

О.М. Пилипенко, к.т.н., доц.
Черкаський інженерно-технологічний інститут

ДИСЛОКАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ СТАН ПОКРИТТІВ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМУ РІЗАННІ

Показана еволюція дислокаційної структури газотермічних покриттів. Встановлені властивості міцності покриттів, які можуть змінюватись при різній швидкості руху дислокацій. Механізми деформацій матеріалів покладені в основу кінетики дислокаційної структури.

Відновлення та зміцнення деталей машин методами газотермічного напилення зносостійких матеріалів є поширеною технологічною операцією сучасного машинобудування в Україні. Така технологія впроваджена і на багатьох ремонтних заводах та підприємствах. І хоча переваги газотермічного напилення (ГПН) перед електродуговою наплавкою є незаперечними, але високий рівень ушкоджуваності покриттів суттєво знижує їх ефективність. Залишкові внутрішні напруження σ_{en} , що обумовлюються особливостями технології напилення при досягненні критичних значень, призводять до руйнації покриттів у вигляді розтріскування та часткового відшарування. Формування напружено-деформованого стану (НДС) при охолодженні покриття визначає рівень σ_{en} і наступна механічна обробка, як правило, підвищує цей рівень дією температурно-силових факторів. Спроби максимально зменшити негативний вплив термосилових факторів при механічній обробці шляхом застосування інструментів з надтвердих матеріалів лише частково вирішують проблему. При цьому собівартість обробки значно збільшується [1, 2], у порівнянні з обробкою ГПН інструментом зі звичайних матеріалів.

На підставі вище викладеного, метою роботи є визначення характеру та особливостей зростання рівня дефектності ГПН при механічній обробці та розробка комбінованого методу різання, що стабілізує або знижує цей рівень.

1. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ НАКОПИЧЕННЯ ДЕФЕКТІВ

В [3, 4, 5] розглядаються основні причини, що призводять до високого рівня НДС у ГПН. Так загальний рівень НДС має два стани формування: а) рівень мікронапружень в обсязі елементарної частинки; б) рівень макронапружень в обсязі всього покриття. Мікронапруження в окремих частинках формуються через зіступання матеріалу. При цьому низ частинки формується утруднено під дією зхвачування в локальних зонах з поверхнею основи, а верх – вільно. В [5] отримано формули для оцінки мікронапружень і деформації при охолодженні ГПН:

$$\sigma_{en}^m = \frac{E_s}{1-\nu} [C_0(\alpha_s T_s - \alpha_0 T_0)^2 - \alpha_s T_s]; \quad (1)$$

$$\varepsilon = 2,28 \cdot \left(1 + \frac{h_s \cdot E_s}{h_s \cdot E_0}\right)^{-2} \cdot \left(\frac{D_s}{d_s}\right)^6, \quad (2)$$

де E – модуль Юнга; ν – коефіцієнт Пуассона; α – коефіцієнт термічного розширення (КТР); h – товщина; D_s, d_s – діаметри напилюємої та розплющеної частинок; C_0 – питома теплоємність основи; T – температура.

Індекси s та 0 характеризують частинку і основу.

При охолодженні здеформованої частинки на матеріалі основи зусилля зіступання сприяють появі згинаючого моменту. При цьому виникають нормальні до площини контакту напруження σ_{θ}^N . Якщо вони перевищують міцність зчеплення частинки σ_{zc} , то спостерігається відрив її країв від основи. Паралельно, під дією згинаючого моменту, виникають дотичні до площини контакту напруження τ_{θ}^M , які прагнуть розірвати покриття і можуть релаксуватись мікротріщинами.

Загальні залишкові внутрішні макронапруження σ_{θ}^{Σ} , що формуються в обсязі всього покриття, складаються з таких елементів:

– кристалізаційні напруження. Формуються під впливом кристалізації всіх частинок і частково знижуються через фактор термоцикування (термовплив частинок і шарів покриття);
 – температурні напруження, що формуються в обсязі всього покриття як суцільного матеріалу та при нашаруванні частинок багатопрохідного напилення;

– структурні напруження, що формуються під впливом зміни об'ємів і щільностей окремих фаз при перебудові кристалічних ґраток. Така перебудова має місце при здійсненні реакцій утворення оксидів, боридів, карбідів, нітридів, інтерметалідів тощо.

Враховуючи структурні особливості ГТП та їх побудову, можна використовувати різні моделі для описання процесів дефектоутворення в покриттях під впливом пластичної деформації. При цьому величина σ_{σ}^{Σ} може визначатись за формулою:

$$\sigma_{\sigma}^{\Sigma} = E_p (\varepsilon_t + \varepsilon_k - \varepsilon_p) / (1 - \nu), \quad (3)$$

де E_p – рівновісний модуль пружності; ε_t – коефіцієнт термічного зіступання, що характеризує відношення коефіцієнтів лінійних розширень покриття і основи; ε_k – коефіцієнт зіступання під впливом кристалізації; ε_p – коефіцієнт часткової рекристалізації.

2. МЕХАНІЗМИ РУЙНУВАННЯ ГТП ПРИ ДЕФОРМАЦІЇ

Пластична деформація при формоутворенні та механічній обробці ГТП здійснюється за механізмом зіступання та під дією сил різання. Згідно з класифікацією дефектів у ГТП [6], вони підрозділяються на макротріщини формування покриттів (у вигляді пор), та мікротріщини, які утворюються (зароджуються) при пластичній деформації. Розглядаючи механізм зародження мікротріщин як процес встановлення термомеханічної рівної, коли релаксація σ_{σ}^{Σ} шляхом пластичної деформації є неможливою, найбільш імовірною може бути дислокаційна модель утворення мікротріщин у гетерогенній структурі ГТП.

Тому що дислокаційна тріщина є різновидом ядра дислокацій з великим вектором Бюргерса, вона може утворюватись у покритті біля структурних бар'єрів і перешкод. Такими бар'єрами є крихкі частинки інородних включень та частинки, що встигли охолонути і кристалізуватись ще у повітрі. Також у цьому випадку межа зародження мікротріщини може бути пов'язана з розтріскуванням крихкої фази як результат її перерізу дислокаційним накопиченням. Нарешті, можливий варіант зародження мікротріщини безпосередньо в крихкій частинці з наступним її поширенням у матрицю.

В залежності від того, який характер росту тріщини має місце у ГТП (мікроскопічний чи макроскопічний), може бути 3 види руйнування: руйнування сколом, руйнування зрізом, руйнування за границями зерен. Перші два види – транскристалічні, а третій – міжкристалічний. Превуальюючим для ГТП, безумовно, є руйнування за границями зерен – міжзерновий скол для ГТП на основі оксидів та карбідів тугоплавких елементів (Al_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 , WC , TiC , $TiNC$) і міжзерновий ямочний відрив для самофлюсуєчих ГТП на основі системи $Ni-Cr-B-Si-C$.

В рамках моделі Зінера–Стро–Петча розглянемо початковий етап зародження мікротріщини у структурі бар'єра (рис. 1).



Рис. 1. Схема зародження мікротріщини.

Для цього необхідно накопичення біля границі частинки n дислокацій. Приблизно можна встановити, що

$$n \approx \frac{\sigma_{теор}}{\sigma_{пл}}, \quad (4)$$

де $\sigma_{теор}$, $\sigma_{пл}$ – теоретична міцність і межа плинності матеріалу покриття.

Діючі дотичні напруження при досягненні певної величини можуть призвести до зародження мікротріщини у голові накопичених дислокацій. Величину напружень визначимо так:

$$\tau = \sqrt{\pi \cdot \sigma \cdot \gamma_1 / [2 \cdot (1 - \nu) \cdot L]}, \quad (5)$$

де γ_1 – робота утворення одиниці вільної поверхні мікротріщини; L – довжина лінії сковзання; σ – модуль зсуву матеріалу покриття.

В покритті необхідне для утворення мікротріщини напруження τ буде залежати від фракційності порошкового матеріалу, тобто розмір частинки визначатиме довжину L накопичення дислокацій. Деякий час зародок мікротріщини може бути механічно стабільним. Локальна пружна енергія одиниці об'єму біля дислокації пропорційна квадрату вектора Бюргерса [7], і якщо вектор Бюргерса збільшиться за кількістю дислокацій в n разів, то пружна енергія збільшиться в n^2 разів. Складається ситуація, коли зародження мікротріщини є єдино можливим варіантом для зменшення локальної енергії, так як сковзання та двійкування неможливі. Характер зародження може здійснюватись як за згаданою вище моделлю Зінера–Стро–Петча, так і за моделям Коттрела або Владимірова–Хананкова (термофлуктаційна модель) [7]. Початкова стадія руйнування пов'язана з взаємодією одноіменних дислокацій у загальмованих накопиченнях. Розкриття мікротріщини в ядрі дислокацій залежить від тиску розщеплення ядра дислокації, що визначається станом матеріалу покриття: у квазікрихких самофлюсуючих ГПП характерним є уширення дислокацій в площині сковзання. А у крихких керамічних ГПП розколювання ядра дислокацій здійснюється перпендикулярно площині сковзання.

На рис. 2 представлена схема ядра авангардної дислокації як субмікротріщини у квазікрихкому матеріалі покриття. Утворення субмікротріщини (10^{-1} мкм) є результатом втрати стійкості рівноваги авангардної частини дислокаційного накопичення. Ядра таких дислокацій в даній ситуації ще є звичайними ядрами граточних дислокацій, але їх побудова характеризується клиновидними порожнинами з взаємодіючими берегами. Описання таких ядер може здійснюватись розподіленнями нескінченно малих розколюючих дислокацій з щільністю $Q_i(y)$, де y є ординатою (висотою) порожнини. Згідно з даними [8], лінеаризуємо нелінійний закон міжплощинної взаємодії $q_a = q_a(u_a)$ (рис. 3), де q_a – віднесена до одиниці площі сила взаємодії різних атомних площин S_1 і S_2 по обидва боки від площини розколювання дислокації; U_a – збільшення відстані між атомними площинами, у порівнянні зі станом стійкої рівноваги.

В результаті лінеаризації замінимо наближеною залежністю (пунктирна лінія) нелінійний закон (суцільна лінія). Точка перелому A характеризує максимальну силу взаємодії реальних атомних площин S_1 і S_2 на відстані $a + u_m$, де a – міжатомна відстань. У цьому випадку ділянка між S_1 і S_2 вважається заповненою пружним середовищем на ділянці $y \leq -h$, де $u_a \leq u_m$. Що стосується ділянки $u_a > u_m$, то в цій області континуума матиме місце розрізу (субмікротріщина), береги якого стягуються зусиллям $q_a(u_a)$ на відстані $-h \leq y \leq 0$. Пропонується наближено представити функцію $q_a(u_a)$ у параметричному вигляді таким лінійним співвідношенням:

$$q_a(u_a) = q_0 + (q_m - q_0) \cdot y / h, \quad (6)$$

де q_0 – додаткова силова характеристика ядра дислокації, що встановлюється в залежності від рівня енергії дислокації.

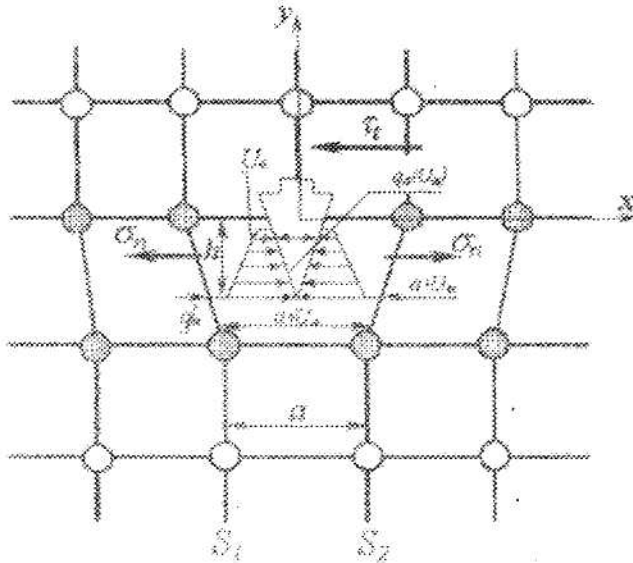


Рис. 2. Схема утворення субмікротріщини:
 ○ – звичайне розташування атомів;
 ⊙ – уширені атоми у площині ковзання

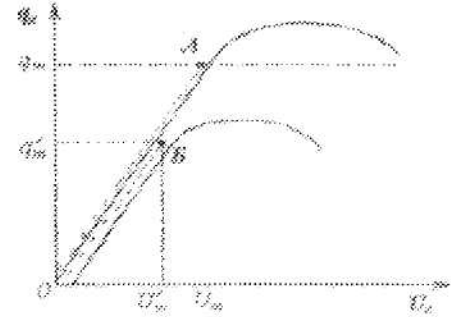


Рис. 3. Графік зміни сил зчеплення між суміжними площинами кристалічної ґратки

3. ЗНИЖЕННЯ УШКОДЖУВАНOSTI ГТП

Рівень внутрішніх залишкових макронапружень σ_n^z безпосередньо формує нормальні напруження розтягу σ_n (рис. 2). При цьому еволюція дислокаційної структури залежить від умов формування ГТП (зіступання) і від термосилового режиму механічної обробки. Останній процес інтенсифікує пластичну деформацію та сприяє підвищенню σ_n^z . Рівень ушкодженості підвищується. Якщо використовувати комбінований метод обробки, накладаючи на процес різання ультразвукові коливання, то відбуваються позитивні зміни не тільки у напруженому стані ГТП, а й у дислокаційній структурі. Ультразвукові коливання елементів технологічної системи при різанні здійснюють вплив, що є аналогічним до термообробки [5, 6], на матеріал покриття, тільки з більшою ефективністю завдяки концентрованому поглинанню акустичної енергії дефектами структури ГТП. Пластичність матеріалу при цьому підвищується, а напруженість – зменшується. Це пояснюється дислокаційним поглинанням енергії ультразвукових коливань. Загальмовані біля локальних перешкод та бар'єрів дислокації активізуються і починають рухатись. У звичайних умовах статичного різання можуть рухатись тільки вільні незагальмовані дислокації, що потребують для своєї активізації удвічі або утричі менше енергії, ніж загальмовані. Активація загальмованих дислокацій є зворотньою і відбувається до моменту, коли є приток акустичної енергії. Таким чином, процес поглинання дислокаціями УЗ-коливань активізує їх рух через структурні перешкоди, а з іншого боку – сприяє їх накопиченню біля міцних перешкод (границя частинки), що інтенсифікує зростання макротріщин. Така небезпека є суто теоретичною, бо, згідно з теорією дислокацій, найбільш імовірним при однаковій витраченій енергії вважається той процес, який здійснюється за найкоротший проміжок часу. Тому енергія УЗ-коливань витрачається в основному на активацію затриманих дислокацій. Щільність дислокацій ρ зменшується від $10^6 \div 10^8 \text{ см}^{-2}$ при звичайному різанні до $10^{11} \div 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при комбінованому методі різання з УЗ-коливаннями [6].

Другий позитивний аспект застосування ультразвуку при різанні – це зміцнення ядра авангардної дислокації у накопиченні за рахунок зменшення сили q_0 (рис. 2, 3). В порівнянні зі статичним різанням, критичне значення сили взаємодії різних атомних площин q_m зменшується до значення q_m при комбінованому методі різання, що відповідає меншій деформації кристалічної ґратки U_m . При достатньому рівні УЗ-енергії субмікротріщини можуть з'єднуватись (заліковуватись) і рівень ушкодженості ГТП буде знижуватись.

Експериментальна перевірка методами рентгеноструктурного та електронікроскопічного аналізу повністю підтвердила ці припущення.

ВИСНОВКИ

Ланцюг технологічних операцій формоутворення, механічної обробки ГТП, та експлуатація відновлених деталей характеризуються зміною НДС. Тому після формоутворення та механічної обробки ГТП необхідно контролювати НДС та вносити корекцію технологічних умов проведення конкретних операцій.

Високий рівень дефектності структури ГТП призводить до ймовірності утворення макро- та мікротріщин. Дислокації, як носії пластичної деформації при зіступанні та стружкоутворенні, є передумовою (при достатній їх щільності) створення таких тріщин.

Ефективним методом механічної обробки ГТП є використання УЗ-коливань при різанні. Така комбінована обробка призводить не тільки до зниження термосилових параметрів процесу, але й знижує рівень ушкоджуваності ГТП шляхом активації дислокацій та "заліковування" субмікротріщин.

Вибір амплітудно-частотної характеристики УЗ-коливань при вібраційному різанні ГТП здійснюється в залежності від характеру реологічної моделі. Контроль НДС можна проводити методом рентгеноструктурного аналізу після кожної технологічної операції з відповідною корекцією режимних факторів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Рыжов Э.В., Клименко С.А., Гуцаленко О.Г. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями. – К.: Наук. думка. – 1994. – 180 с.
2. Клименко С.А., Муковоз Ю.А., Полонский Л.Г., Мельничук П.П. Точение износостойких защитных покрытий. – К.: Техніка. – 1997. – 143 с.
3. Кречмар Э. Напыление металлов, керамики и пластмасс: Пер. с нем. – М.: Машиностроение. – 1966. – 432 с.
4. Хасуй А. Техника напыления: Пер. с японского. – М.: Машиностроение. – 1975. – 288 с.
5. Петров С.В., Карп И.Н. Плазменное газоздушное напыление. – К.: Наук. думка. – 1993. – 495 с.
6. Пилипенко О.М. Вплив ультразвукового різання на рівень ушкоджуваності покриттів. Сб. науч. тр. ОТТОМ. – Харьков: ННЦХФТИ. – 2000. – С. 279–282.
7. Иванова В.С. Разрушение металлов. – М.: Металлургия. – 1979. – С. 167.
8. Панасюк В.В. Механика квазихрупкого разрушения металлов. – К.: Наук. думка. – 1991. – 415 с.

ПИЛИПЕНКО Олександр Михайлович – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютеризованих технологій машинобудування Черкаського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

- механічна обробка газотермічних покриттів;
- абразивна обробка матеріалів.

Подано 10.05.2001