ультразвукове вібраційне різання. Для обробки важкооброблюваних матеріалів метод ультразвукового вібраційного різання визнаний як ефективний із погляду сили різання, нестабільності різання, зносу інструменту, утворення стружки, якості обробки тощо [4].

Додаткове коливання всередині свердла спричиняє пилкоподібну траєкторію руху в кожній точці кромки інструменту. Таким чином, свердління за допомогою ультразвуку також можна розглядати як процедуру буріння, що передбачає використання високочастотних коливань [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання застосування ультразвуку під час механічної обробки деталей та матеріалів на протязі багатьох років досліджувало чимало вчених. О.П. Колосова, В.В. Ванін, О.Є. Колосов, В.І. Сівецький [2] розглянули широке коло питань, що стосуються моделювання технологічних параметрів базових процесів формування та конструктивних елементів формуючого технологічного ультразвукового обладнання, призначеного для приготування полімерних композицій та виготовлення високоміцних і бездефектних виробів із реактопластичних традиційних композитів у хімічній, машинобудівній та інших галузях промисловості. Авторами досліджено конструктивно-технологічні параметри формуючого ультразвукового обладнання у вигляді хвилеводів-концентраторів та складеного дозвального пристрою з прямокутною випромінюючою пластиною.

Точність вимірювання амплітуди ультразвукових механічних коливань вихрострумовим методом розкрив О.Ф. Закревський [3]. Автором проведено теоретичне дослідження впливу параметрів технологічного процесу виготовлення багатошарових друкованих плат, який застосовують для виготовлення вихрострумових сенсорів із властивістю самокалібрування у складі засобу вимірювання. Статтю [4] присвячено 3D-моделюванню напружено-деформованого стану процесу алмазного вигладжування за використання додаткового впливу механічних коливань (вібрацій). Виконано дослідження зі встановлення раціональних режимів обробки для вказаного комбінованого процесу вигладжування. Із використанням методу багатофакторного планування експерименту типу В4 встановлено математичну модель процесу. Л.П. Калафатова [5] визначила шляхи підвищення ефективності шліфування важкооброблюваних крихких неметалевих матеріалів з урахуванням їхніх фізико-механічних властивостей і структури. Для конкретних матеріалів встановлено пріоритетні технологічні способи позитивного впливу мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ (МОТС) на процес різання. Авторкою встановлено, що дефектність сформованої поверхні під час обробки технічного скла, ситалів і кераміки залежить від рівня напружено-дефор-

мованого стану зони обробки, на який впливають МОТС із підвищеними диспергуючими властивостями. О.Б. Козлова, В.О. Заведєєв [6] розкрили методику підвищення якості поверхні методом безабразивної ультразвукової фінішної обробки. До питання застосування електровпливу для ефективного дроблення матеріалів в умовах металургійної обробки підійшли С.Г. Савельєв, В.В. Плотников та О.В. Бабаєвська [7]. У роботі розглянуто процеси, що відбуваються за методу спільного електрогідравлічного дроблення в'язкого, що не проводить струм, і крихкого провідних матеріалів. Установлено механізм руйнуючого впливу електрогідравлічного ефекту.

Із зарубіжних авторів варто відзначити роботи: Jingsi Wang, Jingguo Fu, Jinlong Wang, Fengming Du [8], Sandeep Kumar, Akshay Dvivedi [9], A. Esmailzare, A. Rahimi [10], Y. Wang, B. Lin, X.Y. Cao, S.L. Wang [11], D.X. Lv, H.X. Wang, Y.J. Tang, Y.H. Huang, Z.P. Li [12], C.L. Zhang, P.F. Feng, J.F. Zhang [13], J.H. Zhang, Y. Zhao, S. Zhang, F.Q. Tian, L.S. Guo, R.Z. Dai [14] та ін.

Проте, ураховуючи описані наукові набутки за темою, питання аналізу впливу застосування ультразвуку під час механічної обробки крихких матеріалів залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

**Постановка завдання.** Мета дослідження полягає у проведенні аналізу впливу застосування ультразвуку під час механічної обробки крихких матеріалів. Поставлена мета передбачає необхідність розв'язання таких завдань: розкрити алгоритм впливу ультразвуку під час проведення механічної обробки крихких матеріалів; дослідити ефект свердління карбіду кремнію (SiC) за допомогою різних методів обробки; проаналізувати використання ультразвукових коливань у процесі механічної обробки на базі ріжучої рідини.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Ультразвуковими називаються пружні коливання матеріального середовища з частотою, що перевищує межу чутності (15–20 кГц). Ультразвукові коливання можуть поширюватися у рідких, твердих, газоподібних середовищах [15]. Тіло, що періодично змінює свої розміри, створює в оточуючому його середовищі періодичні процеси стиснення і розрядження, що поширюються по цьому середовищі. Тіло під час розширення стискає безпосередньо шар середовища, що примикає до нього, який, своєю чергою, передає це стиснення наступному прилеглому шару. Частинки середовища, пружно взаємодіючи, рухаються вздовж поширення стиснення. Стан стиснення проходить

через усе середовище. У наступний момент, коли тіло починає стискатися, стислі шари середовища отримують можливість розширюватися. Частинки середовища починають переміщатися у зворотний бік. Створювані в навколишньому середовищі пружні напруги стиснення і розрядження збуджують коливання частинок середовища біля положення рівноваги. Ці процеси стиснення і розрядження, що поширюються на всі боки, й є звуковими хвилями. Розрізняють три види ультразвукових хвиль: поздовжні, поперечні і поверхневі. У твердих тілах можуть поширюватися хвилі всіх трьох видів, у рідких і газоподібних – лише поздовжні хвилі розрядження – стискування. Якщо зміна обсягу тіла в часі відбувається за гармонійним законом, то і викликані їм ультразвукові коливання будуть гармонійними.

Поділ частинок у неоднорідних суспензіях можливий на підставі того, що в ультразвуковому полі змінний рух частинок, що володіють неоднаковою масою, різний і залежить від частоти коливального процесу. Зі збільшенням частоти коливаються тільки найбільш дрібні частинки, а відносно великі здійснюють рух по складних траєкторіях. Коагуляція полягає в утворенні з дрібних частинок більших. Під впливом ультразвуку і гідродинамічних сил тяжіння частинки б'ються одна об одну і укрупнюються, а потім осідають. Це явище використовують під час очищення димових газів. Унаслідок поглинання ультразвуку частинками коагуляція проводиться на низьких частотах. Дегазація полягає в укрупненні дрібних бульбашок газу, які утворюються під дією кавітації та внаслідок коливання і руху стикаються, об'єднуються й утворюють пухирці великих розмірів, які спливають.

Ультразвуковий тиск являє собою чергування стиснень і розрядження, причому амплітуда стиснення дорівнює амплітуді розрядження. На перешкоду, що знаходиться у полі звукової хвилі, звуковий тиск діє таким чином, що створює на поверхні цієї перешкоди силу, що змінює свій знак відповідно до частоти коливань звукової хвилі.

За впливу на заготовку з крихкого матеріалу інструментом, який має коливання з оптимальною для даної операції амплітудою й ультразвуковою частотою в середовищі, що складається з водної суспензії твердих абразивних частинок, і застосування до інструменту статичного зусилля відбувається копіювання форми перетину інструменту в заготовці і здійснюються операції свердління і вирізання.

Основним чинником, що визначає перебіг процесу, є виколювання, мікрочастинок із поверхні

оброблюваної заготовки ударами абразивних зерен, які отримують значне прискорення від ударів торця інструменту, що коливається з ультразвуковою частотою. Продуктивність процесу залежить від багатьох факторів, переважно від механічних параметрів оброблюваного матеріалу, що характеризується критерієм крихкості. У рамках дослідження прийнято дослідити ефект свердління карбіду кремнію (SiC) за допомогою ультразвуку. SiC є ключовим матеріалом у напівпровідниковій промисловості, він твердий і крихкий одночасно. На рис. 1 показано схему ультразвукової установки для проведення механічної обробки крихких матеріалів. Двокомпонентний датчик сили, який можна було використовувати для вимірювання крутного моменту різання та сили тяги, був установлений між заготовкою та столом механічної обробки.

Під час свердління SiC оцінювали синергетичні ефекти кавітації та осьово-спрямованої вібрації для вивчення зменшення сили тяги та збільшення терміну служби інструменту.



Рис. 1. Схема ультразвукової установки для проведення механічної обробки крихких матеріалів

Джерело: власна розробка автора на основі [8; 12]

Під час удару торця інструменту по абразивних зернах вершини зерен вдавлюються в поверхневі шари деталі та інструменту (рис. 2 а). Заглиблення частинок абразиву в інструмент призводить тільки до пластичних деформацій, і в поверхневому шарі оброблюваної деталі виникає сітка напруг (рис. 2 б). Під впливом напружень, створюваних наступними ударами торця інструменту, відбувається розширення мікротріщин

Таблиця 1

Умови різання

№	Параметр	Значення
1	Ультразвук з осьовим спрямуванням	70 кГц/3,5 мкм
2	Кавітаційний пристрій	42,5 кГц/2-3 мкм
3	Інструмент	Свердло з алмазним покриттям
4	Рідина ріжуча	Тип розчинний
5	Швидкість обертання	8000 мм <sup>-1</sup>
6	Швидкість подачі	6,0 мм/хв
7	Ступінчаста швидкість подачі	0,01 мм
8	Глибина отвору	1,0 мм

і утворення нових. Виникає зона руйнування від ділення частинок у той момент, коли максимальні дотичні напруження в зоні вдавнення перевершують опір зрушенню. Несуча абразив вода розширює мікротріщини, полегшує утворення відколів, доставляє новий абразив у зону обробки, а також охолоджує інструмент та деталь.

Кількісною оцінкою доцільності ультразвукової обробки матеріалу є критерій крихкості:

$$t_x = \frac{\varepsilon_p}{\sigma_p},$$

де  $\varepsilon_p$  – опір матеріалів зрушення;  $\sigma_p$  – опір на відрив.

Головний рух під час розмірної ультразвукової обробки – коливання інструменту. Середня швидкість головного руху

$$V = \frac{4fA}{10^3}, \text{ м/с},$$

де  $A$  – амплітуда коливань;

$f$  – частота коливань інструменту.

Було проведено чотири типи бурових експериментів: звичайне свердління, осьово-спрямоване свердління з ультразвуком, кавітаційне свердління та гібридне свердління (осьово-спрямоване свердління з ультразвуком + кавітаційне свердління). Для кожного експерименту підраховували максимальну кількість отворів, просвердених без зміни інструменту. Умови різання зведено в табл. 1.

У цьому експерименті центральні отвори обробляли свердлом з алмазним центром перед випробуваннями на свердління. Процес свердління проводився за програмою ступінчастої подачі ЧПУ. А для спостереження за процесом різання використовували п'єзоелектричний двокомпонентний датчик сили (динамометр).

Таблиця 2

Максимальна кількість просвердених отворів

№	Вид свердління	Кількість просвердених отворів
1	Звичайне свердління	14
2	Осьово-спрямоване свердління з ультразвуком	42
3	Кавітаційне свердління	60
4	Гібридне свердління	72

Термін служби інструменту було успішно збільшено завдяки осьово-спрямованому свердлінню та кавітаційному свердлінню. Порівняно з осьово-спрямованим свердлінням з ультразвуком кавітаційне свердління було більш ефективним у збільшенні ресурсу інструменту. Окрім того, гібридне свердління дало змогу значно збільшити термін служби інструменту.

Причини цих позитивних наслідків кавітаційного свердління на термін служби інструменту

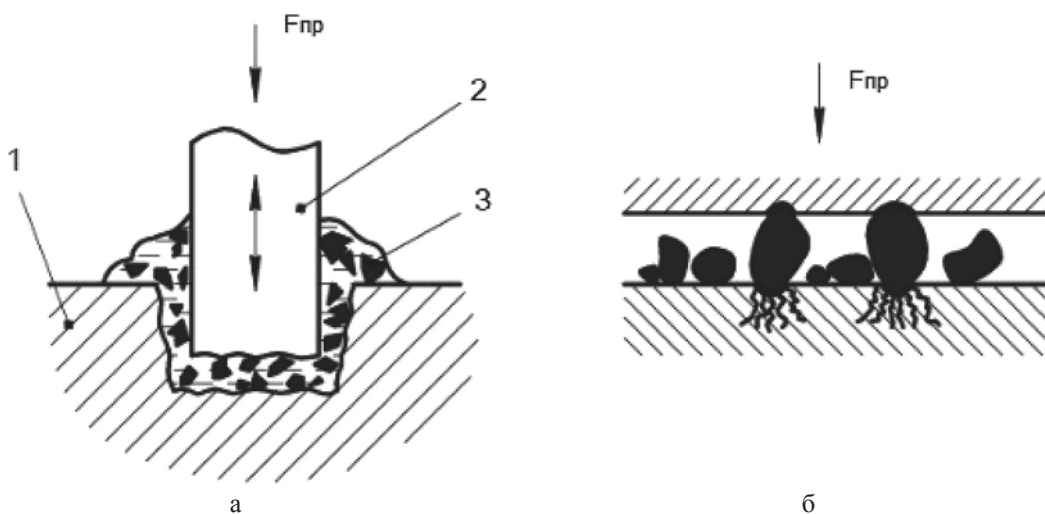


Рис. 2. Схеми процесів різання (а) і руйнування (б) під час ультразвукової обробки крихких деталей [16]: 1 – деталь; 2 – інструмент; 3 – суспензія з абразивом

пояснюються відсутністю зчеплення стружки з наконечником інструменту.

На інструментах не спостерігалось зчеплення зі стружкою під час кавітаційного свердління, тоді як сильне зчеплення стружки відбулося під час осьово-спрямованого свердління з ультразвуком. Величина адгезії стружки була більшою під час свердління з ультразвуком, ніж за звичайного свердління. Однак максимальна кількість утворених отворів досягнута під час гібридного свердління з ультразвуком, та була приблизно втричі більша, ніж за звичайного свердління. Це було зумовлено ефектом биття наконечника інструменту під час осьово-спрямованого свердління з ультразвуком.

Багаторазовий рух інструмента з ультразвуком утворював стружку і призводив до міцного зчеплення з кінчиком інструменту та бічною поверхнею. Однак позитивними ефектами обробки ультразвуком є зменшення сили різання та руйнування заготовки на кінчику інструменту. Окрім того, вплив негативних чинників свердління за допомогою ультразвуку в осьовому напрямі (тобто стиснення та зчеплення ріжучої стружки з кінчиком інструменту) можна успішно зменшити

комбінацією осьово-спрямованого свердління та кавітаційного очищення.

**Висновки.** У роботі проведено аналіз впливу застосування ультразвуку під час механічної обробки крихких матеріалів. До переваг ультразвукової обробки відносять: широту діапазону технологічних застосувань ультразвуку від розмірної обробки твердих і крихких матеріалів до інтенсифікації хіміко-технологічного та електрохімічного процесів; простоту експлуатації промислових установок; можливість автоматизації і механізації та ін. Її недоліком є низький ККД використання акустичної енергії порівнянні з іншими видами енергії.

У цілому представлені матеріали показують, що проблему підвищення продуктивності ультразвукової розмірної обробки матеріалів, що розглядаються в даній роботі, доцільно вирішувати комплексно, оскільки це дасть змогу гарантовано підвищити ефективність обробки.

Перспектива подальших досліджень ґрунтується на формуванні комплексної методики механічної обробки крихких матеріалів за допомогою ультразвуку з метою підвищення якості обробки та збільшення строку служби інструменту, використуваного на всіх етапах обробки.

#### Список літератури:

1. Онищенко С.В. Обробка конструкційних матеріалів. *Лабораторний практикум* : навчальний посібник. Москва : Нобель Пресс, 2015. 121 с.
2. Ультразвукова обробка технологічної сировини полімерних композиційних матеріалів : навчальний посібник / О.П. Колосова та ін. Київ : КПІ імені Ігоря Сікорського, 2017. 188 с.
3. Закревський О.Ф. Точність вимірювання амплітуди ультразвукових механічних коливань вихрострумовим методом. *Електроніка і зв'язь*. 2013. № 1. С. 89–93.
4. Моделювання процесу ультразвукового алмазного вигладжування / В.О. Федорович та ін. *Резание и инструменты в технологических системах*. 2018. Вып. 89. С. 198–204.
5. Калафатова Л.П. Мазильно охолоджуючі технологічні середовища як фактор підвищення ефективності процесів механічної обробки крихких конструкційних матеріалів. *Сучасні технології в машинобудуванні*. 2018. Вип. 13. С. 9–20.
6. Козлова О.Б., Заведєєв В.О. Підвищення якості поверхні методом без абразивної ультразвукової фінішної обробки. *Тиждень науки-2019. Машинобудівний факультет* : тези доповідей науково-практичної конференції, м. Запоріжжя, 15–19 квітня 2019 р. Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. С. 17–18.
7. Савельєв С.Г., Плотніков В.В., Бабаєвська О.В. Застосування електровпливу для ефективного дроблення матеріалів в умовах металургійної переробки. *Вісник Криворізького національного університету*. 2020. Вип. 50. С. 112–117.
8. Wang J., Fu J., Wang J., Du F., Liew P.J., & Shimada K. Processing capabilities of micro ultrasonic machining for hard and brittle materials: SPH analysis and experimental verification. *Precision Engineering*. 2020. Vol. 63. P. 159–169.
9. Kumar, S., & Dvivedi, A. On machining of hard and brittle materials using rotary tool micro-ultrasonic drilling process. *Materials and Manufacturing Processes*. 2019. Vol. 34(7). P. 736–748. DOI: 10.1080/10426914.2019.1594255
10. Esmaeilzare A., Rahimi A., Rezaei S.M. Investigation of subsurface damages and surface roughness in grinding process of zerodur@glass-ceramic. *Applied Surface Science*. 2014. Vol. 313. P. 67–75.
11. Wang Y., Lin B., Cao X.Y., Wang S.L. An experimental investigation of system matching in ultrasonic vibration assisted grinding for titanium. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014. Vol. 214. P. 1871–1878.
12. Lv D.X., Wang H.X., Tang Y.J., Huang Y.H., Li Z.P. Influences of vibration on surface formation in rotary ultrasonic machining of glass BK7. *Precision Engineering*. 2013. Vol. 37. P. 839–884.

13. Zhang C., Feng P., & Zhang J. Ultrasonic vibration-assisted scratch-induced characteristics of C-plane sapphire with a spherical indenter. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2013. Vol. 64. P. 38–48.

14. Study on effect of ultrasonic vibration on grinding force and surface quality in ultrasonic assisted micro end grinding of silica glass / Z. Jianhua, et al. *Shock and Vibration*. 2014. 10 p.

15. Ігнатова Т.М., Глазкова В.В. Вивчення впливу ультразвуку на популяцію мікроорганізмів. *Біомедична інженерія та електроніка*. 2015. № 3. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/biomedengelec\\_2015\\_3\\_9](http://nbuv.gov.ua/UJRN/biomedengelec_2015_3_9) (дата звернення: 26.04.2021).

16. Ультразвукова обробка матеріалів 2018. URL: <https://extxe.com/2192/ultrazvukovaja-obrabotka-materialov/> (дата звернення: 26.04.2021).

#### **Lezhnin K.V. ANALYSIS OF INFLUENCE OF ULTRASOUND AT FRAGILE MATERIALS TOOLING**

*The article analyzes the influence of ultrasound in machining brittle materials. The characteristics of brittle materials, including their high heat resistance, low wear rate and low weight compared to metals are disclosed. The problems of processing brittle materials are given. The algorithm of ultrasonic treatment of brittle materials is revealed, it is noted that during mechanical sonication of brittle materials the brittle material is punched out of the product by blows of harder abrasive grains, which are directed by the end of the working tool. With this technology, cavities are formed in the product to be processed, which copy the shape of the working tool. It is emphasized that the effect of ultrasound on brittle materials allows to change their properties and structure. The effect of silicon carbide drilling using various processing methods, which includes: conventional drilling, axial-directional drilling with ultrasound, cavitation drilling and hybrid drilling, which includes axial-directional drilling with ultrasound and cavitation drilling. The scheme of the ultrasonic installation for carrying out mechanical processing of fragile materials is offered. It is emphasized that the productivity of the process depends on many factors, mainly on the mechanical parameters of the processed material, which is characterized by the criterion of fragility. The use of ultrasonic vibrations in the process of machining on the basis of cutting liquid is analyzed. The negative and positive aspects of the use of ultrasound in the machining of brittle materials are indicated and the directions of reduction of negative drilling factors by means of ultrasound in the axial direction are determined.*

**Key words:** impact, ultrasound, machining, brittle materials, equipment, tools, edge, drilling.