

О.М. Пилипенко, д.т.н., проф.*Черкаський державний технологічний університет*

ОЦІНКА ВНУТРІШНІХ НАПРУЖЕНЬ ПОКРИТТІВ НА АВТОДЕТАЛЯХ

Автомобільні деталі, що інтенсивно зношуються, потребують зміцнення поверхневого шару методами газотермічного напилення тугоплавких композицій. Особливістю експлуатації таких деталей (особливо шатунно-поршневої групи) є циклічні навантаження в умовах високих контактних тисків та підвищеної температури. Тому в роботі досліджуються внутрішні напруження в покриттях, що сформувались на етап їх напилення і наступної механічної обробки. Це дозволить прогнозувати довговічність автодеталей.

Постановка проблеми у загальному вигляді та аналіз існуючих робіт. Перевагою газотермічних покриттів ГТП, порівняно з наплавкою при відновленні автодеталей складної конфігурації, є практична відсутність деформацій. Але внутрішні напруження залишаються досить високими, що може призвести до відшарування або розтріскування покриттів [1, 2]. Основними причинами цього явища є особливості формування покриттів і для термосилових факторів при механічній обробці. У першому випадку хімічні реакції протікають при високих температурах і змінюють кристалічні сингонії матеріалів покриття і основи, а отже змінюють питомі об'єми і щільність окремих фаз, розподілення концентрації по товщині шару є неоднорідним. У другому випадку до високої температури різання приєднується високий тиск у контакті “інструмент–покриття” [3]. Багатофакторний вплив на формування залишкових напружень (ЗН) обумовлює не тільки їх величину і знак, а і нерівномірність розподілу по поперечному перерізу, глибину залягання, величину градієнта напружень [4, 5].

Шар покриття і характер його напруженості впливає на деформацію і руйнування основного матеріалу автодеталі, особливо в умовах знакозмінних навантажень. Зміцнюючий і незміцнюючий ефект покриттів для основного матеріалу залежить від динаміки дислокаційних структур. Якщо в контактній зоні між частинкою напиленого шару і основним матеріалом встановлюються міцні (хімічні) зв'язки, то можлива така їх побудова, що покриття буде сприяти виходу дислокацій на поверхню деталі, або навпаки – перешкоджати цьому процесу. Отже кінцевий варіант розподілення

ЗН після напilenня і механічної обробки буде визначати загальний ресурс експлуатації автодеталей і конкретного агрегату або вузла.

Мета роботи. Враховуючи вищезазначене, метою роботи є експериментальна оцінка характеру і величини ЗН зносостійких покриттів на відновлених автодеталях після напilenня і різних методів механічної обробки – звичайного обточування і комбінованого різання.

Основна частина роботи. Розв’язувати задачу впливу ЗН на адгезію покриттів необхідно у два етапи. На першому етапі експериментально або теоретично визначити ЗН, які виникають всередині частинки або всього покриття, а потім, на другому етапі, оцінити вплив цих напружень на напруження, що діють в зоні крайового ефекта. Визначення умов формування ЗН у зоні крайового ефекта є актуальним завданням механіки квазікрихкого руйнування ГТП. На рис. 1 показані умови реалізації крайового ефекта.

Внутрішні ЗН, що локалізуються на межі розподілу біля краю покриття (т. О), розкладаються на нормальні $\sigma_{вн}^N$ і дотичні $\sigma_{вн}^\tau$. Відповідно на покриття діятимуть сили F_N і F_τ , які визначатимуться так:

$$F_N = \sigma_{вн}^N \cdot \varrho \cdot h; F_\tau = \sigma_{вн}^\tau \cdot \varrho \cdot h; \tag{1}$$

де ϱ і h – ширина і товщина покриття.

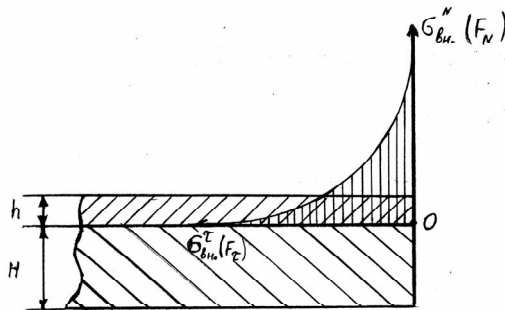


Рис.1. Схема формування крайових адгезійних зусиль

Під дією сили F_τ покриття прагне скоротитись уздовж межі розподілу “покриття–основа”, що може призвести до когезійного

руйнування (розтріскування). Співвідношення між когезійною $\sigma_{зч}^k$, адгезійною $\sigma_{зч}^a$ міцністю та $\sigma_{вн}^r$ розглядались у роботі [6].

З аналізу рис. 1 видно, що дотичні напруження $\sigma_{вн}^r$ мають максимальні значення на краю покриття, а в його середині вони зменшуються до нуля. Максимальну товщину покриття, при якій здійснюється крайовий ефект, можна визначити через роботу і енергію утворення вільних поверхонь. Загальна робота при роз'єднанні покриття і основи буде дорівнювати сумі поверхневих натяжін двох поверхонь, що контактують. Робота, що здійснюється під дією внутрішніх напружень, може розраховуватись за формулою:

$$A_{вн} = \frac{\sigma_{вн}^2}{2E_p} \cdot S \cdot h; \quad (2)$$

де S – площа фактичного контакту покриття і основи; h – товщина покриття.

Рівновісна робота адгезії, що направлена на подолання адгезійної взаємодії контактних тіл, визначиться так:

$$A_a = 2\sigma_{Т.Г} \cdot S; \quad (3) \quad \text{де } \sigma_{Т.Г} -$$

поверхнєве натяжіння матеріалу покриття.

З наведених рівнянь 2 і 3 можна розрахувати максимальну товщину покриття.

Результати розрахунків з деякими спрощеннями стосовно анізотропії показують складний характер напружень σ_z у крайовій зоні [7, 8]. При дії залишкових напружень в центральній зоні на краю плоского зразка з покриттям напруження прагнуть розшарувати систему. Якщо в основній частині формуються зтискаючі ЗН $\sigma_x^{(N)}(z)$, то σ_z будуть розтягуючими (відшаровуючими), а у випадках, коли утворюються розтягуючі ЗН $\sigma_x^{(N)}(z)$, σ_z будуть зтискаючими. Такий функціональний зв'язок між ЗН в центральній частині системи і нормальними напруженнями в крайовій зоні визначає результуючі напруження. Основні зтискаючі напруження позитивно впливають на експлуатаційні характеристики деталей з ГТП. Але такі напруження в зоні крайового ефекта можуть призводити до розшарування.

Експериментальна перевірка правдивості представлених залежностей ЗН у покриттях здійснювалась у такий спосіб. Як зразки для досліджень використовувались кільця зі сталі 45 розмірами $\varnothing 82 \times \varnothing 76 \times 15$ мм з напиленими, оплавленими і обробленими

покриттями. Досліджувались плазмодугові покриття, отримані з самофлюсівних порошків марок ПГ-СРЗ і СНГН-50, що мали мікротвердість поверхневого шару HV_{100} 3,1÷3,4ГПа і HV_{100} 3,6÷3,9ГПа відповідно. Лезову обробку здійснювали звичайним і вібротехнічним методами киборитовим різцем на таких режимах: ПГ-СРЗ – $t = 0,15$ мм; $S = 0,05$ мм/об.; $V = 1,25$ м/с; $f = 20$ кГц; $2A = 0,15$ мкм. СНГН-50 – $t = 0,12$ мм; $S = 0,05$ мм/об.; $V = 0,81$ м/с; $f = 18$ кГц; $2A = 0,15$ мкм.

Залишкові напруження у покриттях у стані постачання і після різних варіантів обробки оцінювались опосередкованим методом по кривій деформації зразка (рис. 1) при зчавленні поверхневого шару покриття. Криву деформації будували за результатами вимірювання товщини зчавленого шару h_i і величини зазора Δb_i у місці розрізу зразка після кожного зчавлення. Величини Δb_i визначали за залежністю $\Delta b_i = b_i - b_0$, де b_i – величина зазора в місці розрізу зразка після чергового зчавлення шару покриття товщиною h_i і b_0 – величина зазора в місці розрізу зразка до початку зчавлення шару покриття. Знак залишкових напружень визначався за напрямком зміни величини зазора b_i .

Зменшення зазора b після чергового зчавлювання свідчить про наявність у зчавленому шарі покриття залишкових напружень розтягнення, збільшення зазора – про наявність залишкових напружень стиснення. Величину зазора b_0 і b_i вимірювали на інструментальному мікроскопі моделі ІМЦ-100х50А. Точність вимірювання складала 0,005 мм. Товщину зчавленого шару вимірювали в 12-ти різних точках зразка за допомогою різьбового мікрометра з точністю 0,01 мм, на якому встановлювали спеціальні губки. Електрохімічне зчавлювання покриттів здійснювалось у 70 %-му водному розчині H_2SO_4 . Температура електроліта не перевищувала 30 °С, струм у ланцюгу підтримувався в діапазоні 3,0÷3,5 А, а напруга – 2,0÷2,5 В. Внутрішню і торцеві поверхні зразка захищали від зчавлювання кислотостійким хлорвініловим лаком ХВЛ-21.

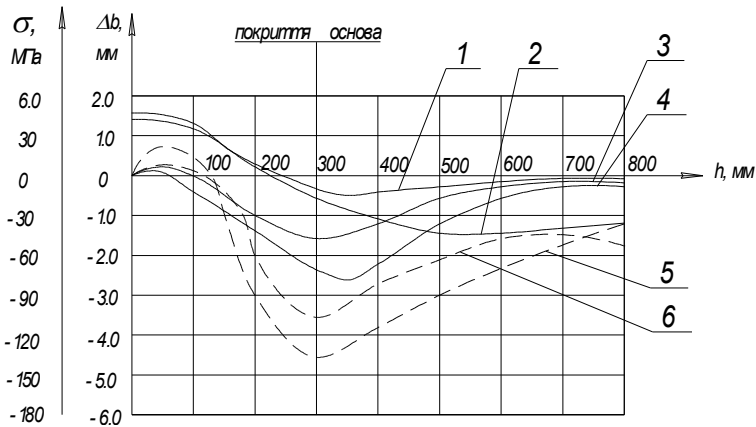


Рис. 1. Залежність розподілення залишкових напружень від глибини залягання: 1, 2 – покриття СНГН-50 і ПГ-СРЗ після звичайного точіння; 3, 4 – покриття СНГН-50 і ПГ-СРЗ після вібромеханічного точіння; 5, 6 – покриття СНГН-50 і ПГ-СРЗ без механічної обробки

З метою оцінки залишкових напружень у МПа та для можливості їх порівняння з адгезійною міцністю здійснено розрахунок значень σ_a за формулою Н.С. Колева [55], зкоректованою з урахуванням особливостей структури плазмоводугових покриттів:

$$\sigma_a = \frac{4E_1 \cdot \Delta\varepsilon(H - h)^2}{3l^2 \cdot \delta \cdot n} - \frac{4E_2}{l^2}(H + 2h + \delta) \cdot \varepsilon \cdot \Pi, \quad (4)$$

де ε – сумарна деформація розрізаного зразка, мм; H – вихідна товщина зразка, мм; h – сумарна товщина зчавлюваного шару, мм; $\Delta\varepsilon$ – деформація при одношаровому зчавлюванні, мм; δ – товщина зчавлювальних шарів, мм; l – довжина зчавлюваної поверхні зразка, мм; E_1 і E_2 – модулі пружності основного матеріалу і матеріалу покриття, ГПа; n – кількість шарів при цикловому напиленні; Π – поруватість покриття.

Незалежно від стану, покриття СНГН-50 через більш високу мікротвердість має вищий рівень ЗН порівняно з покриттям ПГ-СРЗ, що підтверджує положення фізики твердого тіла про фундаментальний зв'язок твердості й міцності. У тонкому приповерхневому шарі покриттів ($h_1 < 100$ мкм) після звичайного точіння мають місце ЗН-розтягнення. Їх формування пояснюється умовами пластичної деформації при стружкоутворенні – деформаціями зсуву і стиснення.

При звичайному різанні інструментом з від'ємним переднім кутком відбувається інтенсивне розтягнення підрізцевого шару покриття і утворення зони розтягуючих напружень. Але на цей процес накладається явище ущільнення підрізцевого шару від дії ЗПІ як "штампа". Таке нашарування двох механізмів пластичної деформації може давати остаточно або ЗН-розтягнення, або ЗН-стиснення. Після вібромеханічного методу точіння превалюють стискаючі зусилля і формуються позитивні ЗН стиснення.

Взаємодія адгезійної міцності та σ_v визначає, в кінцевому рахунку, роботоздатність покриття. На рис. 1 криві 5 і 6 характеризують рівень внутрішніх ЗН, що виникають через зіступання при охолодженні напилених частинок. Для досліджуваних покриттів внутрішні ЗН тільки в діапазоні товщин покриття 200–350 мкм незначно перевищують адгезію, що є цілком безпечним для експлуатації деталей з покриттями. Зіступання самофлюсівних покриттів характеризується коефіцієнтом $K_3 = (V_1 - V_2)100 / V_2$, %, де V_1 – об'єм розплавленої частинки в момент її контакту з поверхнею відновлюваної деталі; V_2 – об'єм частинки після охолодження. Коефіцієнт K_3 для самофлюсівних покриттів – 0,9 % [9] і має декілька компонентів: зіступання, що визначається термічним процесом – K_3^T ; зіступання, що визначає кристалізацію та фрагментування частинок, – K_3^{Φ} ; від'ємне зіступання, що визначається релаксаційними процесами – K_3^P .

Після звичайного точіння покриттів кіборитовим інструментом ЗН стиснення на глибині залягання 300 мкм мають максимальні значення, які можуть призвести до руйнування матеріалу покриття (особливо на ділянці дії крайового ефекту). Накладання високочастотних коливань знижує максимальні значення σ_v , порівняно зі звичайним точінням, на 40–43 %, що є навіть нижчим за максимальний рівень ЗН після формоутворення покриття. Застосування інших методів зменшення σ_v є неефективним або недоцільним. Так, введення в склад порошку для напилення різних пластифікаторів погіршує фізико-механічні властивості покриття, або пластифікатор взагалі вигорає у високотемпературному струмені плазми. Використання багатшарових покриттів з метою взаємокомпенсації ЗН не завжди є економічно доцільним.

Висновки. Експериментальна перевірка існуючих теоретичних залежностей термонапруженого стану покриттів підтвердила їх відповідність фізичній моделі й дозволила встановити остаточний характер залишкових напружень після вібромеханічного методу обробки – це стійкі залишкові напруження стиснення на глибині залягання 250÷350 мкм. Порівняно зі звичайним різанням,

максимальні значення залишкових напружень знижуються на 40÷43 %, що є навіть нижчим за їх максимальний рівень після формоутворення покриття.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Барвинок В.А.* Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
2. *Подстригач Я.С., Шевчук П.Р.* Температурные поля и напряжения в телах с тонкими покрытиями // Тепловые напряжения в элементах конструкций. – 1967. – Вып. 7. – С. 227–233.
3. *Пилипенко О.М.* Комбінована обробка газотермічних покриттів // Сучасні процеси механічної обробки інструментами з НТМ та якість поверхні деталей машин / Серія Г. – Київ: ІНМ НАНУ, 2001. – С. 97–107.
4. *Анельчик Д.Е., Сазанов И.П., Мироненко С.В.* Механизм дефектообразования в поверхностном слое деталей с покрытием при шлифовании // Сверхтвердые материалы. – 1993. – № 4. – С. 46–52.
5. *Пилипенко А.М., Мироненко В.В., Юрченко Ю.Д.* Остаточные напряжения в плазменных покрытиях после шлифования // Сверхтвердые материалы. – 1993. – № 4. – С. 40–42.
6. *Пилипенко А.М.* Остаточные напряжения в покрытиях после алмазного шлифования // Сверхтвердые материалы. – 1993. – № 4. – С. 22–24.
7. *Бартнев С.С., Федько Ю.П., Григорьев А.И.* Детонационные покрытия в машиностроении. – Л.: Машиностроение (Ленинград. отд.), 1982. – 215 с.
8. *Хижняк В.Г., Долгих В.Ю., Король В.И.* Технологія нанесення та властивості карбідних покриттів на основі металів перехідної групи. – Харків: ННЦ ХФТІ, Доп. ОТГОМ–2. – Ч. 2. – С. 99–103.
9. *Петров С.В., Карп И.Н.* Плазменное газоздушное напыление. – Киев: Наук. думка, 1993. – 495 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 22.08.2007