

УДК 621.793.620.172

DOI: 10.18372/0370-2197.2(99).17630

О. В. ЛОПАТА

*Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Україна***ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ ПРИ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНІЙ ОБРОБЦІ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ІЗ ГАЗОТЕРМІЧНИМИ ПОКРИТТЯМИ**

У статті, виходячи з принципу еквівалентних напружень адгезійного зв'язку, проведена оцінка залишкових напружень в газотермічному покритті. Для цього використано графічне диференціювання експериментальної залежності адгезійної міцності від товщини покриття. Встановлено функціональний зв'язок між адгезійною міцністю, товщиною покриття, критичною деформацією основи та залишковими напруженнями. Це дозволяє обирати параметри поверхонь деталей із газотермічними покриттями при їх проектуванні, створенні та експлуатації.

Ключові слова: газотермічні покриття, залишкові напруження, адгезійна міцність, товщина покриттів, критична деформація, еквівалентні напруження

Вступ. На відміну від більшості покриттів, покриття, отримані методами газотермічного напилення з послідуною електроконтактною обробкою [1], характеризуються товщинами до 3 мм і адгезійною міцністю до 200 МПа. Напруження в покритті можуть виникати як наслідком технології нанесення (залишкові напруження), так і виникати в результаті експлуатаційного навантаження [1]. З аналізу роботи визначено, що найбільш виражена форма прояву залишкових напружень це залежність міцності зчеплення $\tau_{зч}$ від товщини покриття h . Як правило, залишкові напруження не дозволяють збільшити товщину покриттів до необхідного розміру [1]. Критична товщина покриття обмежена та залежить від номінальної міцності зчеплення [2].

Метою роботи є визначення залишкових напружень у покриттях, отриманих методом газотермічного напилення з послідуною електроконтактною обробкою, а також обґрунтування високої адгезійної міцності поверхонь деталей з газотермічними покриттями після їх електроконтактної обробки в умовах спільної дії експлуатаційних та залишкових напружень.

Стан питання. Залишкові напруження визначають властивості деталей з покриттями: їх міцність втоми, міцність зчеплення покриття з поверхнею деталі, критичні деформації деталі. Однак не зустрічаються відомості про порівняльну ефективність цих властивостей або їх еквівалентність, а також роль адгезійної міцності в їх співвідношенні. З аналізу роботи [1-3] випливає, що найбільш виражена форма прояву залишкових напружень це залежність міцності зчеплення $\tau_{зч}$ від товщини покриття h . Зниження міцності зчеплення $\tau_{зч}$ із зростанням товщини покриття h аж до мимовільного відшарування властиве газотермічним покриттям [2, 3]. Зазначено [1, 2], що тонкі покриття з високим рівнем залишкових напружень не відшаровуються, у той час як відшарування товстих покриттів спостерігається при нижчому рівні залишкових напружень. Як правило, залишкові напруження не дозволяють збільшити товщину покриттів до необхідного розміру. Критична товщина покриття обмежена та залежить від номінальної міцності зчеплення [2]. Залежність міцності зчеплення від товщини пояснюється тим, що пружні напруження зменшують міцність утримання

покриття. Методами фотопружності показано зростання дотичних напружень в поверхні адгезійного зв'язку зі збільшенням товщини [2]. Проаналізовано [3] два випадки відшарування покриття від основи: за рахунок деформування основи зовнішнім навантаженням та за рахунок зростання товщини покриття. Залежність міцності адгезійного зв'язку від деформації поверхні деталі у першому випадку і від товщини покриття у другому – ідентичні (рис. 1).

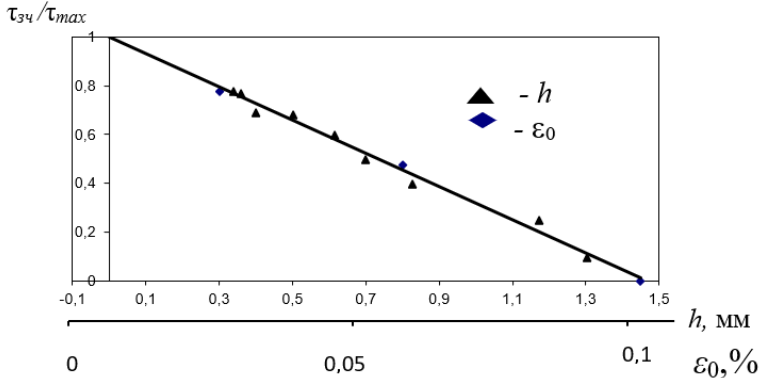


Рис. 1. Відносна міцність адгезійного зв'язку від деформації поверхні деталі ε_0 (\blacklozenge) при її розтягуванні основи та від товщини покриття h (\blacktriangle) при дії в покритті тільки залишкових напружень

Звідси можна зробити висновок про еквівалентність навантаження адгезійного зв'язку. На відміну від більшості покриттів, покриття, отримані методом газотермічного напилення із послідуною електроконтактною обробкою [1] характеризуються товщинами до 3 мм і адгезійною міцністю до 200 МПа.

Експериментальні дослідження. Електроконтактна обробка газотермічних покриттів є інтенсивним процесом, що протікає в порівняно малому обсязі. Наявність концентрованого джерела тепла, температура якого близька до температури плавлення металу покриття, тиск, висока швидкість нагріву приводять до структурних змін і пружно-пластичних деформацій, як у покриттях, так і в самих деталях. Це створює умови для виникнення залишкових напружень, епюра яких залежить від розташування зони зміцнення, її форми та розмірів. Рентгеноструктурним аналізом була встановлена величина залишкових напружень, яка суттєво залежить від тиску електроконтактної обробки та від самого процесу. Збільшення тиску при обробці газотермічних покриттів призводить до зниження залишкових напружень більш ніж у 2 рази. Реальні тиски, які доцільно прикладати не дозволяють суттєво знизити залишкові напруження, величина яких зберігається в межах 800...1000 МПа, що призводить до утворення тріщин та зсувів у покриттях. Застосування нагріву поступово при електроконтактній обробці дозволяє знизити значення залишкових напружень до величин 270... 300 МПа, що пояснюється рівномірним прогріванням напиленого шару по перерізу і відсутністю ділянок з локальним підвищенням температури. Аналіз епюр залишкових напружень у поздовжньому перерізі деталі показує, що максимальні напруження розтягу спостерігаються в центральній частині і знижуються до країв деталі. Напруження, що діють поперек покриття при наближенні до торців знижуються і переходять в стискаючі напруження. При цьому максимальні стискаючі напруження спостерігається по краях поверхні деталі, на яку наноситься покриття. У поперечному перерізі деталі максимальні

напруження розтягу зафіксовані безпосередньо біля межі зони зміцнення. У міру віддалення від неї напруження знижуються і переходять у напруження стиску. Поздовжні напруження розтягу мають максимальні значення в покритті, а мінімальні - в центральній частині поверхні деталі, на яку нанесене покриття. Таким чином, як у покритті, так і в зоні з'єднання його з деталлю (включаючи зону термічного впливу) діють напруження розтягу. Це можна пояснити тим, що в поверхні деталі з покриттям залишкові напруження формуються під впливом наступних трьох чинників:

- в результаті нерівномірного нагріву виникають неоднорідні пластичні деформації, в результаті яких у покритті і зоні його з'єднання з поверхнею деталі можуть виникати залишкові напруження розтягу, які врівноважуються до центру деталі і переходять в стискаючі напруження;

- висока швидкість охолодження в шарі покриття та в зоні термічного впливу викликає структурні зміни, що ведуть до виникнення напружень розтягу в центральній частині деталі, які знижуються у напрямку її торців;

- відмінність коефіцієнтів термічного розширення деталі та покриття також призводить до появи залишкових напружень. Встановлено, що напруження в газотермічному покритті при його обробці електроконтактним методом визначаються не лише температурними градієнтами та лінійними деформаціями, а й співвідношеннями фізико-механічних властивостей та розмірами покриття й деталі. Це дозволяє припустити, що знизити залишкові напруження можна такими способами:

 - шляхом узгодження властивостей матеріалів покриття й деталі;

 - зменшенням впливу об'ємних змін структурних перетворень вихідних матеріалів при нагріванні та охолодженні;

 - створенням при нанесенні покриття змінного температурного поля та регульованого охолодження;

 - формуванням між покриттям та поверхнею деталі проміжного шару з високопластичних матеріалів;

 - зниження всіх видів напружень у покритті за рахунок оптимального вибору величини поверхні деталі, на яку наноситься покриття.

При використанні електроконтактної обробки після газотермічного напилення покриттів отримані позитивні результати: величина залишкових напружень не перевищує 200 МПа; деталі з газотермічними покриттями, що пройшли електроконтактну обробку, характеризуються плавною зміною твердості від покриття до поверхні деталі та збільшеною дифузійною зоною. Таким чином, величина тиску і технологічна схема процесу електроконтактної обробки істотно впливають на рівень залишкових напружень і міцність зчеплення покриттів. З цієї точки зору перевагу слід віддати нанесенню покриттів газотермічним напиленням із послідувальною електроконтактною обробкою з поступовим збільшення температури та тиску процесу.

Визначення залишкових напружень газотермічних покриттів після електроконтактної обробки шляхом графічного диференціювання. З критерію рівномірності [1], замінивши когезійну міцність, викликану деформацією поверхні деталі еквівалентним залишковим напруженням $\sigma_{\text{зал}}$, можна отримати критичну товщину покриття $h_{\text{кр}}$ під дією залишкових напружень з умови самовідшарування

$$h_{кр} = \frac{\tau_{зч}}{\sigma_n^{зал}} \frac{1}{kthkl} \quad (1)$$

Тут $\tau_{зч}$ – міцність адгезійного зв'язку; $2l$ – базовий розмір; k - коефіцієнт, що залежить від співвідношення пружних та геометричних параметрів поверхні деталі з покриттям

$$k^2 = 2 \frac{G_\delta G_n}{G_\delta h_n + G_n H_\delta} \left(\frac{1}{E_n h_n} + \frac{1}{E_\delta H_\delta} \right),$$

де H_δ , h_n – напівтовщина деталі та покриття, E_δ , E_n , G_n , G_δ - модулі пружності першого та другого роду матеріалів деталі та покриття.

Звідси випливає, що, якщо зі зростанням товщини покриття, залишкові напруження зростають або залишаються на тому ж рівні, спостерігатиметься самовідшарування покриття. Саме це обмежує можливість застосування покриттів великої товщини. Записав вираз (1) як:

$$\sigma_n^{зал} = \frac{\tau_{зч}}{h} \frac{1}{kthkl} \quad (2)$$

можна зробити висновок про те, що залишкові напруження в покритті характеризуються тангенсом кута нахилу експериментальної кривої залежності міцності зчеплення при зсуві від товщини покриття. Проаналізуємо залежність $\tau_{зч} = f(h)$ (рис. 2) для покриття з композиційного порошку КХН-30, отриманого методом газотермічного наплення з послідуною електроконтактною обробкою ($E = 2,4 \cdot 10^5$ МПа, $G = 0,94 \cdot 10^5$ МПа), нанесеного на поверхню деталі із сталі 45. Режими формування покриття: сила струму $I = 10$ кА; час імпульсу струму $t_i = 0,04$ с; час паузи $t_{п} = 0,04$ с; тиск $P = 40$ МПа. Аналіз експериментальної залежності показує, що для покриття спостерігається стабілізація міцності адгезійного зв'язку зі зростанням його товщини.

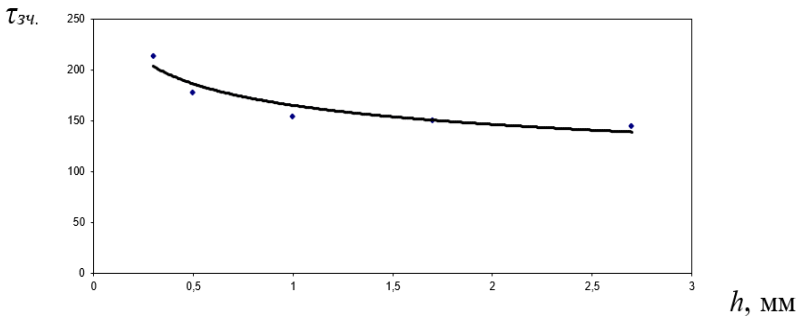


Рис. 2. Залежність адгезійної міцності від товщини покриття з композиційного порошку КХН-30, отриманого методом газотермічного наплення з послідуною електроконтактною обробкою

Застосування методу графічного диференціювання залежності $\tau_{зч} = f(h)$ з урахуванням коефіцієнту $1/kthkl$ дозволяє оцінити рівень залишкових напружень у покритті та показати, що зростання товщини покриття призводить до зниження середнього значення залишкових напружень аж до асимптотичного мінімального значення (рис. 3).

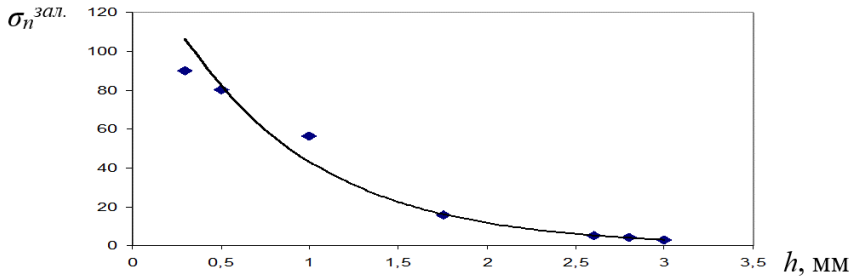


Рис. 3. Залежність залишкових напружень від товщини покриття композиційного порошку КХН - 30, отриманого методом газотермічного напилення з послідувочою електроконтактною обробкою

Аналіз здатності навантаження системи «основа-покриття» з принципу еквівалентності навантаження адгезійного зв'язку. В умовах експлуатації, наприклад, при розтягуванні основи у виразі (1) $\sigma_n^{\text{зал.}}$ має бути замінено ефективною напругою σ_n^{ef} , що є сумою залишкових $\sigma_n^{\text{зал.}}$ та експлуатаційних $\sigma_n^{\text{експ}}$ напружень у покритті.

$$h = \frac{\tau_{34}}{\sigma_n^{\text{ef}}} \frac{1}{kthkl} \quad (3)$$

$$\sigma_n^{\text{ef}} = \sigma_n^{\text{зал}} + \sigma_n^{\text{експ}} \quad (4)$$

$$\sigma_n^{\text{експ}} = E_n \varepsilon_{\delta}^{\text{кр}} \quad (5)$$

де $\varepsilon_{\delta}^{\text{кр}}$ – критична деформація основи, що відповідає відшарування покриття під дією експлуатаційного навантаження. З урахуванням (4), (5), вираз (3):

$$h = \frac{\tau_{34}}{(E_n \varepsilon_{\delta}^{\text{кр}} + \sigma_n^{\text{зал}})} \frac{1}{kthkl} \quad (6)$$

Звідки можна записати:

$$\varepsilon_{\delta}^{\text{кр}} = \frac{\tau_{34}}{E_n h kthkl} - \frac{\sigma_n^{\text{зал}}}{E_n} \quad (7)$$

Вираз (7) призводить до висновку, що після електроконтактною обробки газотермічних покриттів зі зростанням їх товщини знижуються залишкові напруження, тому обробка електроконтактним методом дозволяє наносити газотермічні покриття товщиною до 3 мм і більше з одночасним підвищенням можливої критичної деформації поверхні деталі. Таким чином, можна збільшити здатність навантаження деталі з покриттям без ризику відшарування покриття.

Для розрахунку несучої здатності поверхонь деталей машин з покриттям на стадії виробництва та відновлення зношених деталей необхідно враховувати такі обставини:

– більшість покриттів, у тому числі й нанесені газотермічним напиленням із послідувочою електроконтактною обробкою, потребують фінішної обробки для забезпечення необхідної чистоти поверхні та розмірів деталі. Тому у товщині покриття h необхідно передбачити припуск на фінішну обробку [4];

– для чистового точення деталі з покриттям рівень адгезійної міцності має забезпечити можливість обробки без відшарування покриття. Тому адгезійна міцність повинна мати запас, величина якого визначається режимами та умовами чистової обробки. Для вибору оптимального співвідношення ε_0 , $\tau_{зч}$, та h на рис. 4 наведено їх залежності, розраховані за рівнянням (7) з урахуванням залишкових напружень. Криві 1, 2 та 3 побудовані для різних фіксованих значень $\tau_{зч}$. Крива 4 отримана на основі експериментальної залежності з урахуванням залишкових напружень.

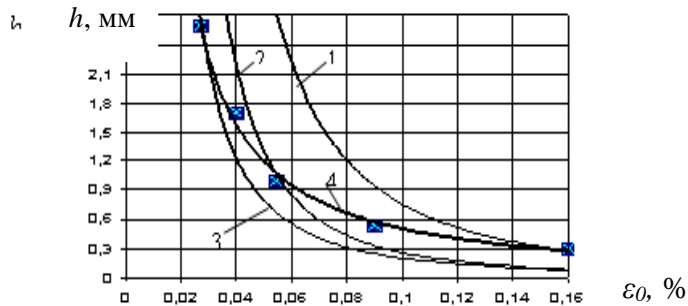


Рис. 4. Граничний стан поверхні деталі з покриттям: 1 – $\tau_{зч} = 200$ МПа; 2 – $\tau_{зч} = 155$ МПа; 3 – $\tau_{зч} = 135$ МПа; 4 – на підставі експериментальної залежності (рис. 1)

Висновки. Методом графічного диференціювання експериментальної залежності адгезійної міцності від товщини покриття визначено залишкові напруження в покриттях, отриманих газотермічним напиленням із послідуною електроконтактною обробкою. За принципом еквівалентності залишкових напружень та критичної деформації деталі при відшаруванні покриття встановлено функціональний зв'язок адгезійної міцності, товщини покриття, критичної деформації деталі та залишкових напружень. Ця залежність дозволяє визначити характеристики деталей з покриттям для умов їх експлуатації.

Список літератури

1. Ляшенко Б.А., Сорока Е.Б. Особенности высокочастотного нагружения материалов с покрытиями. Проблемы прочности, №5, 134 -138, (1998).
2. Ляшенко Б.А. О критериях когезионно-адгезионной равнопрочности и термостойкости защитных покрытий. Проблемы прочности. №10, 114-116. (1980).
3. Смирнов І.В., Лопата О.В., Зіньковський А.П., Кобзарь В.Л. Адгезійна міцність та залишкові напруження в покриттях, отриманих електроконтактним методом Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: матеріали X міжнародної науково-практичної конференції (26-27 травня 2022 р. ЧНУ «Чернігівська політехніка, м. Чернігів). Чернігів: Ч. 2, 52-55, (2022).
4. Клименко С.А., Муковоз Ю.А., Полонский Л.Г. и др. Точение износостойких защитных покрытий. Киев, «Техніка», 146 с., (1997).

Стаття надійшла до редакції 01.06.2023.

Лопата Олександр Віталійович – аспірант кафедри зварювального виробництва Інституту матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона, Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», вул. Дашавська, 6/2, навчальний корпус 23, м. Київ, Україна, 03056, тел.: +38 044 204 82 40, E-mail: lopata-sasha@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5266-6486>.

A. V. LOPATA

INFLUENCE OF GAS THERMAL PROCESS PARAMETERS SPRAYING OF COATINGS FOR THEIR WEAR RESISTANCE AND ADHESION STRENGTH

On principle of equivalent tensions of adhesive connection, the estimation of remaining tensions is conducted in coverage. For this purpose, graphic differentiation of experimental dependence of adhesive durability is utilized from the thickness of coverage. Functional connection is set between adhesive durability, thickness of coverage, critical deformation of basis and remaining tensions. It allows choosing the parameter. When using electrical contact treatment after gas-thermal spraying of coatings, positive results were obtained: the value of residual stresses does not exceed 200 MPa; parts with gas-thermal coatings that have undergone electrocontact treatment are characterized by a smooth change in hardness from the coating to the surface of the part and an increased diffusion zones of the system «basis-coverage» at finish treatment and exploitation. The amount of pressure and the technological scheme of the electrical contact treatment process significantly affect the level of residual stresses and the adhesion strength of the coatings. From this point of view, preference should be given to the application of coatings by gas-thermal spraying with subsequent electrical contact treatment with a gradual increase in temperature and pressure of the process.

The method of graphic differentiation of the experimental dependence of the adhesive strength on the thickness of the coating was used to determine the residual stresses in the coatings obtained by gas-thermal spraying with subsequent electrical contact treatment. According to the principle of equivalence of residual stresses and critical deformation of the part during peeling of the coating, a functional relationship of adhesive strength, thickness of the coating, critical deformation of the part and residual stresses was established. This dependence allows you to determine the characteristics of coated parts for their operating conditions.

Key words: gas-thermal coatings, residual stresses, adhesive strength, coating thickness, critical deformation, equivalent stresses

Referenses

1. B. Liashenko, E. Soroka Liashenko B.A. Osobennosti vysokochastotnoho nahruzhennya materialov s pokrytiamy. *Problemy prochnosti*. №5, 134 -138, (1998).
2. Liashenko B.A. O kryteriakh kohezyonno-adhezyonnoi rovnoprochnosti y termostoikosti zashchytnykh pokrytyi. *Prblemy prochnosti*. №10, 114-116, (1980).
3. Smirnov I.V., Lopata O.V., Zinkovskyi A.P., Kobzar V.L. Adhesive strength and residual stresses in coatings obtained by the electrocontact method Comprehensive quality assurance of technological processes and systems: materials of the X international scientific and practical conference (May 26-27, 2022, Chernihiv Polytechnic University, Chernihiv). Chernihiv: Ch. 2, 52-55, (2022).
4. Klymenko S.A. Mukovoz Yu.A., Polonskyi L.H. Tochenye yznosostoikykh zashchytntkh pokrytyi, y dr. Kyev, «Tekhnika», 146 s., (1997).

Oleksandr Vitaliyovych Lopata – graduate student of the Department of Welding Production at the E.O. Institute of Materials Science and Welding. Paton, National Technical University of Ukraine "KPI named after Ihor Sikorskyi", str. Dashavska, 6/2, educational building 23, Kyiv, Ukraine, 03056, phone: +38 044 204 82 40, E-mail: lopata-sasha@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5266-6486>.