

УДК 621.941; 621.7.029

О.М. Пилипенко, д.т.н., проф.

Черкаський державний технологічний університет

МІКРОТВЕРДІСТЬ ВІДНОВЛЕНИХ АВТОДЕТАЛЕЙ ПІСЛЯ КОМБІНОВАНОЇ ОБРОБКИ

Досліджено вплив комбінованого лезового різання на мікротвердість відновлених автодеталей методом газотермічного напилення. Показано, що спільна дія механічного і акустичного факторів сприяє покращенню стружкоутворення і через дислокаційне поглинання ультрозвукових коливань покращує оброблюваність покриттів.

Постановка проблеми. Необхідність відновлення коштовних і складних за геометричною формою автодеталей є безперечною. Відсутність деформацій деталей через невисоку температуру на її поверхні при відновленні, а також можливість нанесення будь-яких тугоплавких композицій свідчить про суттєві переваги газотермічних методів напилення над електродуговою наплавкою.

Використання традиційної технології механічної обробки автодеталей з тонкими газотермічними покриттями є неефективним через зняття значного їх шару та підвищення структурної пошкоджуваності поверхні деталей. Комбінований процес механічної обробки, що включає сумарну дію на матеріал покриття механічного та акустичного факторів, суттєво зменшує ці недоліки [1] але потребує більш глибоких досліджень мікротвердості покриття як вагомого фактора експлуатаційної характеристики. Оцінка впливу амплітудної характеристики гармонійних ультрозвукових (УЗ) коливань на відносну товщину стружки, модель руйнування покриття, а також аналіз впливу дислокаційного поглинання енергії УЗ-коливань на фізико-механічні характеристики оброблюваного матеріалу – є важливим для удосконалення технології відновлення авто деталей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження мікротвердості газотермічних покриттів (ГТП) здійснювалось у роботах Ю.С. Борисова, А.І. Сидорова, А.І. Зверєва, В.В. Кудинова та інших [2, 3, 4, 5]. Але досліджувались фізико-механічні властивості ГТП після їх формування без урахування впливу методів обробки. Дія термосилового навантаження на тонкий шар ГТП від лезового або абразивного інструмента призводить до деформаційного зміцнення або знеміцнення. В окремих випадках спостерігається навіть розтріскування покриття або припали. У роботах С.А. Клименка та Ю.О. Мельнічука [6], [7] показані результати досліджень параметрів якості поверхневого

шару ГТП після обробки лезовим інструментом з надтвердих матеріалів. Значний контактний тиск призводить до явищ наклепу, але, що відбувається на межі розподілу „покриття–основний матеріал” та у міжзеренному просторі, у згаданих роботах не розглядається.

Використання лезового віброрізання для обробки компактних важкооброблюваних матеріалів впроваджується у виробництво дуже повільно, хоча теоретичні розробки таких процесів відомі з 80-х років [8], [9], [10]. Вплив акустичної активації на дислокаційну структуру кристалічних матеріалів є суттєвим, особливо в ультразвуковому діапазоні. Але механізми зміни фізико-механічних властивостей ГТП в умовах такого комбінованого різання вивчені ще недостатньо.

Мета досліджень. Базуючись на вищезазначених роботах та враховуючи неможливість їх використання для прогнозування результативності комбінованого лезового різання ГТП, метою досліджень є визначення механізмів формування мікротвердості поверхневого шару відновлених автодеталей та оцінка впливу режимів процесу обробки на вихідні параметри.

Результати досліджень. При радіальному віброрізанні різальне лезо різця, рухаючись вниз, збільшує глибину різання і задня поверхня інструмента (ЗП) з поверхнею покриття мають ударне навантаження.

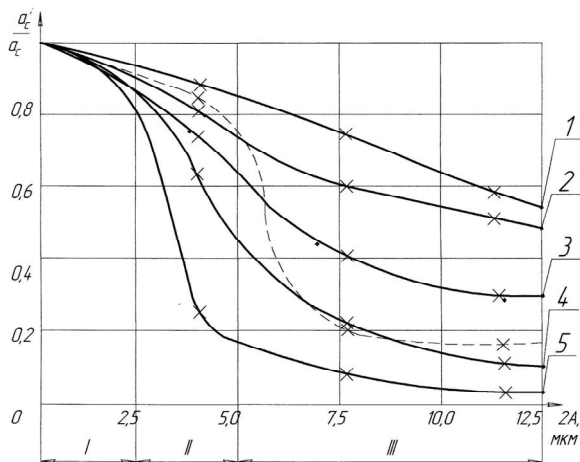
При цьому на деталь діє імпульсна сила стиснення. Якщо рух різця супроводжується зменшенням глибини різання, то під дією передньої поверхні інструмента (ПП) виникає деформація зсуву. На оброблюваний матеріал покриття діють сили розтягнення імпульсного характеру. Товщина стружки в цьому випадку може визначатись відповідно до результатів роботи [11]:

$$a_c = (a + A) \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \gamma - \beta\right)}{\sin \beta} - 2A \frac{\sin\left(\beta - \frac{\pi}{2} + \gamma\right)}{\sin \beta}, \quad (1)$$

де a – товщина зрізаного шару.

Експериментально перевірено достовірність формули (1). Обточувалось самофлюсівне покриття ПГ-СРЗ киборитовим різцем з кутом $\varphi = 45^\circ$ на таких режимах: $t = 0,20$ мм; $S = 0,05$ мм/об; $V = 0,16 \div 1,66$ м/с; $f = 20$ кГц; $2A = 0 \div 15$ мкм. Вимірювання товщини стружки a_c здійснювалось на інструментальному мікроскопі ІМЦ-100х50А з пристроєм індексації УЦП-1М. Графічна залежність максимальної відносної зміни товщини стружки від амплітуди коливань представлена на рис. 1.

Рис. 1. Вплив амплітуди високочастотних коливань



на відносну товщину зрізу: 1 – $V = 1,66$ м/с;
 2 – $1,25$ м/с; 3 – $0,83$ м/с; 4 – $0,4$ м/с; 5 – $0,16$ м/с;

a_c' – дійсна товщина стружки;

a_c – розрахункова товщина стружки;

— — — — зернистість 40; - - - - зернистість 60 ($V = 0,16$ м/с)

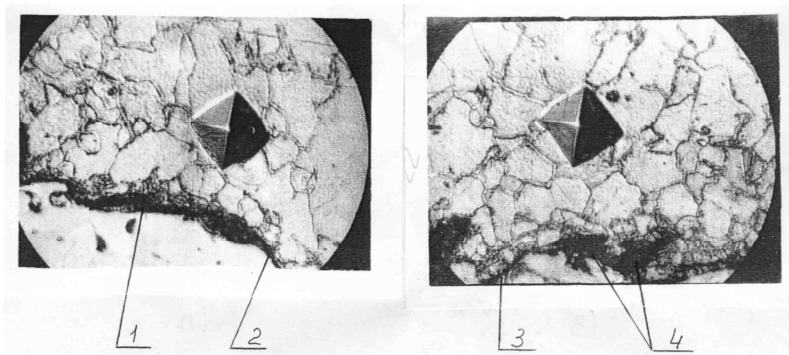
Аналіз результатів вимірювання товщини стружки за різних умов вібротехнічного точіння показує, що підвищення амплітуди високочастотних коливань дає інтенсивне зниження параметра a_c' / a_c , і це спостерігається при швидкості різання $0,16$ м/с у діапазоні амплітуд $2,5 \div 5,0$ мкм. Для більш високих швидкостей різання зниження відносної товщини стружки є менш інтенсивним, що пояснюється впливом швидкості деформації на механізм руйнування покриття, а також співвідношенням амплітуди коливань з середнім розміром напилених частинок. Зміна зернистості порошка, що напилується, впливає на розта-

шування зони інтенсивної зміни відносної товщини стружки (зона II). Прямопропорційно зміні середнього розміру зерен досліджуваних порошків, які напилуються, зона II зміщується уздовж вісі $2A$. Зони I і III є залежними від розташування зони II і характеризуються станом стійкого стружкоутворення певного індекса автотельності. По суті, зона II є перехідною і нестійкою, де відбувається перехід від одного механізму руйнування (транскристалітний скол) до іншого (інтеркристалітний скол). З підвищенням швидкості різання при незмінній частоті коливань ефект вібромеханічного різання проявляється менше, і графічні залежності $a'_c / a_c = f(2A)$ є більш пологими. Загальна дія ефекту високочастотних коливань на періодичну зміну товщини стружки зростає з збільшенням амплітуди A і зменшенням швидкості різання V . Синхронно зі зміною товщини зрізаного шару покриття змінюється глибина деформаційно-зміцненого поверхневого шару. Визначення глибини наклепу здійснювалось за методом косих зрізів з кутом $1^\circ 30'$. За допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 вимірювалась мікротвердість при навантаженні алмазного індентора силою 1Н зі збільшенням зони візуального контролю у 520 разів. Ступінь наклепу розраховувався за формулою:

$$N = \frac{HM' - HM}{HM} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де HM' і HM – мікротвердості обробленого шару та вихідного матеріалу.

На рис. 2 представлена мікроструктура самофлюсівного покриття ПГ-СРЗ після а) звичайного і б) вібромеханічного методів обробки. У першому випадку спостерігається еволюція мікротріщин у макротріщину. Середня мікротвердість по трасі косою зрізу становить 3,25 ГПа. У другому випадку мікротріщина заблокована порою і її береги наближені на відстань, що дозволяє “заліковування” ($\delta < 10$ мкм). Середня мікротвердість становить 1,86 ГПа.



а)

б)

Рис. 2. Мікроструктура покриття ПГ-СРЗ після різних методів обробки: а) після звичайного обточування; б) після вібромеханічної обробки; 1 – макротріщина; 2 – мікротріщина; 3 – береги мікротріщини; 4 – пори

Причиною зниження наклепу поверхневого шару при вібромеханічному методі обробки є суттєве послаблення силового навантаження з боку різального інструмента і акустична активація дислокацій внутрішньочастинкової зони. Періодичні хвилі напружень сприяють зменшенню гирла мікротріщини та можливому її “заліковуванню”.

Розподіл мікротвердості по нормальному до основи перетину покриття характеризує силовий і акустичний вплив методів обробки на формування експлуатаційних параметрів з урахуванням нашарованих технологічно-спадкоємних факторів. Деформаційне зміцнення поверхневого шару основи, як результат процесу напилення, і перехідного шару між основою і покриттям має лінійну залежність від глибини залегання h (рис. 3). На відстані приблизно 100 мкм від основи графічна залежність $HV_{100} = f(h)$ для самофлюсівного плазмоводугового покриття ПГ-СРЗ переходить у криволінійну форму. На цій ділянці спостерігаються деякі особливості звичайного та вібромеханічного методів лезового різання. Так, при звичайному різанні (крива 1, рис. 3, а) HV_{100} покриття монотонно зростає і досягає максимального значення на остаточно обробленій поверхні. При задіянні примусових високочастотних коливань відмічається загальне зниження мікротвердості на 10 ÷ 15 % і деякі особливості у формі кривої (рис. 3, а, крива 2). Загальне зниження HV_{100} пояснюється суперпозицією дії силового і акустичного факторів. Перший зменшується через позитивні відмінності руйнування покриття при вібромеханічному різанні. Другий фактор активує дислокації внутрішньої і міжчастинкової зон, по якій і здійснюється відокремлення елементів стружки. Незначне зниження мікротвердості приповерхневого шару покриття пояснюється частковим знеміцненням через локальний нагрів на активних центрах контакту “ЗП–поверхня різання”.

Фізичну сутність контактних явищ під впливом акустичної енергії можна пояснити на прикладі аналізу залежності $HV_{100} = f(\rho_D)$, представленої на рис. 3, б. Дислокаційне поглинання акустичної енергії, що здійснюється як в осерді частинок, так і в міжчастинковій зоні, проходить з реалізацією механізму резонансного типу або механізму амплитудозалежного гістерезису. Найважливішою кіль-

кісною характеристикою дислокаційної структури є щільність дислокацій $\rho_D = L/V$, де L – сумарна довжина, см, дислокаційних ліній в об’ємі V , см³. Швидкість руху дислокацій під дією сили, що прикладається, $F = \tau b$ визначає сутність явища деформаційного зміцнення і корелюється зі щільністю дислокацій. Так, при лезовій обробці конструкційних матеріалів швидкість пластичної деформації $\dot{\gamma}$ складає $10^3 \div 10^5$ с⁻¹, а параметр ρ_D змінюється в межах $10^8 \div 10^{10}$ см⁻², що відповідає зоні I на рис. 3, б. У цьому випадку дислокації будуть ковзатись зі швидкістю $V = \dot{\gamma} / \rho_D b \sim 10^{-7} \div 1$ см/с. При швидкісному точінні інструментом з ПНТМ швидкість деформації матеріалу покриття буде збільшуватись до величини 10^6 с⁻¹ з відповідним зростанням щільності дислокацій ρ_D до $10^{11} \div 10^{12}$ см⁻² (зона II на рис. 3, б). Циклічні напруження розтягнення–стиснення приводять до зміни механічних властивостей матеріалу покриття.

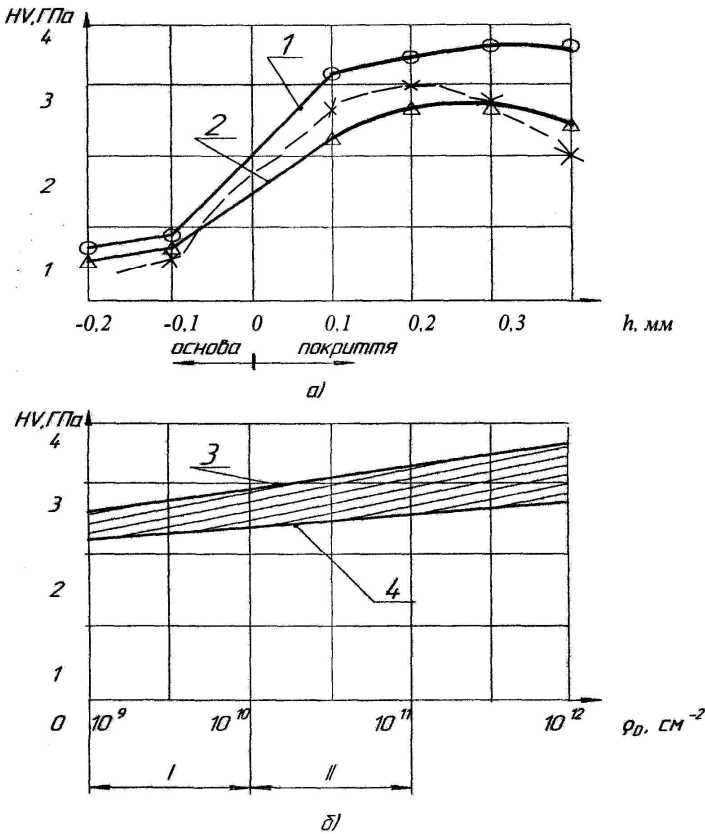


Рис. 3. Вплив виду різання на характер деформаційного зміцнення:

- а) розподілення мікротвердості по глибині покриття;
- б) дія акустичного анігілятора на мікротвердість покриття;
- I, II – зони різних швидкостей пластичної деформації;
- 1, 3 – звичайне різання; 2, 4 – вібротехнічне різання;
- — — — — мікротвердість необробленого зразка

Дослідження щільності ямок зчавлювання на площинах частинок самофлюсівних покриттів ПГ-СРЗ після звичайної та вібротехнічної обробки здійснювались методами мікроструктурного і електронно-мікроструктурного аналізів. Щільність дислокацій підраховувались, як відношення середньостатистичного числа ямок зчавлювання до однієї клітинки виміральної сітки.

Величина і форма ямок зчавлювання на одномірних дефектах структури частинок визначалися складом і хімічною природою зчавлювача. Якщо різниця хімічних потенціалів частинки як кристалічного тіла і зчавлювача менша від нуля, то відбувається розчинення. Перед зчавлюванням здійснювалась підготовка поверхонь методами шліфування і полірування згідно з методикою, яка представлена у роботі [12]. Хімічний склад розчинів для електролітичного полірування і зчавлювання підбирались експериментально з урахуванням хімічних елементів покриттів, як композиційних матеріалів (табл. 1).

Таблиця 1

Склад розчинів і режимів зчавлювання

Матеріал покриття	Склад розчину	Режим електролітичного полірування
Самофлююєвне плазмоводугове покриття ПГ-СРЗ	80 %H ₃ PO ₄ + 13 %C _r O ₃ + +7 %H ₂ O, або 5 мл 50 %-ої НГ + 80 мл 30 %-ої H ₂ O ₂ + 15 мл H ₂ O	11 _в , 5 А/см ² , 4–6 хв. катод- нержавіюча сталь

Отримані результати досліджень контактних явищ між інструментом і покриттям пояснюються так: протягом одного напівперіода коливань змінні напруження додаються до статичних, а протягом другого – віднімаються. У першому випадку величина сумарного напруження буде перевищувати значення, яке необхідне для підтримання процесу пластичного деформування у звичайних умовах. Це створює можливість більшій кількості дислокацій долати перешкоди для їх ковзання та інтенсифікує пластичну деформацію. При звичайному різанні, коли напруження стабілізуються біля середнього значення і дислокації не можуть відірватись від перешкод, то частина цих перешкод може подолатись за допомогою додаткової акустичної енергії, еквівалентної за характером дії тепловій. Тоді переривчастий рух дислокацій може складатись з ковзання з фононим тертям ($V \sim \tau$) і очікуванням біля перешкод. Нелінійна залежність швидкості руху дислокацій V від діючого напруження σ виникає через декілька причин, що залежать від структурної побудови ГТП. По-перше, чим більшими є загальні напруження σ_{Σ} , тим менша кількість перешкод у матеріалі міжчасткової зони можуть зупинити рух дислокацій. По-друге, дислокації після вивільнення можуть рухатись не тільки “вперед”, але й “назад”, тому їх швидкість пульсує у полі слабких перешкод, які зупинити дислокацій не можуть.

Висновки. Мікротвердість поверхневого шару покриття на відновлених автодеталях під впливом різального інструмента є нерівномір-

ною і залежить від зміни відносної товщини стружки, яка функціонально відтворює різний характер руйнації покриття залежно від швидкості різання, амплітуди примусових коливань і зернистості порошку, що напилюється. При вібротехнічному методі різання величина наклепу знижується на 10–15 % через суттєве послаблення силового навантаження і акустичну активацію дислокацій внутрішньої і міжчастинкової зон. Фізична сутність контактних явищ під впливом акустичної енергії пояснюється дислокаційним поглинанням високочастотних коливань і зміною механічних властивостей через циклічний характер напружень розтягнення–стиснення. Незначне зменшення мікротвердості поверхневого шару покращує його пластичність і сприяє меншій імовірності крихкого руйнування при динамічному навантаженні.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Пилипенко О.М.* Вібраційна обробка газотермічних покриттів. – Черкаси: Сіяч, 2000. – 203 с.
2. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справ. / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Ардатовская. – К.: Наук. думка, 1987. – 544 с.
3. *Сидоров А.И.* Восстановление деталей машин напылением и наплавкой. – М.: Машиностроение, 1987. – 190 с.
4. *Зверев А.И., Шаривкер С.Ю., Астахов Е.А.* Детонационное напыление покрытий. – Л.: Судостроение, 1979. – 232 с.
5. *Кудинов В.В.* Плазменные покрытия. – М.: Наука, 1977. – 184 с.
6. *Клименко С.А.* Основи лезової обробки зносостійких захисних покриттів: Автореф. дис...д.т.н. /05.03.01/ – К.: ІНМ НАНУ, 1999. – 36 с.
7. *Мельничук Ю.О.* Особливості точіння покриттів з аморфнокристалічною структурою: Дис...д.т.н. / 05.03.01 / – К.: ІНМ НАНУ, 2002. – 183 с.
8. *Марков А.И.* Ультразвуковая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с.
9. *Кумабэ Д.* Вибрационное резание. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
10. Применение ультразвука и взрыва при обработке и сборке / М.Ф. Вологин, В.В. Калашников, М.С. Нерубай, Б.Л. Штриков. – М.: Машиностроение, 2002. – 264 с.
11. *Подураев В.Н.* Обработка резанием с вибрациями. – М.: Машиностроение, 1970. – 480 с.

12. *Поплов Л.Я., Зайцева Л.П.* Электрополирование и электро-
травление металлографических шлифов. – М.: Металлургия,
1973. – 410 с.

ПИЛИПЕНКО Олександр Михайлович – доктор технічних наук,
професор, завідувач кафедри автомобілів та технологій їх експлуатації
Черкаського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- зміцнення та реновація автодеталей;
- комбінована обробка газотермічних покриттів.

Тел.: (0472) 422-183.

Подано 22.03.2006