

УДК 621.785.52:621.791.752.2

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ДУГОВОЇ ЦЕМЕНТАЦІЇ НА ЯКІСНІ ПОКАЗНИКИ ЗМІЦНЕНОГО ШАРУ

**П.М. Фастовець**, канд. техн. наук,  
**Ю.А. Кононогов**, ст. наук. співр.,  
**О.В. Пономаренко**, провідний інж.

ННЦ "ІМЕСГ"

---

*Викладено результати експериментальних досліджень процесу дугової цементациї. Визначені фактори, що впливають на якісні показники зміцненого шару.*

---

**Проблема.** В сучасних умовах агропромислового виробництва актуальною є проблема підтримання існуючого машинно-тракторного парку АПК України в роботоздатному стані, яке неможливе без якісного виконання відновлювальних ремонтів з одночасною модернізацією техніки [1]. Експлуатаційна надійність відремонтованої техніки в значній мірі залежить від фізико-механічних властивостей поверхневих шарів деталей, які визначають процеси зношування, втоми та корозії. Для зміцнення деталей застосовують термічну і хіміко-термічну обробку, дугові і плазмові процеси нанесення покриттів, лазерну та іонну обробку. З метою зменшення собівартості зміцнюючого відновлення зношених деталей продовжують залишатись актуальними дослідження процесів електроіскрового легування, електроерозійної обробки та дугової цементациї.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Перспективність процесу дугової цементациї вугільним або графітовим електродом для зміцнення поверхневих шарів сталевих деталей було обґрунтовано в експериментальних дослідженнях І.Д. Кулагіна, А.П. Боржова і Ю.І. Краснова [2], В.К. Загорського і А.А. Рудакова [3]. Застосовували електроди у формі диска. Дуга живилась постійним струмом зворотної полярності. Обробляли пласкі зразки із конструкційних сталей.

Було встановлено, що при обробленні протягом 2–3 с і силі струму від 70 А до 100 А [2] вміст вуглецю в шарі переплавленого металу зменшувався від 3,5% біля поверхні до 0,8% біля лінії сплавлення з основ-

ним металом. Мікротвердість по товщині шару плавно зменшувалась від Н100 16 ГПа біля поверхні до Н100 6,5 ГПа на глибині 1,5 мм. Мікротвердість основного металу становила Н100 2,0 ГПа.

При більших значеннях сили струму в межах від 250 А до 350 А [3] максимальна твердість зміцненого шару зменшилась і становила НВ 6 ГПа. Випробування зносостійкості в різних умовах навантаження показали, що відносна абразивна стійкість зразків після електродугового зміцнення в 1,8–3 рази вище, ніж незміцнених. Цей спосіб було рекомендовано для деталей, що інтенсивно зношуються, в таких машинах як земснаряди, екскаватори, скрепери, трейфери.

Основними чинниками, які визначали ступінь зміцнення, були струм дуги і час обробки поверхні.

Стержневі вугільні електроди СК-6 діаметром 6 мм застосовували в своїх дослідженнях Д.Н. Гречкін, Ю.І. Краснов і В.С. Семеновиков [4]. Дугове оброблення поверхні зразків із сталей марок 30, 55С2Г і Г13Л виконували окремими плямами на постійному струмі зворотної полярності. На оптимальному режимі (струм 150 А, час горіння дуги 3 с) глибина розплавлення в п'ятні становила 1 мм, а вміст вуглецю змінювався від 0,15% в основі до 4% на поверхні плями. Мікротвердість переплавленого металу становила Н100 6 ГПа, що в 2 рази більше від мікротвердості основного металу. Експлуатаційні випробування показали, що у підбійок виправочно-підбивочних машин рухомого складу залізничного транспорту, відновлених приварюванням пластин із ресорно-пружинної сталі марки 55С2Г і зміцнених даним способом, строк служби збільшився на 30–40%.

Основним чинником впливу на фізико-механічні властивості розплавленого металу в зоні зміцнення була потужність дуги (струм).

Подальшим вдосконаленням процесу електродугового зміцнення деталей займались Ю.Л. Рижих, А.С. Юдніков і В.В. Коршунов [5–7]. В своїх дослідженнях вони застосовували змінний струм від джерела живлення на 190 А з напругою 60–70 В та осцилятор змінного струму на 200 А. Обробку проводили графітовими електродами марки ГМ3 діаметром від 6 мм до 10 мм із силою струму від 50 А до 110 А, як в режимі прямої, так і непрямої (між двома електродами) дуги, досягаючи продуктивності обробки поверхонь до 20 см<sup>2</sup>/хв. Глибина зміцнення становила 2 мм, а твердість зміцнених зразків із сталі марки 65Г — 63 НРС.

Крім того, що спосіб прискореного електродугового зміцнення забезпечує більшу продуктивність і більшу глибину зміцненого шару,

порівняно із дифузійними процесами хіміко-термічної обробки, він також уможливорює комбіноване зміцнення (цементация і борування, цементация і азотування) та екзотермічний метод зміцнення, який не потребує складного обладнання [6, 7]. Для цього застосовували пасту, які містять алюміній або його оксид, буру або карбід бора і забезпечують високу мікротвердість від 11,14 ГПа до 12,25 ГПа.

Таким чином, виконаний нами аналіз відомих досліджень [2–7] показав ефективність способу дугової цементации для зміцнення деталей, які працюють у важких умовах інтенсивного абразивного зношування і його перспективність для зміцнюючого відновлення робочих органів сільськогосподарських машин і знарядь. Але в опублікованих результатах не наведено конкретних залежностей якісних показників оброблених поверхонь (крім твердості і зносостійкості) від параметрів режиму і прикладу практичного застосування даного способу для відновлення (зміцнення) зношених робочих органів сільськогосподарських машин і знарядь. Крім цього не виявлено спроб механізації процесу подачі стержневих електродів з метою підвищення стабільності горіння електричної дуги.

Процес дугової цементации можна реалізовувати як на постійному, так і на змінному струмі. Визначальним параметром є сила струму і для змінного струму вона може змінюватись у межах від 50 А до 110 А. Стабільність струму в межах заданої величини залежить від вольт-амперної характеристики джерела живлення і довжини дуги.

Довжина дуги визначається, зокрема, швидкістю згоряння вугільного (графітового) електрода. Тому швидкість його механічної подачі повинна відповідати швидкості згоряння, яка, в свою чергу, залежить від складу електрода, його діаметра і сили струму. Було встановлено [4], що при потужності дуги 4 кВт (сила постійного струму 100 А) швидкість згоряння вугільного електрода діаметром 7 мм становила від 12 мм/хв до 21 мм/хв. Нами в попередніх дослідженнях [8] було встановлено непрямым методом (за результатами зміни зазору між електродом і поверхнею за час горіння дуги), що швидкість згоряння вугільного електрода діаметром 10 мм фірми Binzel при потужності дуги 2 кВт (сила змінного струму 70 А) знаходилась у межах від 0,5 мм/хв до 1,5 мм/хв. Таким чином механізм подачі електрода повинен забезпечувати, зокрема, такий інтервал зміни швидкості подачі.

**Мета досліджень:** визначення параметрів стабільного режиму дугової цементации сталевих поверхонь деталей з механізованою подачею стержневого вугільного електрода.

### Результати досліджень.

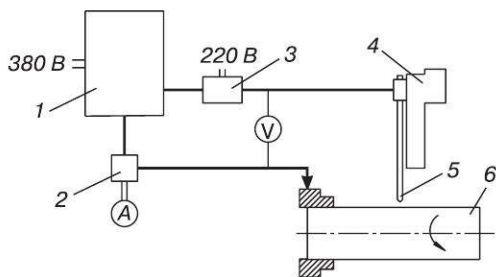
Функціональна схема установки для проведення експериментальних досліджень зображена на рис. 1.

Циліндричні зразки із середньовуглецевої сталі 40Х в стані постачання діаметром 59 мм та довжиною 99 мм закріплювали в патроні універсального обертача 01.06-175 “Ремдеталь”, механізм подачі електрода установлювали на рухомій каретці поворотної консолі обертача. Дугову обробку поверхонь деталей проводили на змінному струмі від джерела живлення ТТ-250 з падаючою вольт-амперною характеристикою із застосуванням пристрою підпалу дуги власного виготовлення. В дослідженнях використовували вугільні електроди марки DC діаметром 10 мм та довжиною 35 мм фірми Binzel (Німеччина).

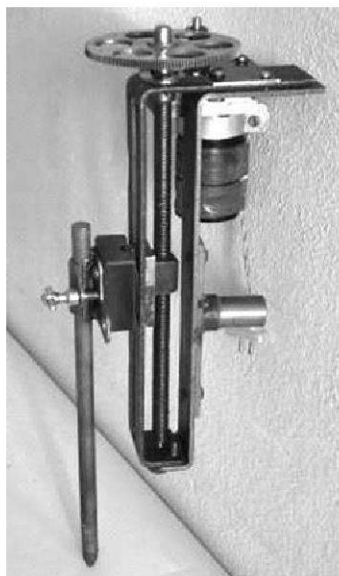
Механізм подачі електрода показано на рис. 2.

Реалізовували однофакторні експерименти. Змінними параметрами режиму дугової обробки були: сила струму, швидкість подачі електрода і швидкість обробки.

Силу струму змінювали в межах від 40 А до 100 А. В залежності від сили струму змінювали швидкість подачі електрода в межах від 0,5 мм/хв до 2 мм/хв з таким розрахунком, щоб в процесі обробки не було обривів дуги і коротких замикань, тобто щоб довжина дуги була постійною. Кут загострення вугільного електрода під-



**Рис. 1.** Функціональна схема установки: 1 — джерело живлення змінним струмом; 2 — трансформатор для вимірювання сили струму; 3 — пристрій підпалу дуги; 4 — механізм подачі електрода; 5 — вугільний електрод; 6 — циліндрична деталь, що обробляється



**Рис. 2.** Механізм подачі електрода: 1 — електродвигун; 2 — гайка; 3 — тримач електрода із струмопідводом; 4 — ходовий гвинт; 5 — вугільний електрод

тримували постійним і він становив  $60^\circ$ . Електрод знаходився в “зеніті”. Відстань між ним та поверхнею деталі становила 2 мм.

Обробку поверхонь зразків проводили одиничними кільцевими валиками. Швидкість обробки змінювали в межах від 9 м/год до 35 м/год шляхом зміни частоти обертання шпинделя обертача.

Якість обробленої поверхні оцінювали шириною переплавленого валика, його пористістю і хвилястістю, а також глибиною проплавлення поверхні. Ширину валика і глибину проплавлення вимірювали за допомогою штангенциркуля ШЦ-І-0,1, пористість та хвилястість оцінювали візуально за 8-бальною шкалою.

Твердість основного металу зразків і переплавленого валика визначали на твердомірі ТК-14-250 за методом Роквелла. Металографічні дослідження виконували за стандартною методикою. Вміст вуглецю в переплавленому шарі визначали за допомогою емісійного спектрального аналізу на приладіДФС-36.

У процесі досліджень встановлено, що для якісного формування переплавлених валиків (рис. 3) одним із основних факторів є стабільне горіння дуги.



**Рис. 3.** Зовнішній вигляд експериментального зразка з одиничними переплавленими валиками

Дуга горить стабільно (без обривів та коротких замикань) при постійній рівномірній подачі електрода до деталі з певною швидкістю, яка залежить від сили струму. Швидкість подачі електрода до деталі в діапазоні сили струму від 40 А до 80 А становила від 0,8 мм/хв до 1,2 мм/хв, довжина дуги при цьому становила від 2 мм до 2,5 мм.

Металографічні дослідження зразків, оброблених при струмі  $I=60$  А, напрузі  $U_d=28$  В та швидкості обробки  $V_{06}=12,6$  м/год, показали, що структура переплавленого валика в поперечному перерізі складається з трьох зон: зони переплавленого металу з характерною дендритною будовою, зони термічного впливу і безпосередньо основного металу. Вміст вуглецю в основному металі становив 0,40%, в переплавленому — 0,42%.

Підвищення твердості переплавленого шару до 58 HRC (рис. 4) отримали шляхом збільшення сили струму до 80 А.

Подальше підвищення сили струму від 80 А до 100 А не змінює твердість, що можна пояснити посиленням відпуску зміцненого шару вна-

слідок збільшення кількості тепла, внесеного в зразок електричною дугою.

Змінюючи силу струму від 40 А до 90 А (рис. 5) при напрузі від 24 В до 28 В, швидкості обробки 12,6 м/год та швидкості подачі електрода 1 мм/хв, було відзначено зростання ширини валика ( $h_B$ ), пористості ( $p_r$ ) і хвилястості ( $h_v$ ).

Оцінка результатів дослідження впливу швидкості обробки на якість обробленої поверхні (рис. 6) показала, що при її збільшенні поряд зі зменшенням хвилястості валика до мінімальних значень (при  $V_{об}=30$  м/год краї валика прямі, без відхилень) погіршуються інші якісні показники — зменшується ширина валика та зростає пористість. Сила струму при цьому становила  $I=70$  А, напруга  $U_d=24\dots 28$  В, швидкість подачі електрода  $V_c=1$  мм/хв.

Аналіз отриманих залежностей показав, що вони відповідають основним закономірностям дугових процесів зварювання неплавким електродом. Задовільна якість зміцненого шару (максимальна ширина переплавленого валика, низька та середня пористість та хвилястість) формується при силі струму від 50 А до 80 А; швидкість оброблення

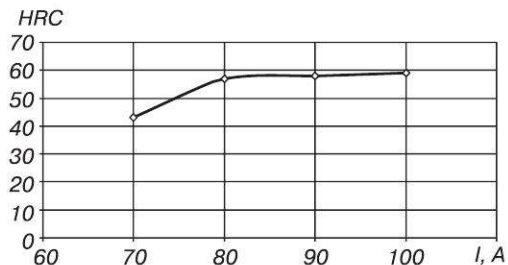


Рис. 4. Залежність твердості переплавленого шару від сили струму

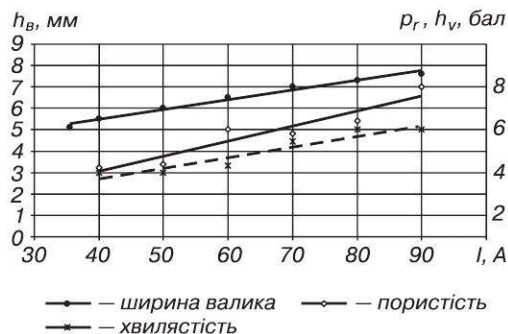


Рис. 5. Залежність якісних показників переплавленого шару від сили струму

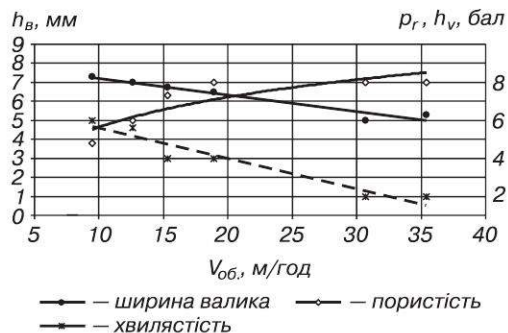


Рис. 6. Залежність якісних показників обробленої поверхні від швидкості обробки

при цьому повинна бути в межах від 10 м/год до 15 м/год. Глибина проплавлення при цих параметрах була в межах 1,5–2 мм.

**Висновок.** На основі виконаних досліджень встановлено, що для якісного формування переплавленого шару в процесі дугової обробки сталевих деталей вугільним стержневим електродом одним з основних факторів є стабільне горіння дуги. Для забезпечення стабільності процесу сила струму повинна бути в межах від 50 А до 80 А, швидкість обробки — від 10 м/год до 15 м/год, напруга на дузі — від 24 В до 28 В, швидкість подачі електрода до деталі — від 0,8 мм/хв до 1,0 мм/хв. За такого режиму збільшення твердості зміцненого шару для сталі марки 40Х в порівнянні з необробленими зразками становить 2,3 раза, переплавлений валик має задовільну пористість і хвилястість, а його ширина змінюється в межах від 6,0 мм до 7,5 мм.

**Перспективи подальших розробок у даному напрямі** полягають у використанні отриманих результатів для розроблення ефективної технології зміцнюючого відновлення деталей в процесі ремонту і модернізації сільськогосподарської техніки.

#### БІБЛІОГРАФІЯ

1. *Молодик М.В.* Наукові основи системи технічного обслуговування і ремонту машин у сільському господарстві / М.В. Молодик. — Кіровоград: КОД, 2009. — 182 с.
2. *Кулагин И.Д., Боржов А.П., Краснов Ю.И.* Дуговая цементация рабочих поверхностей стальных деталей // Физика и химия обработки материалов. — 1986. — № 6. — С. 84–88.
3. *Рудаков А.А.* Технология электродугового упрочнения поверхности деталей машин / А.А. Рудаков, В.К. Загорский // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. — 1996. — № 4. — С. 30–32.
4. *Гречкин Д.Н.* Контактно-дуговой метод повышения износостойкости деталей / Д.Н. Гречкин, Ю.И. Краснов, В.С. Семеновичков // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2006. — № 6. — С. 21–23.
5. *Рыжих Ю.Л.* Метод скоростной электродуговой цементации / Ю.Л. Рыжих, А.С. Юдников // Техника в сельском хозяйстве. — 2007. — № 1. — С. 39–41.
6. *Рыжих Ю.Л.* Методы скоростного электродугового борирования и экзотермического металлоплакирования для упрочнения и восстановления деталей / Ю.Л. Рыжих, В.В. Коршунов, А.С. Юдников, О.А. Пикало, В.Н. Саковцева // Ремонт, восстановление, модернизация. — 2007. — № 11. — С. 12–16.
7. *Юдников А.С.* Эффективное упрочнение деталей почвообрабатывающей техники — актуальная проблема в сельском хозяйстве. / А.С. Юдников, Ю.Л. Рыжих // Труды ГОСНИТИ. — 2008. — Т. 102. — С. 181–182.
8. *Провести дослідження, розробити групові технологічні процеси і засоби оснащення для зміцнення робочих поверхонь деталей прискореним науглецюванням (40.05-035.01П). Звіт про НДР (проміжний) ННЦ “ІМЕСГ” УААН, керівник роботи Молодик М.В., № держреєстрації 0107U012424. Глевах, 2008. — 38 с.*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДУГОВОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ  
НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ**

*Изложены результаты экспериментальных исследований процесса дуговой цементации. Определены факторы, которые влияют на качество упрочненного слоя*

**RESEARCH OF INFLUENCE OF PARAMETERS OF ARC CEMENTATION  
ON QUALITY INDICATORS OF THE STRENGTHENED LAYER**

*It is stated results of experimental researches of process of arc cementation. Factors which influence quality of the strengthened layer are define*

УДК 621.721

**НАПИЛЕННЯ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ  
ПЛАЗМОТРОНОМ В РЕЖИМІ ГЕНЕРАЦІЇ  
ЛАМІНАРНОГО ПЛАЗМОВОГО СТРУМЕНЯ**

**І.В. Смирнов**, канд. техн. наук, **А.В. Чорний**, асп.,  
**Б.Ю. Бакай**, магістр

*НТУ України "КПІ"*

---

*Проведено аналіз умов плазмового напилення порошкових матеріалів. Представлені вольт-амперні характеристики плазмотрону з виносним анодом та осцилограми напруги на дузі при різних витратах газу. Дослідження пористості напилених покриттів з застосуванням плакованих порошоків свідчать про перспективність використання плазмотрону в режимі генерації ламінарного плазмового струменя.*

---

**Проблема.** На даний час для плазмово-порошкового напилювання покриттів широкого поширення набули плазмотрони з турбулентним витіканням плазмових струменів, які поряд з відомими перевагами мають ряд недоліків. По-перше, турбулентний струмінь плазми, інтенсивно перемішуючись з холодною навколишньою атмосферою, швидко втрачає свою ентальпію. В результаті чого, довжина зони ефективного нагрівання порошку в поздовжньому напрямку зазвичай не перевищує 5–7 діаметрів сопла, що є недостатнім для ефективного нагріву і плавлення частинок керамічних тугоплавких порошоків. По-друге, вказане перемішування, поряд з турбулентними пульсаціями струменя плазми,