

Шевченко О.В.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УМОВ ПЛАЗМОВОГО НАПИЛЮВАННЯ НА МІЦНІСТЬ ЗЧЕПЛЕННЯ ТА КОГЕЗІЙНУ МІЦНІСТЬ ПОКРИТТІВ З ТЕРМОНЕЙТРАЛЬНИХ ТА ТЕРМОРЕАГУЮЧИХ ПОРОШКІВ НА НІКЕЛЕВІЙ ОСНОВІ

*Досліджено вплив умов плазмового напилювання на міцність зчеплення та когезійну міцність покриттів з термонеітрального нікелевого порошку, отриманого розпилюванням розплаву, та конгломератного термореагуючого нікель-алюмінієвого порошку. Встановлено, що для ефективного протікання екзотермічних реакцій в частках композиційних нікель-алюмінієвих порошоків нікелева та алюмінієва фази повинні знаходитись у розплавленому стані. При напилюванні на повітрі екзотермічні реакції в частках конгломератних нікель-алюмінієвих порошоків протікають переважно у режимі горіння, в частках плакованих порошоків – як у режимі дифузійного розчинення алюмінію в нікелі, так і в режимі поверхневого горіння розчиненого алюмінію. Режим горіння являє собою інтенсивне окислювання алюмінію, яке з однієї сторони суттєво збільшує вміст оксидів в покриттях, а з іншої сторони стимулює протікання екзотермічних реакцій в частках порошоків. При напилюванні у захисній камері з контрольованою атмосферою екзотермічні реакції між нікелем та алюмінієм протікають лише у режимі дифузійного розчинення алюмінію в нікелі, незалежно від конструкції часток. При цьому формуються покриття з високим рівнем фізико-механічних властивостей без попереднього підігрівання сталеві основи. Покриття мають характерну литу структуру з великою кількістю зон, в яких відбувається приварювання часток між собою. Покриття, напилені на повітрі, мають ламелярну структуру з великою кількістю оксидних включень, розташованих по границях між частками, що є основною причиною суттєвого зменшення міцності зчеплення та когезійної міцності покриттів, напилених термореагуючим порошком. Характерною особливістю, покриттів, напилених термонеітральним порошком, є те, що їхня міцність зчеплення та когезійна міцність майже не змінюються при переході від напилювання у захисній камері до напилювання на повітрі. Суттєве підвищення механічних властивостей таких покриттів досягається лише при попередньому підігріванні сталеві основи за умови напилювання у захисній камері.*

**Ключові слова:** термореагуючий порошок, термонеітральний порошок, плазмове напилювання, дистанція напилювання, струм дуги, плазмоутворювальний газ, плазмотрон, покриття, міцність зчеплення, когезійна міцність.

**Актуальність дослідження.** Економічна доцільність відновлення деталей обумовлена, насамперед, можливістю повторного та багаторазового використання 65 - 75 % деталей. Собівартість відновлення деталей, як правило, не перевищує 50 - 70 % вартості нових деталей, а витрати матеріалів у 15 - 20 разів нижче [1]. Разом з тим експлуатаційна надійність відновлених деталей залишається низькою. Ресурс деталей після відновлення становить у середньому 80 - 90 % ресурсу нових деталей [1]. Це обумовлено дефектами просторової геометрії корпусних і базових деталей і застосуванням способів відновлення, які не забезпечують необхідну зносостійкість, в тому числі міцність деталей з покриттями, адгезійну та когезійну міцність покриттів. Підвищення якості відновлення деталей є великою комплексною проблемою, яка вимагає багатобічного, системного розгляду. Процес керування якістю відновлення деталей повинен охоплювати дослідження і проектування технологічних процесів відновлення, реалізацію процесів відновлення та експлуатацію відновлених деталей. При виготовленні нових машин, а також їхньому ремонті велика увага повинна приділятися раціональному використанню високолегованих матеріалів і більш широкому залученню у господарську сферу недефіцитних антифрикційних і зносостійких матеріалів. Одними з найбільш важливих параметрів якості покриттів є їхня адгезійна та когезійна міцність. Ці параметри значною мірою визначають експлуатаційну надійність покриттів. У сучасній технології плазмового напилювання для підвищення адгезійної міцності покриттів широко застосовують напилення підшару термореагуючим порошком перед нанесенням основного функціонального шару покриття. Як правило, саме міцність зчеплення підшару з основою визначає адгезійну міцність покриття в цілому.

**Постановка проблеми.** Аналіз процесів плазмового напилювання композиційних Ni - Al порошоків показує прояв багатьох факторів, які впливають на формування покриттів. В роботі [2] було виявлено явище плавлення нікелевої оболонки плакованих порошоків, що випереджає плавлення алюмінієвого ядра. Це пов'язано з наявністю суттєвого термічного опору на внутрішній границі між ядром та оболонкою. В результаті спочатку у частках протікають процеси просторового розподілу нікелю та алюмінію, а потім починається їхня хімічна взаємодія. За рахунок зменшення площі фактичного контакту між ядром та оболонкою зменшується швидкість екзотермічної реакції між ними.

При вході часток у зони плазмового струменя, які містять кисень, розвиваються процеси окислювання алюмінію. Результати хімічного аналізу композиційних Ni - Al - матеріалів перед напилюванням і після нього показали, що втрати алюмінію при напилюванні плакованих порошоків складають 10 - 20 мас. % [2]. Переважна

частина втрат пов'язана з утворенням оксидів алюмінію, які входять у склад покриттів і розташовуються переважно по границях часток.

При напилюванні промислових конгломератних порошоків втрати алюмінію складають 20 - 50 мас. %. Втрати алюмінію пов'язані з його окисненням і руйнуванням частки конгломератів. Окислюванню алюмінію сприяє конструктивне оформлення часток – порошок алюмінію конгломерований на нікелі [3, 4].

Аналіз характеру руйнування Ni - Al - покриттів різного хімічного складу при випробуваннях на міцність зчеплення за методикою відриву конічного штифта показує, що на поверхні сталевго штифта після відриву залишається суцільний шар покриття. Внутрішнє руйнування покриттів відбувається через їхнє розшарування по границях часток [5 - 7]. Таким чином, покриття мають низьку когезійну міцність, що значною мірою обумовлено наявністю у покриттях оксидів алюмінію, які перешкоджають міцному з'єднанню часток по металевим зв'язкам. Отже, при напилюванні терморегулюючих нікель-алюмінієвих порошоків слід насамперед забезпечити умови для міцного з'єднання між собою часток у покритті.

**Мета досліджень.** Метою досліджень є оптимізація умов плазмового напилювання терморегулюючих нікель-алюмінієвих порошоків задля підвищення їхньої міцності зчеплення та когезійної міцності, а також порівняльний аналіз міцності зчеплення та когезійної міцності покриттів з терморегулюючих порошоків з покриттями, напиленими звичайними термонеутральними порошками загального призначення.

**Задачі дослідження.** Задля досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі: проаналізувати основні технологічні варіанти плазмово-порошкового напилювання покриттів у сучасному машинобудуванні; розробити методику проведення досліджень; оптимізувати потужність плазмотрону та склад плазмоутворювального газу задля забезпечення гарантованого проплавлення часток та їхнього перегріву вище температури плавлення; дослідити вплив умов напилювання на міцність зчеплення та когезійну міцність покриттів.

**Результати дослідження.** Основними технологічними варіантами плазмового напилювання покриттів у сучасному машинобудуванні є напилювання на повітрі та напилювання у контрольованому газовому середовищі [5]. В останньому випадку захист порошкового матеріалу та поверхні основи може бути забезпечений за рахунок використання насадок або при напилюванні у камері з контрольованою атмосферою. При цьому незалежно від обраного технологічного варіанту напилювання може здійснюватись з попереднім підігрівом основи або без нього [6]. Найбільш інтенсивно у сучасному машинобудуванні розвивається плазмове напилювання у камерах з контрольованою атмосферою [7]. Це дозволяє повністю захистити напилюємий матеріал та матеріал основи від окислювання, і, отже, використовувати попередній підігрів основи плазмовим струменем для підвищення міцності покриттів.

У даному дослідженні було здійснено порівняльний аналіз міцності зчеплення та когезійної міцності покриттів, напилених порошками марок ПГ-СР3 та ПТ-НА-01 на повітрі та у камері із захисним середовищем. Порошок ПГ-СР3 – промисловий термонеутральний порошок на основі нікелю, отриманих розпиленням розплаву азотом. Порошок ПТ-НА-01 – терморегулюючий конгломератний нікель-алюмінієвий порошок (10 % алюмінію, решта – нікель). Дисперсність порошоків, якими напилювались покриття, складала 50-100 мкм. Для напилювання покриттів використовувалась промислова установка УПУ-3Д із захисною камерою. Захисне середовище у камері створюється тиском плазмо утворювального газу (аргон або суміш аргону з азотом). При збільшенні тиску в камері понад 1,5 атмосфери відкривається захисний клапан, через який надлишок плазмо утворювального газу стравлюється в атмосферу. Захисний клапан закривається при зменшенні тиску до 1,2 атмосфери. Таким чином, напилювання відбувається при тиску плазмоутворювального газу в камері 1,2 - 1,5 атмосфери.

Визначення міцності зчеплення та когезійної міцності покриттів здійснювалось за стандартними методиками на стандартних зразках [2]. Визначення міцності зчеплення проводилось за методикою відриву конічного штифта від шару покриття (рис. 1). Товщина покриття складала 1,4 - 1,5 мм.

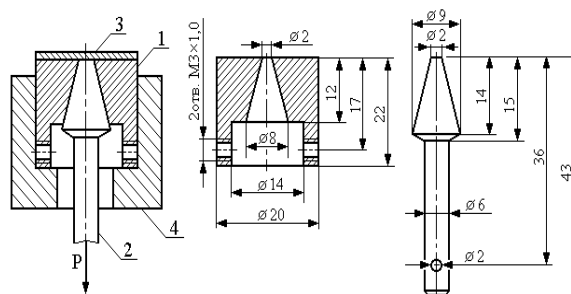


Рисунок 1 – Схема визначення міцності зчеплення покриттів:  
1 – корпус; 2 – штифт; 3 – шар покриття; 4 – затискач розривної машини

Конструкцію зразків для визначення когезійної міцності покриттів наведено на рис. 2. Дві втулки 2, 3, що мають однаковий діаметр, центруються по гвинту 4 (рис. 2, а). Головка гвинта закріплюється в обертачі, після

чого на зовнішню циліндричну поверхню втулок напильюється шар покриття. Напильене покриття 1 шліфується до необхідної товщини – 1,0 мм (рис. 2, б). Після шліфування покриття гвинт 4 викручується. Замість гвинта 4 у кожну втулку вкручується один гвинт. Головки цих гвинтів закріплюються у затискачах розривної машини (рис. 2, б), потім відбувається розтягування зразка до моменту руйнування покриття.

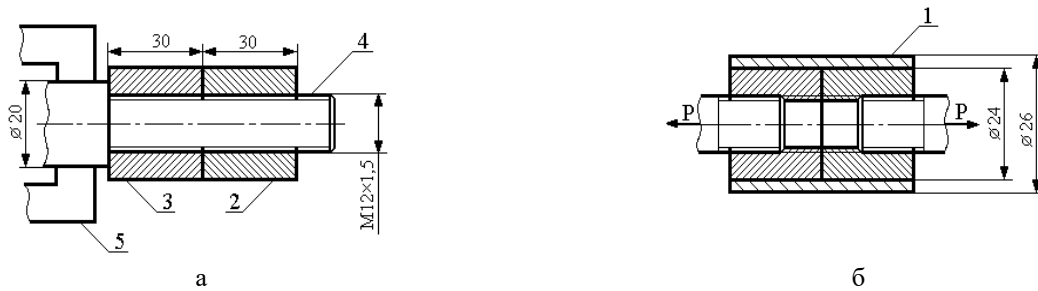


Рисунок 2 – Схема визначення когезійної міцності покриттів: а – схема підготовки зразка; б – схема випробування; 1 – шар покриття; 2, 3 – втулки, що мають внутрішню різьбу; 4 – центральний гвинт; 5 – патрон обертача

Перед напильюванням виконувалась абразивно-струминна обробка поверхонь зразків, на які напильювались покриття. В якості абразивного матеріалу для обробки використовувався корунд, дисперсність якого складала 0,4 - 0,8 мм. Абразивно-струминна обробка проводилась у герметичній камері з використанням інжекційного пістолета. Тиск повітря: 0,5 - 0,6 МПа, витрата корунду: 2,5 - 3,0 кг/год.

Задля зменшення об'єму експериментальних досліджень попередньо було оптимізовано потужність плазмотрону та склад плазموутворювального газу. В якості плазموутворювального газу використовувався чистий аргон та суміш аргону з азотом від 5 до 40 % азоту. Струм дуги плазмотрону варіювався від 320 до 500А. Оптимізація потужності плазмотрону та складу плазмоутворювального газу проводилась за двома напрямками:

1. Прямий експеримент – на тонкі сталеві пластини наносився шар покриття товщиною близько 1 мм. Потім з цих зразків виготовлялись мікрошліфи, за якими в покриттях визначалась кількість не проплавлених та неповністю проплавлених часток.

2. Розрахунковий метод – з використанням програмного забезпечення Casps визначався такий струм дуги, та такий вміст азоту у плазмоутворювальній суміші, при яких досягається гарантоване проплавлення часток порошків, а також їхній перегрів вище температури плавлення на 800 - 1000 °С. Таким умовам відповідає наступний режим напильювання (для порошків на нікелевій основі дисперсністю 50-100 мкм): струм дуги 400 - 450А, плазмо утворювальний газ – Ar + 40 % N<sub>2</sub>. Саме на цьому режиму здійснювалось напильювання усіх покриттів.

На рис. 3 наведено експериментальну залежність міцності зчеплення плазмових покриттів з термонеїтрального порошку ПГ-СР3 дисперсністю 63 - 100 мкм від дистанції напильювання при нанесенні покриттів у захисній камері та на повітрі. Температура основи перед напильюванням складала 20°С.

При напильюванні у захисній камері максимальна міцність зчеплення покриттів складає 45 - 48 МПа при дистанції напильювання 80 - 100 мм (рис. 3, крива 1). При подальшому збільшенні дистанції напильювання міцність зчеплення покриттів поступово зменшується.

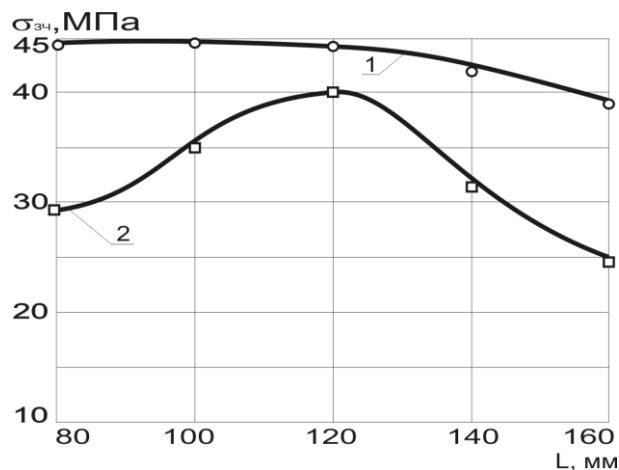


Рисунок 3 – Залежність міцності зчеплення плазмових покриттів з термонеїтрального порошку ПГ-СР3 дисперсністю 50 - 100 мкм від дистанції напильювання: 1 – напильювання у захисній камері;

2 – напилювання на повітрі; струм дуги 400А; плазмоутворювальний газ Ar + 40 об. % N<sub>2</sub>;  
витрата порошку 3 кг/год.; температура основи перед напилюванням 20°C

При напилюванні на повітрі збільшення дистанції напилювання від 80 до 120 мм супроводжується збільшенням міцності зчеплення покриттів з 30 до 40 МПа (рис. 3, крива 2). Це обумовлено зменшенням температури нагрівання поверхні основи плазмовим струменем в окислювальному середовищі і, відповідно, зменшенням товщини оксидної плівки на поверхні основи. На ділянці дистанції напилювання 120 - 160 мм відбувається різке зменшення міцності зчеплення покриттів (від 40 до 25 МПа) внаслідок інтенсивного охолодження часток у низькотемпературній зоні плазмового струменя та їхнього окислювання (рис. 3, крива 2).

Значного збільшення міцності зчеплення покриттів з термонеітрального порошку ПГ-СРЗ можна досягти при попередньому підігріванні сталеві основи (рис. 4).

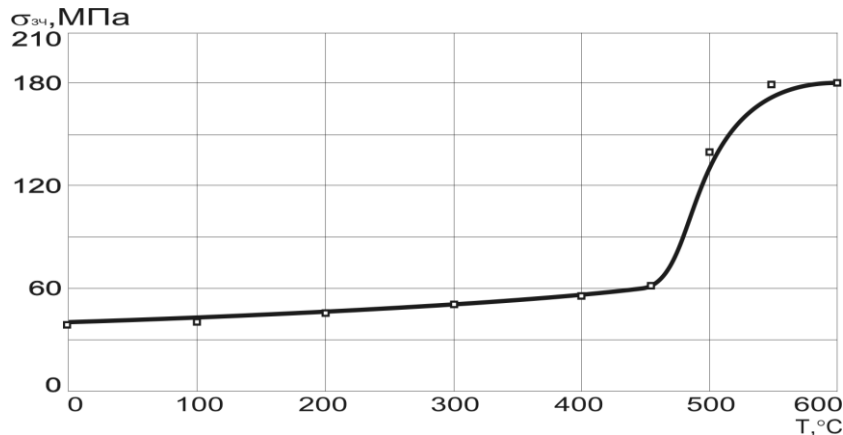


Рисунок 4 – Залежність міцності зчеплення плазмових покриттів з термонеітрального порошку ПГ-СРЗ дисперсністю 50 - 100 мкм від температури попереднього підігрівання сталеві основи: дистанція напилювання 120 мм; плазмоутворювальний газ Ar + 40 об. % N<sub>2</sub>; струм дуги 400А; витрата порошку 3 кг/год.; напилювання у камері із захисною атмосферою

Слід, однак, зауважити, що цей технологічний прийом дає ефект лише при напилюванні у захисній камері. При напилюванні на повітрі попереднє підігрівання основи дає негативний результат – із збільшенням температури підігрівання основи міцність зчеплення покриттів зменшується. Це обумовлено утворенням на поверхні основи товстої оксидної плівки, яка перешкоджає формуванню міцних металевих зв'язків між частками порошку та поверхнею основи. Але навіть при напилюванні у захисній камері суттєве підвищення міцності зчеплення покриттів досягається при температурі основи не нижче 450°C. До температури основи 450°C міцність зчеплення покриттів змінюється несуттєво: при температурі основи 20°C вона складає 45 - 48 МПа, при температурі основи 450°C – 60 - 62 МПа (рис. 4). Різке збільшення міцності зчеплення покриттів спостерігається в інтервалі температур 450 - 550°C: міцність зчеплення зростає з 60 - 62 МПа при температурі 450°C до 170 - 180 МПа при температурі 550°C.

При напилюванні термореагуючих порошоків частки нагріваються не тільки за рахунок конвективного та радіаційного теплообміну з плазмовим струменем, а також і за рахунок теплоти, яка виділяється при протіканні екзотермічних реакцій між компонентами, що входять до складу часток.

При напилюванні плакованого порошку ПНА-90 та порошку конгломератного типу ПТ-НА-01 у захисній камері забезпечується ефективний захист алюмінієвої фази часток від окислювання. Висока площа контакту між розплавленими нікелем та алюмінієм, а також відсутність між ними бар'єрних оксидних плівок обумовлюють високу швидкість протікання екзотермічної реакції в частках у режимі розчинення. Міцність зчеплення покриттів з основою складає 160 - 180 МПа при дистанції напилювання 80 - 120 мм і початковій температурі основи 20°C (рис. 5, 6, криві 1). При збільшенні дистанції напилювання міцність зчеплення покриттів поступово зменшується. Характер залежностей міцності зчеплення покриттів, напилених порошками ПНА-90 і ПТ-НА-01, від дистанції напилювання майже тотожний. Це не означає, що швидкість протікання екзотермічної реакції в частках порошоків ПНА-90 і ПТ-НА-01 однакова. Однак, вірогідніше за все, відмінності у швидкості протікання екзотермічної реакції в частках порошоків ПНА-90 і ПТ-НА-01 мають місце до дистанції напилювання 80 - 100 мм. Пройшовши шлях 80 - 100 мм від зрізу сопла плазмотрона, частки обох порошоків (за умови ефективного нагрівання плазмовим струменем) акумулюють достатню кількість теплової енергії, щоб утворити міцне з'єднання зі сталевію основою.

При напилюванні порошоків ПНА-90 і ПТ-НА-01 на повітрі максимальна міцність зчеплення покриттів складає 70 - 75 МПа при дистанції напилювання 120 - 130 мм (рис. 5, 6, криві 2). При зменшенні дистанції напилювання відносно оптимальних значень (120 - 130 мм) міцність зчеплення покриттів зменшується внаслідок перегріву основи та окислювання її поверхні. Так, при дистанції напилювання 80 мм міцність зчеплення покриттів складає 40 - 45 МПа. При збільшенні дистанції напилювання відносно оптимальних

значень (120 - 130 мм) міцність зчеплення покриттів також зменшується внаслідок охолодження та інтенсивного окислювання часток. При дистанції напилювання 160 мм міцність зчеплення покриттів не перевищує 40 МПа (рис. 5, 6, криві 2).

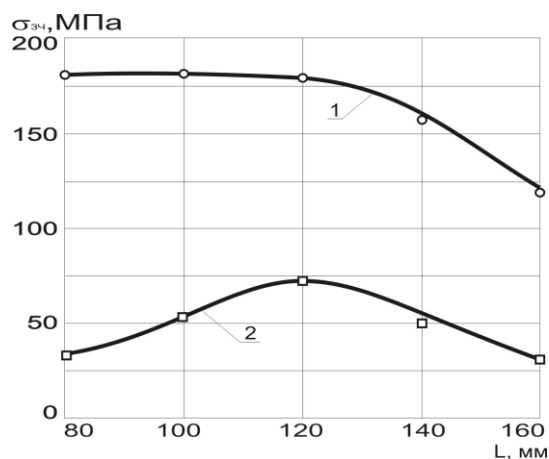


Рисунок 5 – Залежність міцності зчеплення плазмових покриттів з термореагуючого порошку ПНА-90 дисперсністю 50 - 100 мкм від дистанції напилювання: 1 – напилювання у захисній камері; 2 – напилювання на повітрі;

струм дуги 400А; плазмоутворювальний газ Ar + 40 об. % N<sub>2</sub>;  
витрата порошку 3 кг/год.; температура основи перед напилюванням 20°C

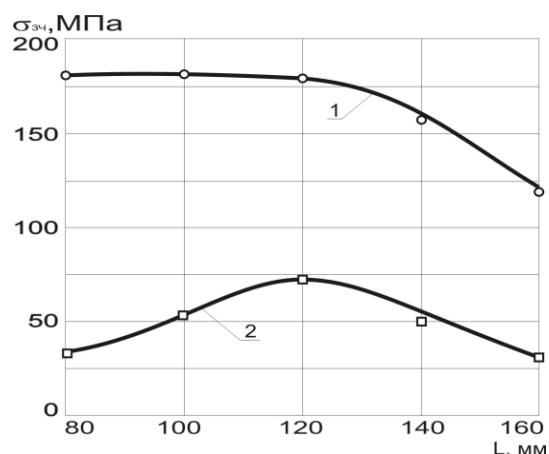


Рисунок 6 – Залежність міцності зчеплення плазмових покриттів з термореагуючого порошку ПТ-НА-01 дисперсністю 50 - 100 мкм від дистанції напилювання: 1 – напилювання у захисній камері; 2 – напилювання на повітрі; струм дуги 400А; плазмоутворювальний газ Ar + 40 об. % N<sub>2</sub>;

витрата порошку 3 кг/год.; температура основи перед напилюванням 20°C

Мікротвердість покриттів, напилених порошками ПНА-90 і ПТ-НА-01 на повітрі, складає 4500 - 5500 МПа, покриттів, напилених у захисній камері, – 6500 - 8000 МПа. Це свідчить про те, що при напилюванні на повітрі значна кількість алюмінію окислюється киснем повітря. При цьому виділяється велика кількість теплоти (навіть більша, ніж при протіканні екзотермічної реакції між нікелем та алюмінієм), але водночас на поверхні часток утворюються оксидні плівки, які негативно впливають на міцність зчеплення покриттів. Той факт, що оксиди алюмінію мають переважно форму плівок, підтверджується результатами металографічного аналізу покриттів. На мікросліфах покриттів, напилених на повітрі, оксиди алюмінію розташовуються тонким шаром по границях між частками, а також між частками та основою. Оксиди алюмінію мають велику мікротвердість, але зафіксувати її на звичайному мікротвердомірі, враховуючи плівкову морфологію оксидів і невелику товщину оксидних плівок, практично неможливо.

При напилюванні у захисній камері додаткове тепловиділення в частках термореагуючих порошків обумовлене насамперед екзотермічною реакцією між нікелем та алюмінієм; окислювання алюмінію відсутнє. При цьому утворюються інтерметаліди, які розчиняються у рідинній фазі часток. При надшвидкісній кристалізації часток на поверхні основи значна кількість алюмінію залишається у складі твердого розчину на основі нікелю, а інша його частина виділяється у вигляді надлишкових фаз – інтерметалідів. Інтерметаліди рівномірно розташовуються в об'ємі часток, зміцнюючи їх та підвищуючи їхню мікротвердість. Завдяки

рівномірному розташуванню інтерметалідів в об'ємі часток збільшення мікротвердості покриттів можна зафіксувати найпростішими методами вимірювання мікротвердості.

Когезійна міцність покриттів з термореагуючих порошоків ПНА-90 і ПТ-НА-01, також як і міцність зчеплення, суттєво зростає при переході від напилювання на повітрі до напилювання у захисній камері (рис. 7, 8). Тут дуже чітко просліджується зміцнювальний вплив оксидів алюмінію, що утворюються при напилюванні на повітрі, і зміцнювальний вплив інтерметалідів.

Когезійна міцність покриттів, напилених порошками ПНА-90 і ПТ-НА-01 у захисній камері при дистанції напилювання 80 - 120 мм, складає 560 - 580 МПа (рис. 7, 8, криві 1). При збільшенні дистанції напилювання когезійна міцність покриттів поступово зменшується, і при  $L = 160$  мм дорівнює 380 - 400 МПа.

При напилюванні на повітрі максимальна когезійна міцність покриттів складає 180 - 190 МПа (рис. 7, 8, криві 2). Оптимальна дистанція напилювання, якій відповідають максимальні значення когезійної міцності, складає 120 - 130 мм. При зменшенні дистанції напилювання ( $L = 80 - 100$  мм) когезійна міцність покриттів зменшується внаслідок перегріву основи. При надто високій дистанції напилювання ( $L = 150 - 160$  мм) частки охолоджуються та окислюються у низькотемпературній зоні плазмового струменя, в якій міститься велика кількість повітря, що також призводить до зниження когезійної міцності покриттів.

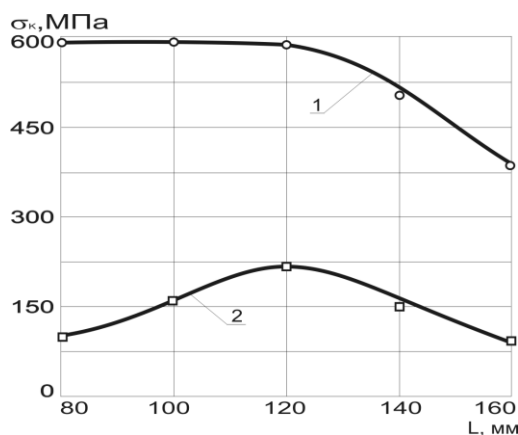


Рисунок 7 – Залежність когезійної міцності плазмових покриттів з термореагуючого порошку ПНА-90 дисперсністю 50 - 100 мкм від дистанції напилювання: 1 – напилювання у захисній камері; 2 – напилювання на повітрі; струм дуги 400А; плазмоутворювальний газ  $Ar + 40$  об. %  $N_2$ ; витрата порошку 3 кг/год.; температура основи перед напилюванням  $20^{\circ}C$

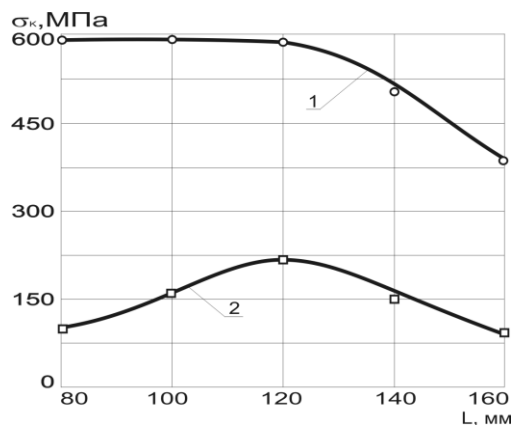


Рисунок 8 – Залежність когезійної міцності плазмових покриттів з термореагуючого порошку ПТ-НА-01 дисперсністю 50 - 100 мкм від дистанції напилювання: 1 – напилювання у захисній камері; 2 – напилювання на повітрі; струм дуги 400А; плазмоутворювальний газ  $Ar + 40$  об. %  $N_2$ ; витрата порошку 3 кг/год.; температура основи перед напилюванням  $20^{\circ}C$

#### Висновки.

1. Встановлено, що для ефективного протікання екзотермічних реакцій в частках композиційних нікель-алюмінієвих порошоків нікелева та алюмінієва фази повинні знаходитись у розплавленому стані.

2. При напилюванні на повітрі екзотермічні реакції в частках конгломератних нікель-алюмінієвих порошоків протікають переважно у режимі горіння, в частках плакованих порошоків – як у режимі дифузійного розчинення алюмінію в нікелі, так і в режимі поверхневого горіння розчиненого алюмінію.

3. При напилюванні у захисній камері з контрольованою атмосферою екзотермічні реакції між нікелем та алюмінієм протікають лише у режимі дифузійного розчинення алюмінію в нікелі, незалежно від конструкції часток.

4. При напилюванні у захисній камері з контрольованою атмосферою конгломератних та плакованих нікель-алюмінієвих порошків формуються покриття з високим рівнем фізико-механічних властивостей. Міцність зчеплення покриттів з основою зі сталі 45 складає 160 - 180 МПа, когезійна міцність – 580 - 600 МПа. Зазначені показники міцності отримані без попереднього підігрівання основи перед напилюванням.

### Література

1. Поляков А.П., Щелоков И.М., Коновалец К.П. Ремонт и восстановление деталей машин. – Харьков: Корсак, 2016. 413 с.
2. Борисов Ю.С., Хмара И.И., Комов С.С. Покрyтия из композиционных порошков. – К.: Alpha Book, 2010. 349 с.
3. Смирнов К.С., Боровинский Е.А., Качалов И.Е. Методы определения механических свойств покрытий. – М.: Оникс, 2019. 400с.
4. Шеглов И.П., Ползунов И.М., Сухов Т.А. Разработка новых процессов плазменного напыления. – М.: МЦФЭР, 2018. 290 с.
5. Лужевич Л.М., Мохортов Т.П., Сялямин О.Е. Плазменное напыление терморегулирующих порошков. – Полоцк: Изд-во ПГУ, 2014. 345 с.
6. Похмурський М.М., Сидорак І.Й., Довгунік М.В. Покриття з порошкових і дровових матеріалів. – Львів: Вид-во ФМІ ім. Г.В. Карпенка, 2007. – 198с.
7. Кононов А.И., Тепляков В.А., Илюшенко П.А. Управление процессами синтеза интерметаллидов при плазменном напылении. – Минск: Техника, 2020. 204с.

### References

1. Polyakov A.P., SHChelokov I.M., Konovalec K.P. Remont i vosstanovlenie detalej mashin. – Harkov: Korsak, 2016. 413 s.
2. Borisov YU.S, Hmara I.I., Komov S.S. Pokrytiya iz kompozicionnyh poroshkov. – K.: Alpha Book, 2010. 349 s.
3. Smirnov K.S., Borovinskij E.A., Kachalov I.E. Metody opredeleniya mekhanicheskikh svojstv pokrytij. – M.: Oniks, 2019. 400s.
4. Sheglov I.P., Polzunov I.M., Suhov T.A. Razrabotka novyh processov plazmennogo napyleniya. – M.: MCFER, 2018. 290 s.
5. Luzhevich L.M., Mohortov T.P., Salyamin O.E. Plazmennoe napylenie termoreagiruyushchih poroshkov. – Polock: Izd-vo PGU, 2014. 345 s.
6. Pohmurskij M.M., Sidorak I.J., Dovgunik M.V. Pokrittya z poroshkovih i drotovih materialiv. – Lviv: Vid-vo FMI im. G.V. Karpenka, 2007. – 198s.
7. Kononov A.I., Teplyakov V.A., Ilyushenko P.A. Upravlenie processami sinteza intermetallidov pri plazmennom napylenii. – Minsk: Tekhnika, 2020. 204s.

*Исследовано влияние условий плазменного напыления на прочность сцепления и когезионную прочность покрытий из термонеутрального никелевого порошка, полученного распылением расплава, и конгломератного терморегулирующего никель-алюминиевого порошка. Установлено, что для эффективного протекания экзотермических реакций в частицах композиционных никель-алюминиевых порошков никелевая и алюминиевая фазы должны находиться в расплавленном состоянии. При напылении на воздухе экзотермические реакции в частицах конгломератных никель-алюминиевых порошков протекают преимущественно в режиме горения, в частицах плакированных порошков – как в режиме диффузионного растворения алюминия в никеле, так и в режиме поверхностного горения растворенного алюминия. Режим горения представляет собой интенсивное окисление алюминия, которое с одной стороны существенно увеличивает содержание оксидов в покрытиях, а с другой стороны стимулирует протекание экзотермических реакций в частицах порошков. При напылении в защитной камере с контролируемой атмосферой экзотермические реакции между никелем и алюминием протекают только в режиме диффузионного растворения алюминия в никеле, независимо от конструкции частиц. При этом формируются покрытия с высоким уровнем физико-механических свойств без предварительного подогрева стальной основы. Покрытия имеют характерную литую структуру с большим количеством зон, в которых происходит приваривание частиц между собой. Покрытия, напыленные на воздухе, имеют слоистую структуру с большим количеством оксидных включений, расположенных по границам между частицами. Оксидные включения, расположенные по границам между частицами, являются основной причиной существенного уменьшения прочности сцепления и когезионной прочности покрытий, напыленных терморегулирующим порошком. Характерной особенностью покрытий, напыленных термонеутральным порошком, является то, что их прочность сцепления и когезионная прочность почти не изменяются при переходе от напыления в защитной камере к напылению на воздухе. Существенное повышение механических свойств таких покрытий достигается только при предварительном подогреве стальной основы при условии, что напыление осуществляется в защитной камере.*

**Ключевые слова:** терморегулирующий порошок, термонеутральный порошок, плазменное напыление, дистанция напыления, ток дуги, плазмообразующий газ, плазмотрон, покрытия, прочность сцепления, когезионная прочность.

*The authors of this article investigated the effect of plasma spraying conditions on the adhesion strength and cohesive strength of coatings from thermally neutral nickel powder obtained by melt spraying and conglomerate thermoreactive nickel-aluminum powder. The studies carried out made it possible to establish that the nickel and aluminum phases must be in a molten state for the effective occurrence of exothermic reactions in the particles of composite nickel-aluminum powders. When spraying in air, exothermic reactions in the particles of conglomerate nickel-aluminum powders proceed mainly in the combustion mode. In the particles of clad powders, the reactions proceed in the mode of diffusion dissolution of aluminum in nickel and in the mode of surface combustion of dissolved aluminum. The combustion mode is an intense oxidation of aluminum, which, on the one hand, significantly increases the content of oxides in the coatings, and on the other hand, stimulates the occurrence of exothermic reactions in powder particles. When spraying in a protective chamber with a controlled atmosphere, exothermic reactions between nickel and aluminum occur only in the mode of diffusion dissolution of aluminum in nickel, regardless of the design of the particles. In this case, coatings are formed that have a high level of mechanical properties, without preheating the steel base. The coatings have a characteristic cast structure with a large number of zones in which the particles are welded together. Air-sprayed coatings have a layered structure with a large number of oxide inclusions located along the boundaries between particles. Oxide inclusions located at the boundaries between particles are the main reason for a significant decrease in the adhesion strength and cohesive strength of coatings sprayed with a thermosetting powder. A characteristic feature of coatings sprayed with thermoneutral powder is that their adhesion and cohesive strength hardly change when passing from spraying in a protective chamber to spraying in air. A significant increase in the mechanical properties of such coatings is achieved only when the steel base is preheated, provided that the spraying is carried out in a protective chamber.*

**Key words:** *thermoreactive powder, thermoneutral powder, plasma spraying, spraying distance, arc current, plasma-forming gas, plasmatron, coatings, adhesion strength, cohesive strength.*

**Шевченко О. В.** – доцент кафедри машинознавства та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

Контактний телефон: +380 66 204-34-73.

Вайбер: +380 66 196-93-82.

E-mail: [shev.cmw@ukr.net](mailto:shev.cmw@ukr.net)