

МІЦНІСТЬ ЗЧЕПЛЕННЯ ГАЗОТЕРМІЧНОГО ПОРОШКОВОГО ПОКРИТТЯ З ПОВЕРХНЕЮ СТАЛІ 45

Дьяконенко Н.Л.¹, Любченко О.А.²

¹ Харківський національний автомобільно-дорожній університет

² Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Анотація. З огляду на актуальність застосування методу газополуменового напилювання досліджено покриття з порошкового сплаву ПГ-10Н-01 на сталі 45. Установлено залежність міцності зчеплення від товщини покриття і шорсткості поверхні металу. Визначено оптимальні характеристики шорсткості поверхні металу, товщини покриття та міцності зчеплення його з основою для практичного використання.

Ключові слова: газополуменове напилювання, порошок ПГ-10Н-01, сталь 45, товщина покриття, шорсткість, міцність зчеплення.

Вступ

Сучасний розвиток техніки потребує підвищення швидкодії машин і механізмів, що вимагає відповідного покращення зносостійкості промислових матеріалів, зростання за рахунок цього терміну служби деталей машин. Альтернативою розширенню виробництва запасних частин є вторинне використання зношених деталей, відновлюваних у процесі ремонту автомобіля і його агрегатів.

Але в автомобілях і агрегатах після капітального ремонту деталі працюють, як правило, у значно гірших умовах, ніж у нових, що пов'язано із зміною базисних розмірів, зміщенням осей в корпусних деталях, зміною умов завдання мастила та ін. У зв'язку з цим технологія відновлення деталей повинна ґрунтуватися на таких способах нанесення покриттів і подальшого оброблення, які дозволили б не тільки зберегти, але й збільшити ресурс відремонтованих деталей.

Підвищення експлуатаційних показників матеріалів може бути досягнуто шляхом використання методу газополуменового напилювання. Однак, незважаючи на багато переваг, основним недоліком газополуменового способу напилення покриттів є недостатня міцність зчеплення покриттів з основою.

Аналіз публікацій

Технологія газополуменового напилення досить проста, а вартість обладнання і витрати на експлуатацію низькі. У теперішній час найбільше застосування в ремонтній практиці отримали два способи газополуменового напилення [1].

У першому випадку газополуменове напилювання здійснюється подачею порошкоподібного матеріалу в зону полум'я за до-

помогою транспорту газу. Порошок з бункера надходить у пальник, захоплюється потоком газу і на виході із сопла потрапляє в полум'я, де він оплавляється і струменем газів, що горять, спрямовується на напилювальну поверхню. Транспортування порошку до поверхні деталі за допомогою газів, а не стисненого повітря, сприяє зменшенню окислення розплавлених частинок металу і тим самим робить позитивний вплив на властивості нанесеного шару.

У другому випадку процес газополуменового напилення здійснюється подачею порошку безпосередньо в факел полум'я під дією сили тяжіння. З бункера по прямій трубці порошок спрямовується в ацетилено-кисневе полум'я на зріз сопел мундштука. У зоні полум'я порошок частково оплавляється і під дією тиску газів наноситься на зношену поверхню.

Перевага введення порошку за другим способом – простота обладнання. У цьому випадку можна точно регулювати потужність полум'я та місце введення порошку й немає необхідності в транспортувальному газі.

Сутність процесів газотермічного нанесення покриттів полягає у створенні спрямованого потоку дисперсних частинок нанесеного матеріалу, що забезпечує перенесення їх на поверхню виробу та формування шару покриття [1–4]. Для розгону часток застосовують різні високотемпературні газові середовища. Нагрівання напиленого матеріалу проводять для підвищення пластичності й адгезійної здатності частинок. Покриття створюється за рахунок адгезії, що виникає в разі зіткнення частинок на поверхні металу.

Більшість способів газотермічного напилення є універсальними, так як дозволяють

наносити широкий спектр матеріалів. Матеріали для напилення можуть бути у вигляді порошків, дроту, стрижнів. У вигляді порошку можна виготовити практично будь-який напилюваний матеріал. Порошкові матеріали економічно вигідніші, оскільки виготовлення дроту або прутків з твердих і крихких матеріалів вимагає дорогих спеціальних способів. Застосування дрібнодисперсного порошку зазвичай сприяє підвищенню щільності напилюваного покриття. Недолік такого покриття полягає в тому, що в ньому міститься велика кількість оксидів, які утворилися внаслідок перегріву частинок під час руху у високотемпературному потоці газу.

Газополуменеві покриття можна наносити на будь-які сталі та сплави для покращення експлуатаційних властивостей. Доцільно досліджувати покриття на сталі 45, яка найбільш широко поширена в машинобудуванні. Відомо, що в сталі 45 є постійні домішки сірки, фосфору, марганцю, кремнію в незначній кількості та гази (O, N, H) [5, 6].

Для нанесення газополуменевого покриття був обраний порошок, який є сплавом на нікелевій основі ПГ-10Н-01, що сам офлюсується, ТУ 48-4206-156-82. Порошок містить Ni-Cr-B-Si-C-Fe, твердість регулюється вмістом C, B, Cr. Відомо, що такі покриття мають низький коефіцієнт тертя, високу допустиму робочу температуру (до 800°C). Застосування самофлюсуючих сплавів з нікелем утворює покриття з високою адгезією, твердістю і пористістю. Наявність пористості обумовлено тим, що самофлюсуючий сплав не піддається оплавленню, що часто робиться на різних деталях з метою підвищення їх зносостійкості. Самофлюсуючий сплав має дуже широкий температурний інтервал пластифікації, тому без оплавлення дає міцне покриття [7, 8].

Сучасний розвиток методів газополуменевого напилення спостерігається в усьому світі. Проаналізуємо декілька останніх винаходів учених. Пошук патентів проводився за ключовими словами по базах даних.

Зусилля дослідників спрямовані на вдосконалення складу порошкових матеріалів. Запатентована [9] модифікована композиція на основі порошку системи Fe-C-Cr-Al-B для газополуменевого напилення, що містить вуглецю 0,98–1,03 %, хрому 1,5–1,7 %, алюмінію 9,8–10,2 %, бору 5,9–6,3 %, заліза – решта, яка відрізняється тим, що додатково містить 28–32 масових відсотків порошку тетраборнокислового натрію. Пропонується [10] підвищення мікротвердості покриття та адгезійної міцності зчеплення з підложкою за умови газопо-

луменевого напилення шляхом введення додаткових хімічних елементів у вигляді порошків на основі заліза для газополуменевого напилення, які містять вуглець, хром, алюміній та бор.

Надаються [11] також патенти з удосконалення експериментальних методів. Наприклад, спосіб газополуменевого напилення порошковими матеріалами переважно з низькою теплопровідністю, який містить змішування робочих газів, їх подачу з різною швидкістю витікання із сопла пальника, для формування первинного та вторинного факелів, які розташовані співвісно для нагрівання часток.

Аналіз літературних даних [1–4] свідчить, що, незважаючи на велику кількість переваг газополуменевого методу, основним недоліком є недостатня міцність зчеплення покриттів з основою.

Мета і постановка завдання

З огляду на актуальність застосування газополумених покриттів в автомобільній та інших галузях промисловості в роботі ставилася мета – дослідити залежність міцності зчеплення покриття ПГ-10Н-01 і сталі 45 залежно від шорсткості поверхні та від товщини покриття. Визначити оптимальні характеристики нанесеного шару для практичного використання.

Результати досліджень

Міцність зчеплення покриття з основою є однією з найважливіших властивостей композиту, яка позначає силу зв'язку між основним металом і покриттям, віднесено до одиниці площі контакту [12, 13]. Адгезія покриття до основного металу забезпечується переважно механічним зчепленням. Взаємна дифузія і фізичний зв'язок ван-дер-ваальсовими силами слугують доповненням до механічного зчеплення. Це означає, що міцність зчеплення покриття з основою визначається величиною і характером шорсткості поверхні основного металу.

Для підготовки поверхні до нанесення покриття її ретельно очищували, знежирювали уайт-спиритом, осушували. Потім здійснювали дробеструменеве оброблення поверхні. Розміри частинок дробі змінювали.

Шорсткість поверхні сталі досліджували на профілографі-профілометрі 252. Аналіз профілограм поверхні зразків дав змогу визначити величини параметрів шорсткості [14]:

– середнє арифметичне відхилення профілю $R_a = 0,02.100$ мкм;

- висоту найбільшого виступу профілю $H_{\max} = 100$ мкм;
- висоту найбільшої западини профілю $H_{\min} = 0,1$ мкм;
- відносну опорну довжину профілю $t_p = 0,100$ %;

Число кроків у межах довжини траси сканування в процесі вимірювання по базовій лінії n становило до 1000 значень. Максимальна довжина траси сканування профілографа – 50 мм, ширина запису – 50 мм, швидкість трасування датчика – 0,6; 6; 60 мм/хв. Значення відсічень кроку – 0,08; 0,25; 0,8; 2,5 мм, довжина трас обстукування під час вимірювання дорівнювала 1,5; 3; 6 мм, радіус кривизни верхівки шупа – $10 \pm 2,5$ мкм. У процесі графічного оброблення профілограми за середню лінію профілю прийняли лінію, що проходить вздовж профілограми та ділить розмір $R_{\max}$ навпіл. Використовуючи програму *poft.mex*, визначили середнє значення параметра шорсткості. Перевірили на відповідність нормальному закону розподілу значень. На підставі математичного аналізу результатів вимірювань зробили висновки про стан поверхні зразків.

Після підготовки поверхні встановлювали оптимальний режим нанесення газополуменевого покриття порошку на нікелевій основі ПГ-10Н-01, що самофлюсується на поверхню сталі 45.

Залежність швидкості частинок v від відстані до зрізу сопла L представлена на рис. 1.

З графіку видно, що в разі обраної нами оптимальної відстані від зрізу сопла палиника до поверхні металу 75–250 мм швидкість нанесення покриття максимальна і становить 130–170 м/с. Зниження швидкості викликає охолодження частинок під час руху. Тому тепловміст частинок, які стикаються з поверхнею, менший, і зчеплення з поверхнею погане. Зростає також імовірність окислення частинок.

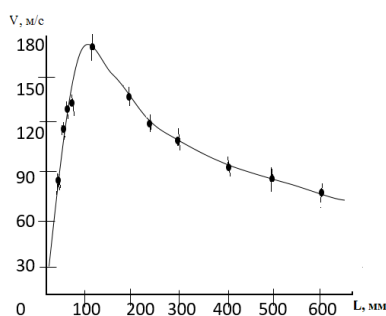


Рис. 1. Залежність швидкості частинок v від відстані до зрізу сопла L

Оптимальна відстань від зрізу сопла палиника до поверхні сталі становила 75–250 мм. За умови більш близької відстані створюється небезпека деформації основного металу під впливом термічних напружень. Коли відстань занадто велика – знижується температура та швидкість частинок, які осідають, що призводить до утворення пухкого покриття і зниження міцності зчеплення.

Прямий кут напилання встановили, виходячи з того, що найбільша деформація частинок, що напилюються, у разі зіткнення з поверхнею основи відбувається, якщо палиник розташований перпендикулярно до її поверхні.

Оптимальна температура поверхні металу перед нанесенням газополуменевого покриття становила приблизно 1500 °С. Перегрів поверхні основного металу знижує міцність зчеплення. За нижчої температури покриття може відшаровуватися та розтріскуватися.

Знаючи час розпилення заданої швидкості струменя, визначили товщину покриття.

Таким чином, були отримані зразки сталі з різним ступенем шорсткості поверхні, на яку нанесено газополуменеве покриття. Важливою для практичного використання характеристикою є міцність зчеплення покриття з поверхнею зразків. Експериментальні випробування на міцність зчеплення проводилися на відрив з використанням клею. Метод полягає в рівномірному відриві покриття, нанесеного на торець зразка, який склеюють, зі зразком без покриття. Випробування проводять на зразках, що мають циліндричну форму діаметром 25 мм і заввишки 16 мм. Товщина покриття повинна бути не менша ніж 0,2 мм. Для склеювання застосовували клей на основі епоксидної смоли ЕД-20 за умови, що він не проникатиме крізь покриття до основного металу.

Склеєні зразки витримували за умови кімнатної температури протягом трьох діб до повного затвердіння клею. Цей метод випробувань можна використовувати тільки тоді, коли міцність зчеплення покриття з основою не перевищує міцність самого клею.

Для визначення міцності зчеплення заздалегідь склеєні зразки закріплювали у спеціальному пристрої, що центрує та забезпечує співвісність за умови накладання навантаження і поміщують у випробувальну машину.

Міцність зчеплення покриття обчислювали за формулою:

$$\sigma = F / S,$$

де σ – міцність зчеплення, МПа; F – розривне зусилля, Н; S – площа поперечного перетину зразків, м².

Міцність зчеплення покриття обчислювали як середнє арифметичне результатів п'яти випробувань.

Залежність міцності зчеплення від товщини покриття показана на рис. 2. Для одного й того ж матеріалу збільшення товщини покриття супроводжується зниженням міцності зчеплення з основним металом. Це пов'язано з тим, що в покриттях великої товщини виникають значні залишкові напруження, які сприяють руйнуванню.

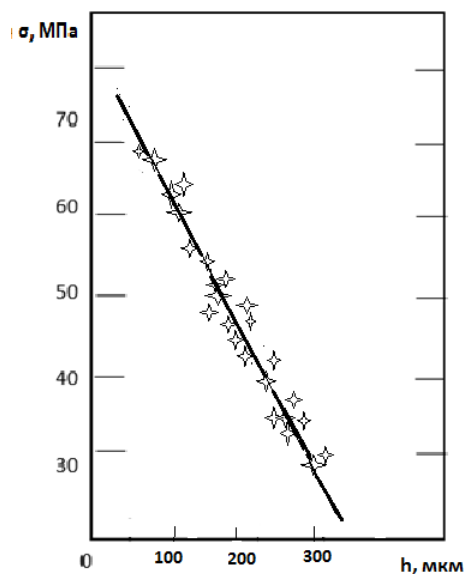


Рис. 2. Співвідношення між товщиною покриття та міцністю зчеплення

У табл. 1 представлені типові результати вимірювань міцності зчеплення і товщини покриття h для параметра шорсткості $R_a = 12,5$ мкм зразків, напилених в однакових умовах.

Таблиця 1 – Співвідношення міцності зчеплення σ і товщини покриття h для параметра шорсткості поверхні $R_a = 12,5$ мкм

σ , МПа	h , мкм
20	300
26	250
28	220
30	200
60	90

Результати вимірювання міцності зчеплення покриття постійної товщини залежно від шорсткості поверхні сталі наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Співвідношення міцності зчеплення σ і шорсткості поверхні R_a для товщини покриття $h = 200$ мкм

σ , МПа	R_a , мкм
10	1.6
20	6
30	12
60	25

Аналіз отриманих результатів показав, що для збільшення міцності зчеплення газополуменового порошкового покриття потрібно вибирати оптимальні параметри товщини покриття $h \leq 200$ мкм і шорсткості поверхні сталі $R_a \geq 12,5$ мкм.

Дослідження структури газотермічного покриття проводити значно складніше, ніж структуру матеріалу основи. У формуванні покриття мають місце два види зв'язку: адгезійний між напиленим матеріалом і поверхнею підкладки та когезійний між напиленими частинками. За допомогою електронного мікроскопа (рис. 3, а) були виявлені границі між покриттям і поверхнею основи. Установлено, що напилений матеріал і сталь 45 мають кристалічну будову (рис. 3, б). На дифракційних картинах спостерігались також і гало (рис. 3, в). Виникнення ділянок з аморфною структурою скоріш за все пов'язано з високими швидкостями кристалізації в окремих місцях газополуменових покриттів.

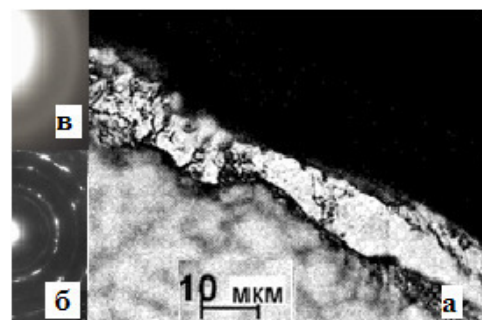


Рис. 3. Електронномікроскопічне зображення (а) та дифракційні картини (б, в) сталі 45 з газополуменовим покриттям ПГ-10Н-01

Таким чином, електронномікроскопічні дослідження виявили у складі газополуменового покриття на сталі 45 наявність аморфної фази, яка може впливати на зменшення міцності зчеплення за рахунок виникнення додаткових мікроскопічних напружень.

Висновки

1. Оптимальному режиму нанесення газополуменового покриття порошку на ніке-

лівій основі ПГ-10Н-01, що самофлюсується, на поверхню сталі 45 відповідає напilenня під прямим кутом; температура попереднього прогріву поверхні становить $\approx 1500^\circ\text{C}$; відстань від зрізу сопла пальника до поверхні металу – 75–250 мм; швидкість напilenня – 130–170 м/с.

2. Міцність зчеплення покриття ПГ-10Н-01 зі сталлю 45 зростає зі збільшенням ступеня шорсткості поверхні і зі зниженням товщини покриття.

3. Для збільшення міцності зчеплення необхідно наносити газополуменеве покриття завтовшки $h \leq 200$ мкм на поверхню підкладки, яка має параметр шорсткості $Ra \geq 12,5$ мкм.

Література

1. Борисов Ю.С. Газотермические покрытия из порошковых материалов: справочник. Киев. Наукова Думка. 1987. 544 с.
2. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория технология и оборудование: учебник для вузов. Москва: Metallurgy. 1992. 432 с.
3. Мешалкин А.Ю. та ін. Электронная обработка материалов. 2012. 48(6). С.114–118.
4. Хасуи А. Техника напыления / пер. с японск. Москва: Машиностроение. 1975. 288 с.
5. Лахтин Ю.М. Основы металловедения. Москва: Metallurgy. 1988. 320 с.
6. Матеріалознавство: підручник / ред. С.С. Дяченко. Харків: ХНАДУ, 2007. 440 с.
7. Черноиванов В.И., Лялякин В.П. Организация и технология восстановления деталей машин. Изд. 2-е. Москва: ГОСНИТИ. 2003. 488 с.
8. Гиршов В.Л., Котов С.А., Цеменко В.Н. Современные технологии в порошковой металлургии. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та. 2010. 386 с.
9. <http://www.uipv.org/ua/bases2.html>
10. <http://www1.fips.ru/wps/portal/Registers/>
11. http://www1.fips.ru/wps/wcm/connect/content_ru/ru/inform_resources/inform_retrieval_system/
12. Єдина система захисту від корозії та старіння. ДСТУ 2639-94. Київ.
13. Сінковський А.С. Теорія та методи напilenня. Одеса: Наука і техніка. 2003.
14. Гаврилюк В.Г., Кукляк М.Л. Взаємозамінність, стандартизація і технічні вимірювання: навчальний посібник для студентів механічних та машинобудівних спеціальностей. Київ: УМКВО. 1990. 210 с.
2. Kudinov V.V., Bobrov G.V. Naneseniye pokrytiy napyleniyem. Teoriya tekhnologiya i oborudovaniye. [Spray coating. Theory technology and equipment]. Textbook for high schools. M.: Metallurgy 1992. 432 c. [in Russian].
3. Meshalkin A.Yu. ta in. Elektronnaya obrabotka materialov. [Electronic processing of materials] 2012, 48(6), c.114–118. [in Russian].
4. Xacui A. Texnika napyleniya/per.s yaponsk. M.: Mashinostroenie. [Dusting Technique] Translated from Japanese. M.: Machinery. 1975. 288 c. [in Russian].
5. Lakhtin Yu.M. Osnovy metallovedeniya. M.: Metallurgiya [Fundamentals of Metallurgy]. M.: Metallurgy. 1988. 320 c. [in Russian].
6. Materialoznavstvo pidruchnik. red. S.S. Dyachenko. Harkiv: HNDU. [Material knowledge] pidruchnik. ed. S.S. Dyachenko. Kharkiv: KHNADU. 2007. 440 c. [in Ukraine].
7. Chernoiivanov V.I., Lyalyakin V.P. Organizatsiya i tekhnologiya vosstanovleniya detaley mashin. Izd. 2-ye. M.: GOSNITI [Organization and technology of restoration of machine parts.] Ed. 2nd. M.: GOSNITI. 2003. 488 c. [in Russian].
8. Girshov V.L., Kotov S.A., Tsemenko V.N. Sovremennyye tekhnologii v poroshkovoy metallurgii.. [Modern technologies in powder metallurgy]. SPb. Publishing house Polytechnic. University. 2010. 386c. [in Russian].
9. <http://www.uipv.org/ua/bases2.html>
10. <http://www1.fips.ru/wps/portal/Registers/>
11. http://www1.fips.ru/wps/wcm/connect/content_ru/ru/inform_resources/inform_retrieval_system/
12. Yedyna systema zakhystu vid koroziiyi ta starinnya. DSTU 2639-94. Kyiv [Unified system for protection against corrosion and aging]. DSTU 2639-94 Kyiv. [in Ukraine].
13. Sinkovskyy A.S. Teoriya ta metody napyleniya. Odesa. Nauka i i tekhnika [The theory and methods of spraying]. Odessa: Science and and technology. 2003. [in Ukraine].
14. Havrylyuk V.H., Kuklyak M.L. Vzayemozaminnist, standartyzatsiya i tekhnichni vymiryuvannya. Navchal-nyy posibnyk dlya studentiv mekhanichnykh ta mashynobudivnykh spetsialnostey. [Interchangeability, standardization and technical measurements]. A manual for students of mechanical and mechanical engineering specialties. Kyiv: Umkvo. 1990. 210 c. [in Ukraine].

Дьяконенко Ніна Леонідівна, к.ф.-м.н., доцент кафедри технології металів та матеріалознавства тел. +38-057-707-37-30, e-mail: dnina490@gmail.com. Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Любченко Олена Анатоліївна, к.ф.-м.н., професор кафедри фізики, тел. +38-057-707-63-37, e-mail: lyubchenko@ukr.net. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Україна, м. Харків, вул. Кіріпчова, 2.

References

1. Borisov U.S. Gazotermicheskie pokrytiya iz poroshkovykh materialov. Gazotermicheskiye pokrytiya iz poroshkovykh materialov. [Thermal coatings of powder materials]. Directory. Kyiv: Naukova Dumka. 1987. 544 c. [in Ukraine].

Прочность сцепления газотермического порошкового покрытия с поверхностью стали 45

Аннотация. Учитывая актуальность применения метода газопламенного напыления, исследовано покрытие из порошкового сплава ПГ-10Н-01 на стали 45. Установлена зависимость прочности сцепления от толщины покрытия и шероховатости поверхности металла. Определены оптимальные характеристики шероховатости поверхности металла, толщины покрытия и прочности сцепления его с основой для практического использования.

Ключевые слова: газопламенное напыление, порошок ПГ-10Н-01, сталь 45, толщина покрытия, шероховатость, прочность сцепления.

Дьяконенко Нина Леонидовна, к.ф.-м.н., доцент кафедры технологии металлов и материаловедения тел. +38-057-707-37-30, e-mail: dnina490@gmail.com. Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, Украина, г. Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25.

Любченко Елена Анатольевна, к.ф.-м.н., профессор кафедры физики, тел. +38-057-707-63-37, e-mail: e_lyubchenko@ukr.net. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» Украина, г. Харьков, ул. Кирпичова, 2.

The adhesion strength of the thermal spray powder coating with the surface of steel 45

Problem. Improving the performance of materials can be achieved by changing the condition and properties of their surface by flame spraying. It is relatively simple to apply coatings on any limited surface area of a product made from a wide variety of materials using this method. **Goal.** The goal is improving of the methods of flame spraying and studying the influence of the degree of surface roughness and the thickness of the coating on the adhesion strength. The **object** of the study is Steel 45. A powder was a nickel based alloy

PG-10H-01 for the application of a flame coating. **Methodology.** The results are obtained on the basis of a bead-blasting surface treatment. The surface roughness of the steel was investigated using profiler – profile meter 252. Experimental strength tests were carried out on a wipe using glue. **Results.** It has been established that spraying at a right angle corresponds to the optimal mode of applying a gas-fired coating; surface preheating temperature $\approx 1500^\circ\text{C}$; the distance from the cut of the nozzle of the burner to the metal surface is 75–250 mm; spraying speed 130–170 m/s. The adhesion strength of the coating with steel 45 increases with a surface roughness and with a decrease in the thickness of the coating. It is necessary to apply a flame coating with thickness $h \leq 200\ \mu\text{m}$ and a roughness parameter $Ra \geq 12,5\ \mu\text{m}$ to increase the adhesion strength. **Originality.** For the first time the parameters of gas-flame spraying of such objects were established. The adhesion strength of the coating with steel 45, the degree of surface roughness and the thickness of the coating PG-10H-01 were analyzed. **Practical value.** The obtained results can be used for improving the gas-flame spraying technology to increase the durability of machine parts.

Key words: gas-flame spraying, powder PG-10H-01, steel 45, coating thickness, roughness, adhesion strength.

Diakonenko Nina Leonidovna, Ph.D., Associate Professor, Department of Metal Technology and Materials Management tel. +38-057-707-37-30, e-mail: dnina490@gmail.com. Kharkiv National Automobile and Highway University, 61002, Ukraine, Kharkov, st. Yaroslav the Wise, 25.

Lyubchenko Elena Anatolyevna, Ph.D, Professor of the Department of Physics, tel. + 38-057-707-63-37, e-mail: e_lyubchenko@ ukr. net. National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine, Kharkov, st. Kirpichova, 2.