

О.М. Пилипенко¹, Л.Г. Полонський¹, Я.А. Степчин¹, В.М. Ночвай¹, Д.О. Сомов²,
Дахнюк О.П.³

¹Державний університет «Житомирська політехніка»

²Одеський національний технологічний університет

³ТОВ «ЛРЗ «Мотор», начальник відділу матеріально-технічного забезпечення

КІНЕМАТИКА ВІБРОМЕХАНІЧНОГО ШЛІФУВАННЯ ПОКРИТТІВ

У статті виконано кінематичний аналіз варіантів коливальних рухів заготовки для підвищення ефективності чорнових і чистових операцій вібромеханічного шліфування твердих газотермічних покриттів. На основі порівняння кінематики процесів абразивного вібромеханічного різання з лезовим зроблено висновки щодо раціонального застосування осевого, радіального та тангенціального напрямків вектору швидкості коливань в залежності від характеру операції, типу покриттів та його матеріалу, характеристики шліфувального круга.

Ключові слова: кінематика, шліфування, вібромеханічне різання, газотермічне покриття.

O. Pilipenko, L. Polonsky, Ya. Stepchin, V. Nochvay, D. Somov, O. Dakhnyuk

KINEMATICS OF VIBRO-MECHANICAL GRINDING OF COATINGS

In the article, a kinematic analysis of options for oscillating movements of the workpiece is performed to improve the efficiency of roughing and finishing operations of vibromechanical grinding of solid gas-thermal coatings. Based on the comparison of the kinematics of abrasive vibromechanical cutting processes with blade cutting, conclusions were made regarding the rational use of axial, radial and tangential directions of the vibration speed vector depending on the nature of the operation, the type of coating and its material, and the characteristics of the grinding wheel.

Key words: kinematics, grinding, vibromechanical cutting, gas thermal coating

Постановка проблеми. Надійна робота деталей машин залежить від їх трибологічних властивостей та стійкості до різного виду поверхневого руйнування [1]. Одним із напрямків підвищення надійності і довговічності окремих деталей машин є використання ресурсозберігаючих технологій. Враховуючи велику твердість захисних газотермічних покриттів (ГТП), неоднорідність їх структури та недостатню силу зчеплення з основним матеріалом [2], перспективною є технологія їх шліфування з використанням акустичної енергії ультразвукових коливань заготовки. Проте шліфування з використанням примусово введених ультразвукових коливань досі не має ґрунтовної теоретичної бази і використовується часто на рівні емпіричних залежностей, що вимагає додаткового кінематичного аналізу процесу різання.

Постановка завдань. Метою роботи є кінематична оцінка різних видів коливальних рухів заготовки для підвищення ефективності чорнових і чистових операцій шліфування поверхонь із газотермічними покриттями.

Викладення основного матеріалу. Кінематика процесів абразивного вібромеханічного різання (шліфування) ГТП має деякі (суттєві) відмінності від кінематики лезового вібромеханічного різання за рахунок впливу форми абразивних зерен, їх розмірів і розташування на робочій поверхні. На рис. 1. представлена загальна схема моделі плоского шліфування з напрямками можливих вимушених коливань деталі.

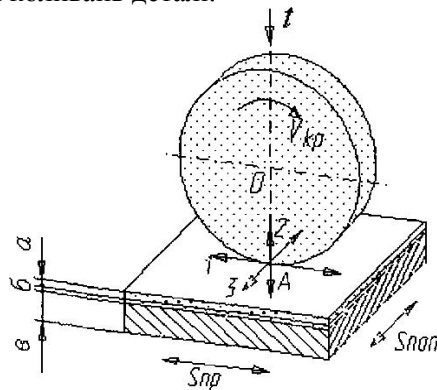


Рис. 1. Схема плоского шліфування з гармонійним коливанням деталі

Проте, схематизація процесу шліфування має враховувати, що корисну роботу стружкоутворення здійснюють тільки робочі абразивні зерна, тому доцільно окремо розглянути стружкоутворення на робочому абразивному зерні ідеальної форми у зазначених напрямках

коливань (рис. 2). Процес мікрорізання одиничним зерном має специфічні особливості у порівнянні з різанням лезовим інструментом (від’ємний передній кут, невизначеність форми зерна і розташування різальних лез, короткочасний контакт з поверхнею деталі і т. ін.).

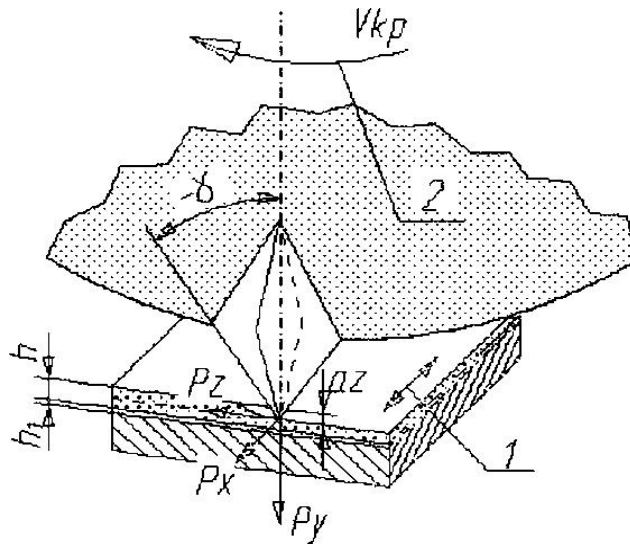


Рис. 2. Схема мікрорізання одиничним зерном

Розглянемо шліфування з вібраціями у поперечному напрямку (рис. 3).

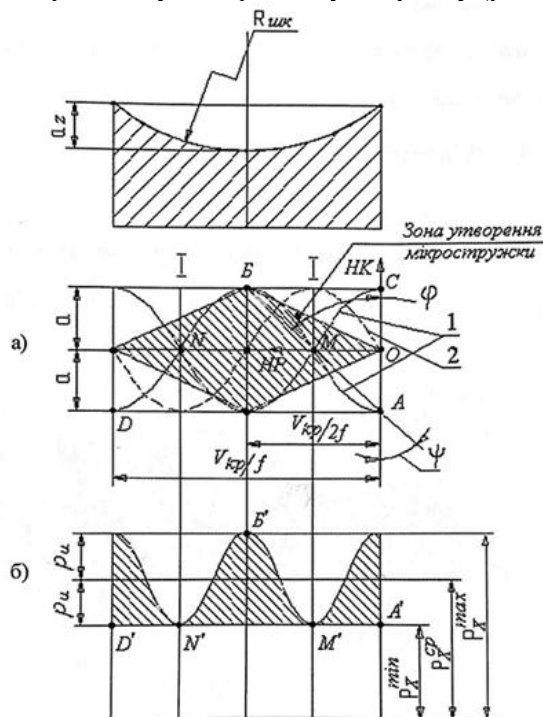


Рис. 3. Схема руху зерна у випадку осьової вібрації (а) і зміни складової сили різання P_z (б)

Кількість циклів осьових коливань залежить від швидкості шліфувального круга $V_{кр}$, амплітуди A та частоти коливань f . Величина переміщення зерна за половину циклу коливання визначатиметься за формулою:

$$BC = \frac{V_{кр}}{2f} \quad (1)$$

де $V_{кр}$ – мінімальна швидкість круга. Вектор напрямку руху зерна є сумою двох векторів: OC – напрямку коливань, і OM – напрямку різання.

$$\tan \varphi = \frac{AM}{AO} = \frac{V_{кр}}{4fa} \quad (2)$$

Враховуючи, що $\varphi = f(V_{кр}, a, f)$, від'ємний передній кут зерна γ буде зменшуватись до значення γ_B . Зі зменшенням $V_{кр}$ і збільшенням добутку Af , величина кута γ_B буде зменшуватись. Це покращує різальну здатність абразивного зерна на ділянках траєкторії АБ та БД.

Аналіз рис. 3 показує, що траєкторія руху зерна 1 ефективніша, ніж траєкторія руху зерна 2, оскільки рух зерна поза зоною утворення мікростружки 1-1 не призводить до виконання корисної роботи (зерно тільки дряпає оброблювану поверхню). Тому при забезпеченні нерівності $V_{кр} < 2\pi Af$ час перебування зерна в заштрихованій зоні можна збільшити при збільшенні f . Мінімальне значення частоти коливань, за умови здійснення коливання за 1 оборот круга, визначиться за формулою:

$$f_{min} = \frac{30D_{кр}}{A} \quad (3)$$

де $D_{кр}$ – діаметр шліфувального круга, мм; A – амплітуда коливань, мм.

Максимальне значення частоти коливань f_{max} обмежується розмірами зони 1 - 1 і враховує коефіцієнт стружкоутворення K_p та параметр d_c . Кореляція максимальної частоти коливань з цими параметрами обумовлює енергоощадливість процесу і в даній роботі не досліджується. Чим більша зернистість і гостріше окреме зерно шліфувального круга, тим більше значення f_{max} . При цьому продуктивність шліфування збільшується.

Теоретичний аналіз дії складових сили різання при роботі одиничного абразивного зерна показує, що складова P_x виникає виключно під час осьових коливань деталі. Імпульсне зменшення і збільшення P_x на ділянці $A^1 - D^1$ (рис. 3. б) в діапазоні $P_x^{min} - P_x^{max}$ регламентується зменшенням і збільшенням переднього кута у та вступом у роботу нових лез зерна, причому корисна дія складової сили P_x проявляється тільки на ділянці M^1N^1 і носить імпульсний характер. Мінімальне значення P_x в точках N^1 і M^1 відповідає передньому куту зерна γ_B , а максимальне значення P_x – в точці B^1 переднього кута γ .

Розглянемо випадок збігу напрямку примусових коливань із напрямком радіальної складової сили різання (рис. 4).

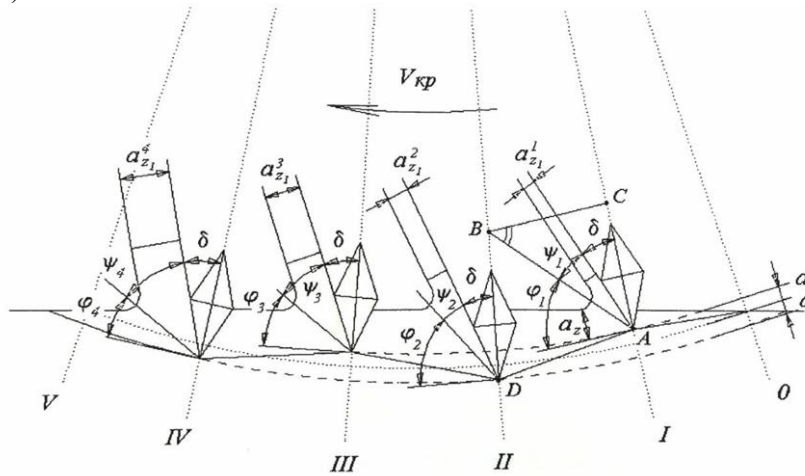


Рис. 4. Схема стружкоутворення при радіальному вібромеханічному шліфуванні:
I - IV – положення абразивного зерна на дузі 0 - V.

Рухом абразивного зерна є траєкторія у вигляді ламаної пилкоподібної лінії на відносно невеликій відстані 0 - V. Так, при зовнішньому діаметрі шліфувального круга 200 мм та швидкості обертання 28 м/с час одного обороту становить 1/47 секунди. Залежно від глибини різання, пружних властивостей матеріалу покриття, його зернистості та структури (K_p, Π) довжина дуги контакту абразивного зерна дорівнює 0,8 - 1,7 мм [3]. Із загальної кількості абразивних зерен, що розташовані на робочій поверхні, частка різальних становить 8 - 12% [4]. Потенційним резервом різальних зерен є зерна, що тільки дряпають поверхню деталі, погіршуючи її шорсткість і не виконуючи корисної роботи (їх кількість становить 33 - 35%) [4]. Третя група зерен теж не виконує корисної роботи по зняттю припуску, тільки третється по поверхні деталі, підвищуючи температуру в зоні різання. Кількість таких зерен становить 40 - 42% [5].

Радіальне вібромеханічне шліфування передбачає можливість коливання різального зерна з амплітудою A і частотою f відносно центральної траєкторії, що характеризується глибиною різання t . За половину циклу коливання деталі в радіальному напрямку різальне зерно пройде

шлях $AD \approx BC = \frac{V_{\text{КР}}}{2f}$. Із положень I і III (рис. 4) абразивне зерно «рухається вниз», що збільшує глибину різання, і поверхня деталі отримує імпульс сили стискання. Із положень II і IV абразивне зерно «рухається вгору», і під дією передньої поверхні зерна виникають деформації зсуву. Таким чином, при проходженні абразивного зерна по дузі контакту під дією імпульсних сил стискання і зсуву утворюється елементарна мікростружка, яка, перетворюючись на металевий пил, легко видаляється із зони різання і робочої поверхні шліфувального круга. Механізм радіальної вібрації підвищує ефективність шліфування за рахунок переходу частини абразивних «дряпаючих» зерен другої групи в першу групу різальних. Але для тонкостінних покриттів (плазмово-дугових і детонаційно-газових) з'являється небезпека пошкодження суцільності перехідної зони на межі розподілу [6]. У процесі руху абразивного зерна спостерігається зміна кута зсуву φ , та товщини мікростружки a_z .

Для розрахунку кута зсуву і товщини мікростружки є можливість використати такі залежності – з трикутника ABC визначається кут зсуву мікростружки у позиціях I і III:

$$\tan \varphi_1 = \tan \varphi_3 = \frac{2df}{V_{\text{КР}}}, \quad (4)$$

де d – характерний геометричний параметр зерна.

Кут зсуву мікростружки в позиціях II і IV визначається за формулою:

$$\tan \varphi_2 = \tan \varphi_4 = \frac{2(d + 2A)f}{V_{\text{КР}}}. \quad (5)$$

Розрахунок товщини мікростружки для верхнього положення зерна можна визначити за формулою:

$$a_{z1}^1 = a_{z1}^3 = \frac{a_z \cdot \sin \psi_1}{\sin \varphi_1} \quad (6)$$

Товщина мікростружки для нижнього положення зерна визначається за формулою:

$$a_{z1}^2 = a_{z1}^4 = (a_z + 2a) \frac{\sin \psi_2}{\sin \varphi_2} \quad (7)$$

де a_z – миттєва глибина мікро різання; ψ_1, ψ_2 стружкоутворення.

Розглянемо кінетичну модель вібротехнічного шліфування покриттів, коли напрямок вимушених коливань збігається з напрямком тангенційної складової сили різання для випадку, що абразивне зерно (A3) є тілом ромбічної форми з ідеальними різальними лезами. Напрямок вібрацій заготовки може збігатися з напрямком різання шліфувального круга або бути протилежним йому за умови, що $V_{\text{КР}} < 2\pi Af$ (рис. 5).

У випадку співпадіння напрямків вібрації і різання, шліфування буде здійснюватися за звичайною схемою. Якщо ж напрямок вібрації протилежний напрямку різання, то спостерігається порушення контакту A3 з мікростружкою і створюється ефект вібротехнічного різання. Для повного забезпечення цього ефекту за час контакту A3 з оброблюваною поверхнею заготовки має відбутись не менше двох коливань. Якщо контакт умовно починається з точки A, то на ділянках BCD і EFK мікростружка розділиться на два елементи. На ділянці траєкторії DE контакт буде перерваний. Посилує ефект стружкорозподілення зростання поруватості покриття і її нерівномірність. Примусові коливання A3 є гармонійними і енергія руху постійно відновлюється. Тому рух A3 може бути описаний формулою: $y = a \cdot \sin \omega t$, де t – поточне значення часу кругового коливання.

Висновки. Аналіз кінематичних схем шліфування з використанням примусових коливань показує, що залежно від координати напрямку вібрації і напрямку різання проявляються нові, притаманні тільки одному із варіантів координати, позитивні властивості процесу. Поліпшення умов стружкоутворення, збільшення кількості робочих зерен, використання більшої кількості різальних лез на зерні, покращення мікрогеометричних параметрів зерна – це ті позитивні якості віброшліфування, які характерні при застосуванні осьового, радіального та тангенціального напрямків вектору швидкості коливань. Вибір і реалізація того чи іншого варіанта здійснюється залежно від характеру операції (чорнова або чистова), типу покриттів та його матеріалу, характеристики шліфувального круга.

Осьове вібротехнічне шліфування більш придатне для чорнової, попередньої обробки кругами високої твердості і поруватості з карбіду кремнію зеленого або титаністого електрокорунду.

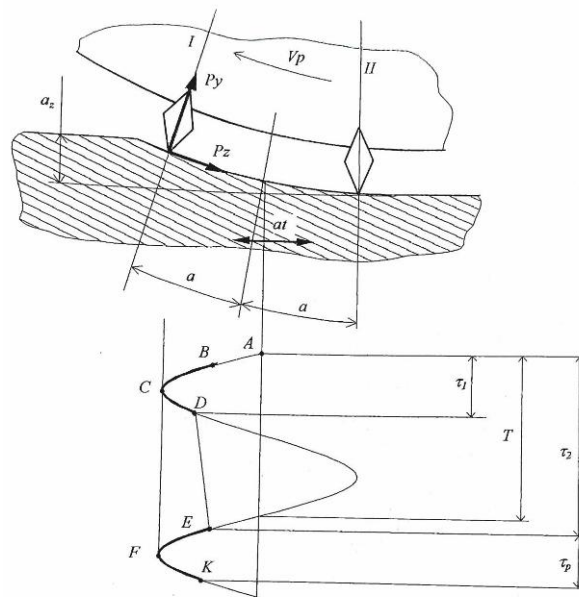


Рис. 5. Схема переривчастого контакту абразивного зерна

Радіальне вібромеханічне шліфування краще використовувати для обробки покриттів із зернистістю напилюваних частинок 150 мкм і більше, оскільки при цьому найкраще реалізується ефект «когезійного руйнування» покриття. Тангенціальне віброшліфування доцільніше використовувати при чистовій, остаточній обробці покриттів, коли необхідно звести до мінімуму негативний вплив силового і температурного факторів.

Список використаних джерел:

1. Підгайчук С.Я., Дробот О.С., Яворська Н.М., Машовець Н.С. Відновлення деталей машин комбінованими методами обробки. Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні, 2020. 109-110 с.
2. Сокур, Т.Д., Попіль Ю.С., Корж В. М. Огляд сучасного стану і перспектив розвитку газотермічних способів нанесення покриття. Journal of Mechanical Engineering NTUU" Kyiv Polytechnic Institute", 2011 – 2(61), 168-171 с.
3. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под ред. Н. В. Новикова. – Киев: ИСМ НАНУ, 2001. – 528 с.: ил.
4. Шепелев А.О. Інтенсифікація процесів шліфування інструментальних матеріалів кругами із синтетичних алмазів і кубічного нітриду бора : Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.03.01. – Х., 2002. – 36 с.
5. Pilipenko A.M. Treatment of coatings by the combined method. Welding International, 2002 – 16 (11), p. 903-908.
6. Тонконогий В.М, Рибак О.В. Вибір параметрів шліфування плазмових покриттів при багатокритеріальній оптимізації технологічного процесу. Резание и инструменты в технологических системах, 2018 – 89, 190-197 с.