

НАПЛАВЛЕННЯ ТА НАПИЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ



Методичні рекомендації до лабораторних робіт з дисципліни
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
спеціальності «Матеріалознавство»

Хмельницький національний університет

НАПЛАВЛЕННЯ ТА НАПИЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ

*Методичні рекомендації до лабораторних робіт з дисципліни
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
спеціальності 132 «Матеріалознавство»*

*Затверджено на засіданні кафедри
трибології, автомобілів та матеріалознавства.
Протокол № 9 від 09.05.2024*

Хмельницький 2024

Наплавлення та напилення матеріалів : методичні рекомендації до лабораторних робіт з дисципліни для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 132 «Матеріалознавство» / В. А. Гончар, П. В. Каплун. Хмельницький : ХНУ, 2024. 27 с.

Укладачі: Гончар В. А., канд. техн. наук, доц.;
Каплун П. В., д-р техн. наук, проф.

Відповідальний за випуск: Диха О. В., д-р техн. наук, проф.

Випусковий редактор: Яремчук В. С.

Технічне редагування і верстка: Карпанасюк В. П.

Макетування здійснено редакційно-видавничим відділом Хмельницького національного університету (м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1). Підп. 10.06.2024. Зам. № 95є/24, електронне видання, 2024.

© ХНУ, 2024

Вступ

Дисципліна «Наплавлення та напилення матеріалів» є освітній компонент який займає провідне місце у фаховій підготовці здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, які навчаються за освітньо-професійними програмами у межах спеціальності 132 «Матеріалознавство».

Дисципліна, обсягом п'ять кредитів ЄКТС, складається з лекційного курсу та лабораторного практикуму і надає здобувачам знання щодо базових способів наплавлення, закономірностей формування структурного та фазового складу наплавлених і напилених шарів, особливостей технологій шарів різного функціонального призначення та складу, установок для наплавлення, а також навичок практичного використання одержаних знань.

Основна увага приділяється застосуванню сучасних методів при нанесенні покриттів, а також способам та засобам комплексного відновлення чи підвищення терміну експлуатації деталей машин, технічного обслуговування і контролю якості покращених поверхонь.

Мета дисципліни – формування теоретичних знань та практичних навичок з використання сучасних технологій нанесення поверхневого шару металів з метою покращення їх експлуатаційних та технологічних властивостей.

Завдання дисципліни – вивчення типових методик нанесення покриттів, виготовлення пристосувань технологічного обладнання, особливостей підбору відповідних попередніх підготовчих операцій, правильного підбору матеріалів для нанесення покриттів, вірного визначення фінішних операцій та методів контролю якості нанесеного покриття.

Здобувач, який завершив вивчення дисципліни, поглиблює і розширює формування загальних та фахових **компетентностей**: здатність враховувати соціальні, екологічні, етичні, економічні та комерційні міркування, що впливають на реалізацію технічних рішень; здатність дотримуватися професійних та етичних стандартів. Він також має досягти програмних **результатів навчання**, зокрема аналізувати основні види відмов деталей автомобілів, ідентифікувати їх причини та розробляти технологічні процеси відновлення зношених поверхонь деталей автомобіля.

Лабораторні роботи мають дослідницький характер, у кожній з них відповідно до теми викладені основні теоретичні положення та методика виконання робіт.

Перед виконанням роботи здобувач повинен ознайомитися зі змістом роботи, усвідомити її мету та завдання, засвоїти правила техніки безпеки при виконанні робіт в лабораторії нанесення покриттів, відповісти на контрольні питання викладача і отримати дозвіл на виконання роботи. Ступінь підготовки до виконання лабораторної роботи перевіряється шляхом усного опитування на початку заняття. Здобувач, який не засвоїв необхідного теоретичного

матеріалу, до виконання роботи не допускається. За результатами її виконання складається звіт.

Звіт з лабораторної роботи має містити назву та її мету, вихідні дані, детальний розрахунок необхідних показників, результати та висновки з виконаної роботи. Здобувач, який не підготував звіт з роботи, до її захисту не допускається. Захист роботи проводиться на наступному занятті у міру їх виконання. Пропущене лабораторне заняття здобувач відпрацьовує не пізніше передостаннього за розкладом заняття.

Оцінювання лабораторних робіт здійснюється за інституційною чотирибальною шкалою. Оцінки («відмінно», «добре», «задовільно», «незадовільно») виставляються викладачем в електронному журналі групи. Оцінка за практикум є складовою підсумкової семестрової оцінки здобувача.

Критерії оцінювання

Оцінка **«відмінно»** виставляється здобувачу, який повністю виконав поставлені завдання, має грамотний, логічний виклад відповіді (як в усній, так і у письмовій формі), якісне зовнішнє оформлення роботи. Здобувач не вагається при видозміні запитання, вміє робити детальні та узагальнюючі висновки. При відповіді допустив дві–три несуттєві похибки.

Оцінку **«добре»** отримує здобувач, який орієнтується у вивченому матеріалі; свідомо використовує теоретичні знання для вирішення практичних задач; виклад відповіді грамотний, але у змісті і формі відповіді можуть мати місце окремі неточності, нечіткі формулювання закономірностей тощо. Відповідь здобувача має будуватися на основі самостійного мислення. Здобувач у відповіді допустив дві–три несуттєві помилки.

Оцінку **«задовільно»** заслуговує здобувач, який не володіє знаннями основного програмного матеріалу в обсязі, необхідному для подальшого навчання та практичної діяльності за професією, не справляється з виконанням практичних завдань, передбачених програмою. Як правило, відповідь здобувача будується на рівні репродуктивного мислення, він має слабкі знання структури курсу, допускає неточності і суттєві помилки у відповіді, вагається при відповіді на видозмінене запитання. Разом з тим набув навичок, необхідних для виконання нескладних практичних завдань, які відповідають мінімальним критеріям оцінювання і володіє знаннями, що дозволяють йому під керівництвом викладача усунути неточності у відповіді.

Оцінка **«незадовільно»** виставляється здобувачу, у якого розрізнені, безсистемні знання, не вміє виділяти головне і другорядне, допускається помилок у визначенні понять, перекручує їх зміст, хаотично і невпевнено викладає матеріал, не може використовувати знання при вирішенні практичних завдань. Як правило, оцінка «незадовільно» виставляється здобувачу, який не може продовжити навчання без додаткової роботи з вивчення дисципліни.

Набуті при вивченні дисципліни знання є необхідними для розроблення технологічних процесів відновлення деталей різного призначення,

впровадження нових енерго- та матеріалозберігаючих методів відновлення і оцінювання їх ефективності.

Лабораторна робота 1.

Визначення швидкості частинок при газотермічному напиленні

Мета: формування практичних навичок з визначення впливу геометрії частинок на їх швидкість та розподіл швидкості у плазмовому струмені.

Завдання: на прикладі струменя плазмотрона встановити вплив розмірів частинок, розподіл швидкості в поперечному перерізі і за довжиною плазмового струменя.

Необхідні прилади, матеріали: установка УГМ-1; піскоструйний блок; ванадієвий дріт; швидкодійоюча кінокамера; зошит з лабораторних робіт; технічний паспорт установки; опис техніки ведення процесу напилення.

Теоретичні відомості та методичні рекомендації

Умови проведення дослідів. Швидкість частинок визначали при плазмовому розпиленні ванадієвого дроту, шляхом фотографування треку їх руху у двофазному струмені плазмоутворюючого газу і частинок, швидкодійоючою кінокамерою. Встановлено, що швидкість частинок залежить від діаметра частинок d_c , густини розпиленого матеріалу γ_m , траєкторії руху частинок і потужності плазми W .

1. Швидкість частинок V_c , м/с, ванадію різного діаметра на осі плазмового струменя при різних значеннях потужності плазми W на відстані $X = 0,04$ м від зрізу сопла плазмотрона записуємо в таблицю.

W , кВт	Діаметр d , мкм							
	50	100	150	200	250	300	350	400
2								
4								
6								
8								
10								

Графік залежності швидкості частинок V_c від їх розміру d_c при різних значеннях потужності W , кВт:



2. Обчислити V_q за формулою: $V_q = V_{nl} \sqrt{\frac{3\gamma_{nl} C_x}{2\gamma_V d}} \cdot X$.

За умови, що $W = 4$ кВт, $X = 0,04$ м, $\gamma_{nl} = 0,62 \cdot 10^{-6}$ г/см³, $\gamma_V = 5,6$ г/см³, $V_{nl} = 320$ м/с, коефіцієнт аеродинамічного опору C_x залежить від d частинок:

d_q , мкм	50–100	150–250	300–400
C_x	300	100	40

Розрахункові V_q і експериментальні V_q^* значення швидкостей частинок різного d у центральній зоні струменя, при $W = 4$ кВт.

d_q , мкм	50	100	150	200	250	300	360	400
V_q , м/с								
V_q^* , м/с								

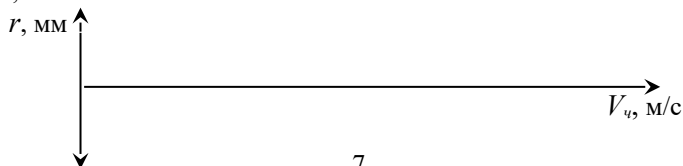
Графік відповідності експериментальних значень швидкості частинок V_q^* розрахунковим V_q , при $W = 4$ кВт:



3. Швидкість V_q , м/с різного діаметра d в зоні контакту радіусом r , мм з поверхнею основи.

d , мкм	r , мм						
	3	8	13	18	23	28	33
100...150							
150...200							
250...350							

Графік швидкості частинок V_q в поперечному перерізі струменя плазми r , мм:



– r , мм

4. Швидкість $V_{\text{ч}}$, м/с різного діаметра d визначена на різній відстані L , мм від зрізу сопла плазмотрона у центральній зоні потоку.

d , мкм	L , мм					
	10	20	40	60	80	100
75						
100						
150						
200						

Графік залежності швидкості частинок $V_{\text{ч}}$ від дистанції напилання L , мм:



Загальні висновки з роботи.

Контрольні питання

1. Фізична сутність і класифікація способів газотермічного напилання.
2. Характеристика та класифікація газотермічних покриттів.
3. Структурно-технологічна схема виробництва деталей з газотермічним покриттям.
4. Підготовка газів і напилувальних матеріалів для газотермічного напилання.

Література: [1, с. 117–132, 2, с. 25–30]

Лабораторна робота 2.

Аналіз теплових процесів на поверхні виробу при газотермічному напиленні

Мета: ознайомитись з характером теплових процесів, що виникають на поверхні виробів при газотермічному напиленні.

Завдання:

- 1) встановити розподіл теплового потоку двофазного струменя в зоні нагрівання поверхні виробу;
- 2) визначити залежність коефіцієнта зосередженості теплового потоку від дистанції напилення;
- 3) оцінити ефективність нагрівання поверхні виробу частинками матеріалу, що напилюють, і струменем плазми залежно від дистанції напилення.

Необхідні прилади, матеріали: ручний металізатор МПІ-4; дріт для металізації; швидкодійні точкові термодатчики; імпульсний осцилограф; зошит з лабораторних робіт; технічний паспорт МПІ-4. Вивчення конструкції та принципу роботи металізатора. Вивчення основних вузлів машини за кресленнями та паспортними характеристиками. Зняття зовнішніх характеристик з осцилографа.

Теоретичні відомості та методичні рекомендації

1. Умови проведення дослідів.

Нагрівання плоскої поверхні проводили струменем плазми, при розпиленні частинок срібного дроту. Вісь струменя плазми була розташована перпендикулярно до поверхні напилення. Вимірювання теплового потоку в межах зони плями нагрівання проводили за допомогою швидкодійних точкових термодатчиків та імпульсних осцилографів. Коефіцієнт зосередженості теплового потоку і ефективність нагрівання поверхні основи оцінювали калориметричними методами.

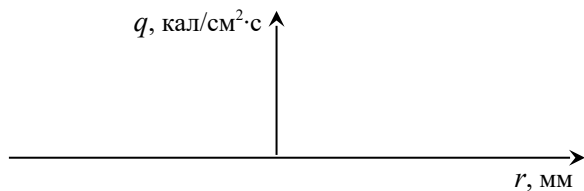
2. Результати дослідів.

2.1. Експериментальні значення теплового потоку (q , кал/см²·с) на відстані r від осі плазмового струменя при різних значеннях потужності дуги W . Експериментальні значення занести у таблицю.

W^* , кВт	r , мм								
	0	2	4	6	8	10	12	14	16
6									
12									

18									
----	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Графік $q = f(r)$:



2.2. Коефіцієнт зосередженості теплового потоку K , см^{-2} при різних значеннях дистанції напилання L , мм.

L , мм							
K , см^{-2}							

Графік $K = f(L)$:



2.3. Умовний діаметр D_H зони нагрівання поверхні основи при різних значеннях дистанції напилання обчислений за формулою:

$$D_H = \frac{3,46}{K}$$

Результати розрахунків:

L , мм						
D_H , мм						

Графік $D_H = f(K)$:



$K, \text{см}^{-2}$

2.4. К.к.д. нагрівання виробу частинками ($\eta_u, \%$) і струменем плазми ($\eta_s, \%$) при різній дистанції наплення $L, \text{мм}$.

$L, \text{мм}$					
$\eta_u, \%$					
$\eta_s, \%$					

Сумісна дія $\eta = \eta_u + \eta_s$:



Загальні висновки по роботі.

Контрольні питання

1. Фізична сутність і класифікація способів газотермічного наплення.
2. Характеристика та класифікація газотермічних покриттів.
3. Структурно-технологічна схема виробництва деталей з газотермічним покриттям.
4. Підготовка газів і напилувальних матеріалів для газотермічного наплення.

Література: [2, с. 13–17]

Лабораторна робота 3.

Аналіз процесу зчеплення частинок матеріалу, що напилюють з поверхнею основи при газотермічному напиленні

Мета: проаналізувати фактори, що впливають на зчеплення частинок з поверхнею, що обробляється.

Завдання: 1) описати мікроповерхні ударної взаємодії частинок, що напилюють і поверхні основи; 2) встановити залежність розмірів ділянок хімічної взаємодії та міцності зчеплення від енергетичних параметрів процесу.

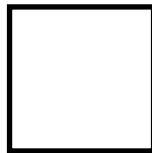
Необхідні прилади, матеріали: ручний металізатор МГІ-4; дріт для металізації, розривна машина, електронний мікроскоп «СММ-2000Т». Опис техніки ведення процесу. Знайомство з впливом параметрів на процес щеплення. Фото мікроструктури покриттів.

Теоретичні відомості та методичні рекомендації

1. Аналіз процесів удару і твердіння розплавленої частинки на поверхні основи при газотермічному напиленні (ГТН).

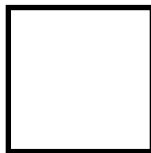
2. Умови проведення дослідів. Досліди проводять на модельному матеріалі (сріблі), оскільки воно мало окиснюється і має високу пластичність, що забезпечує утворення ділянок схоплювання з чітко вираженим рельєфом після відривання частинок від основи, на межах контакту. Частинки срібла діаметром від 100 до 200 мкм відривають механічним способом і зону деформації поверхні розглядали за допомогою електронного мікроскопа методом сканування.

2.1. Необхідно вклеїти фотографії поверхні срібної основи під привареною частинкою після її відривання (відповідно до наведеної схеми).



×300

Вигляд зони у центрі контакту частинки з основою діаметром D
(видно зону D_x , в межах якої частинка приварилась до основи)



×800

Вигляд зони D_x схоплювання,

в межах яких утворився шорсткий рельєф при її відриванні



×1000

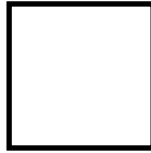


×3000



×6000

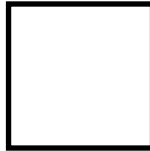
Вигляд зони D_x , яка заповнена ділянками схоплювання в межах яких утворився шорсткий рельєф при її відриванні.



×600

Вигляд ділянки схоплювання, яку майже повністю заповнили D_x внаслідок чого міцність привареної частинки наблизилась до максимально можливої.

Утворення шару покриття, частинка більших розмірів покрила меншу частинку і відірвала її від основи.



×800

Вигляд контактної поверхні частинки відірваної від основи.

2.2. Опис контактних процесів.

Після удару розплавленої частинки до основи в місці їх зіткнення утворюються ділянки схоплення розмірами $D_x = 200\text{--}700$ нм. Після відривання частинки від основи на її поверхні в місцях схоплювання залишаються сліди матеріалу, вирваного з частинки (світлі виступи на фотографіях, які називають ділянками схоплювання). З плином розвитку реакції хімічної взаємодії число ділянок схоплення збільшується і при досягненні міцності зчеплення близької до максимально можливої, вони практично зливаються та заповнюють всю центральну зону D_x . Діаметр центральної зони дещо більший діаметра частинки D . Це зумовлено тим, що на площі діаметром D діє тиск удару і деформації частинки, а ближче до краю, тиск спадає і приварювання погіршується. Однак при перегріванні основи або частинки температура компенсує зниження тиску і частинки приварюються повністю ($D_x = D$).

Накладаючись одна на іншу, частинки утворюють шар покриття. Якщо когезія більша за адгезію, то при відриванні покриття, руйнування відбувається на межі між основою і частинкою, а якщо навпаки, то між частинками.

3. Визначення розмірів ділянки хімічної взаємодії і сили відривання частинки залежно від енергетичних параметрів процесу.

Позначення:

D_x – діаметр ділянки хімічної взаємодії;

T_1 – температура частинки;

T_2 – температура поверхні основи;

$T_{пл}$ – температура плавлення матеріалу частинки; V – швидкість частинки.

Експериментальні значення розмірів ділянки хімічної взаємодії і сили відривання частинки подати у таблиці.

$T_2, ^\circ\text{C}$	20	100	200	300	400	500	РН*
D_x , мкм							А
							Б
							В
$P \cdot 10^2$, Н							А
							Б
							В

Режими напилення (РН):

– А: $T_1 > T_{пл}$, $V = 40$ м/с;

– Б: $T_1 < T_{пл}$, $V = 40$ м/с;

– В: $T_1 < T_{пл}$, $V = 5$ м/с.

На основі отриманих результатів потрібно обчислити відносні розміри ділянки схоплення D/D_x за умови, що $D = 200$ мкм, а також міцність привареної частинки до поверхні основи за виразом:

$$\sigma_a = \frac{P}{F_x}, \text{ де } F_x = \frac{\pi D_x^2}{4}.$$

При різних енергетичних параметрах процесу (T_1 , T_2 , V).

Результати розрахунків представимо у таблиці.

$T_2, ^\circ\text{C}$	20	100	200	300	400	500	РН*
D_x/D , мкм							А
							Б
							В
σ_a , МПа							А
							Б
							В

Лабораторна робота 4.

Приготування зразків для металографічного дослідження мікро- структури

Мета: формування практичних навичок з виготовлення та підготовки шліфів з металевих, полімерних композиційних матеріалів для металографічних досліджень;

Завдання: виготовити шліфи з металевих матеріалів.

Необхідні прилади, матеріали: зразки, шліфувальна шкурка типу І з абразивом, полірувальна паста, знежирувач ацетон (C_3H_6O).

Теоретичні відомості та методичні рекомендації

Передумовою для всіх металографічних досліджень є виготовлення шліфів, які можуть бути використані для мікроскопічного дослідження за допомогою світлового і електронного мікроскопів, для визначення мікротвердості, а також кількісного вимірювання структурних складових і електроннозондового мікроаналізу.

Правильне виготовлення шліфів має надзвичайно важливе значення, оскільки від цього залежить правильність тлумачення мікроструктур. Не можна заздалегідь запропонувати оптимальну методику виготовлення шліфа, і жодну з розроблених методик можна вважати оптимальною.

Основним моментом при виготовленні металографічних шліфів є запобігання ушкодження поверхні шліфа, що полягає в зміні мікроструктури поверхнього шару матеріалу в результаті деформації або нагрівання.

Метою всіх стадій виготовлення шліфа є послідовне створення поверхні необхідної якості. Таким чином, кожна наступна стадія процесу проводиться з метою видалення пошкодження поверхні, внесеного попередньою обробкою.

Добре приготований металографічний шліф повинен задовольняти ряд вимог. Перш за все, він повинен бути **типовим** для цього зразка матеріалу. На поверхні не повинно спостерігатися полірованих подряпин і ям, а також плям в результаті взаємодії з рідинами. Необхідно зберегти після обробки всі неметалеві включення та інші елементи, що відрізняються підвищеною крихкістю. Шліф повинен бути досить плоским для досліджень при великих збільшеннях.

Виготовлення та підготовка металографічних шліфів зазвичай складається з п'яти основних операцій:

- 1) вирізування зразка (не обов'язково);
- 2) закріплення зразка або монтування (не обов'язково);
- 3) шліфування;

- 4) полірування;
- 5) травлення (виявлення мікроструктури).

Вирізування зразків. Металографічний зразок часто відбирається від великого обсягу матеріалу. Вибір місця вирізування зразка диктується метою дослідження.

Використовують кілька методів вирізування: абразивним кругом та пилами; електролітичний та електроіскровий. Дещо осторонь стоїть метод дослідження зламу. Фрактографія – наука про особливості зламів – вивчає їх при малих, або при великих збільшеннях в електронному мікроскопі за допомогою методу «Реплік». Фрактограми дають інформацію про механізми руйнування зразків або молотом, або під впливом постійного тиску. Місце руйнування, зазвичай визначається нанесенням на зразок натиску або надрізу.

Якщо зразки мають тонкий поверхневий шар, що відрізняється від основного металу за структурою і фазовим складом (наприклад, при нанесенні покриттів), то готують нові шліфи, площина яких розташована під кутом до поверхні зразка.

Найчастіше використовується іскрове різання або різання абразивними кругами. Для різання сталей найкраще використовувати абразивні круги з Al_2O_3 , для кольорових металів – з SiC.

Для м'яких матеріалів використовують круги з твердою зв'язкою, а для різання твердих – з м'якою.

У всіх випадках різання абразивним кругом слід проводити з використанням охолоджувальної рідини.

Монтування зразків. При дослідженні деяких виробів (тонкі аркуші, дріт тощо) їх механічна обробка надто складна без застосування спеціальних пристосувань. У таких випадках виріб, що досліджують, потрібно покласти в нейтральне, по відношенню до нього, тверде середовище та обробляти скомбінований таким чином зразок, як одне ціле так, щоб в площину шліфа потрапив потрібний перетин виробу. Закріплення зразків роблять для того, щоб було зручно готувати і досліджувати шліфи, які мають складну конфігурацію, низьку міцність або незручні для виготовлення розміри. Крім того, буває необхідно закрити приповерхневі шари зразків від руйнування при шліфуванні. При використанні різних автоматичних установок потрібно поміщати зразки в утримувачі спеціального типу, під які сконструйовані механізми.

Можна виділити наступні **основні види закріплення зразків:**

– **монтування за допомогою речовин, що клеять** – використовуються в спеціальних випадках, наприклад, для кріплення зразків листового типу, фольги, коли товщина зразка набагато менше лінійних розмірів поверхні, що шліфується. Для кріплення зразка до бруска більшого розміру з іншого матеріалу використовують клей, липку стрічку, віск, замазку;

– **монтування в затискачах** – найчастіше використовують для закріплення тонкого листового матеріалу, коли потрібно приготувати шліф за товщиною зразка. Особливо зручний такий спосіб кріплення при обробці

великої кількості однотипних зразків. Одним з найпростіших пристосувань для цієї мети є гвинтовий затиск (струбцина).

Переваги способу: швидкий монтаж, виключений завал крайок. Недоліки: скупчення в зазорах частинок абразиву і рідини, що може зіпсувати шліф;

– **запресовування зразків** – зразок при нагріванні запресовується в формувальний матеріал, наприклад, фенольний бакеліт, акрилові смоли. Ці речовини термореактивні матеріали. Процес запресовування здійснюється при спільному впливі тиску і нагрівання.

Цей метод закріплення зразків застосуємо тільки у тих випадках, коли тиск і температура не змінюють мікроструктуру і не деформують зразок.

У випадках, коли передбачається електролітична обробка зразків, їх зручно запресовувати в електропровідні пресувальні пристрої, заздалегідь передбачивши можливість підвести струм. Більшість формувальних електропровідних матеріалів є сумішшю металевого порошку (зазвичай мідного або залізного) з термопастою. При запресовуванні частинки металу забезпечують добрий контакт зі зразком;

– **холодне закладення зразків**. Холодне закладення може супроводжуватися незначним нагріванням.

Холодне монтування є по суті заливкою. Зразок поміщають всередину ливарної форми, яку заливають речовиною, що твердіє. Для заливки використовують:

– органічні речовини (поліефірні, епоксидні, акрилові смоли, зубопротезну пасту АКР тощо);

– неметалеві матеріали з низькою $T_{пл}$ наприклад, сірку;

– сплави з низькою $T_{пл}$, (наприклад, сплав Вуда).

Для якісного приготування шліфа дуже важливо вірно підібрати матеріали для ливарної форми і для заливки.

Зазвичай твердість зразка повинна бути трохи вищою за твердість форми і середовища. З іншого боку, бажано, щоб їх пластичність була не гірше пластичності зразка.

Для детального дослідження приповерхневих шарів металу частіше використовують косі шліфи. Зазвичай зразок розташовують в ливарній формі під деяким кутом або вертикально. В результаті на лінії перетину площини полірування з поверхнею зразка, спостерігається «розширення» перетину, яке дорівнює косекансу кута поверхні.

Окремим завданням при підготовці зразків для досліджень є збереження плоскої поверхні у крайок зразка. При шліфуванні і полірування між вмонтованим зразком і формувальним матеріалом неминуче створюється рельєф.

Запобіганням крайок від завалювання може сприяти одна з трьох операцій:

– застосування матеріалу, що «підтримує»; – нанесення покриття перед монтуванням; – введення домішок в формувальний матеріал.

У більшості випадків як матеріал, що підтримує, застосовують металеві пластинки, прилеглі безпосередньо до крайок зразка. Найкращі результати отримують, коли пластинки зроблені з того самого матеріалу, що і зразок, або повинні мати таку саму здатність до шліфування та полірування. Крім того, матеріал, що підтримує, повинен бути схожим з зразком як у відношенні до травника, так і до інших поверхневих методів впливу, які передбачається використовувати.

Нанесення поверхневих покриттів з відповідних матеріалів зазвичай здійснюють гальванопластикою або хімічним осадженням. Найчастіше наносять покриття з заліза, нікелю, міді. Найчастіше застосовують двохшарове операційне нанесення для забезпечення кращого зчеплення покриття зі зразком. Товщина покриття 50–150 нм.

Зазвичай до формувального матеріалу додають невеликі тверді частинки з матеріалу, що є тотожним за властивостями з матеріалом шліфа. Відповідні добавки-крупинки сірого чавуну, скляні волокна, частинки оксидів або карбідів.

Шліфування є найбільш важливою операцією в технології виготовлення зразків. Велике значення цієї операції полягає в тому, що препарат повинен уважно контролювати ступінь додаткового механічного пошкодження поверхні, яке має бути видалено подальшим лакуванням.

Абразивні матеріали, що застосовуються при шліфуванні, класифікують за розміром частинок. Шліфування повинно починатися з найбільш дрібнозернистого матеріалу, здатного за дві–п'ять хвилин створити вихідну рівну поверхню зразка і усунути ефект вирізки. Кожна наступна операція шліфування супроводжується зменшенням зернистості абразиву, що застосовують.

Обов'язковою умовою є застосування «мокрого» шліфування, проте використовується і сухе. Для правильного вибору шліфувальних шкурочок необхідно знати їх маркування, яке включає: тип (для металів); спосіб нанесення абразивного матеріалу; розміри листів (рулонів); марку паперу-основи; марку абразивного матеріалу; зернистість; тип зв'язку; клас зносостійкості.

Приклад: ІЕ620×50 П2 15А 25-НМА ДСТ ... – паперова шліфувальна шкурка типу І з абразивом, нанесеним електростатичним способом, шириною 620 мм, довжиною 50 м; папір основа марки 0–200, абразив – нормальний електрокорунд марки 15А зернистістю 25-Н на міздровому клеї М, клас зносостійкості – А.

Полірування зразка. Полірування металографічних шліфів проводять для усунення наявних після його виготовлення нерівностей поверхні без деформування металу. Полірування шліфа може здійснюватися **механічним, електролітичним** або **хімічним** способами.

При **механічному поліруванні** зразки обережно обробляють тонким абразивом, дія якого принципово не відрізняється від дії абразивів при шліфуванні. Найбільш часто для металографічного полірування використовують окиси алюмінію, хрому та заліза.

Перед приготуванням полірувальної суспензії полірувальні матеріали слід піддавати відмочуванню у великих кількостях води (на один літр води один-два грами порошку), відкидаючи фракцію, яка осіла протягом першої години.

Механічне полірування проводять на спеціальному полірувальному верстаті, диск якого обтягнутий фетром, сукном або оксамитом, або вручну. Сплави, в структурі яких є включення, що легко викришуються, рекомендується полірувати на тканинах, позбавлених ворсу, наприклад, на фетрі.

Полірувальний диск змочують полірувальною рідиною, що складається з води, у якій в стані суспензії знаходяться дуже дрібнодисперсні частинки полірувального порошку: окис хрому, окис алюмінію, окис заліза або інші сполуки. Можливе використання суспензій з полірувального порошку і органічних рідин (спирту, гасу, гліцерину).

При поліруванні зразок перший час краще тримати в такому положенні, при якому напрям руху диска є перпендикулярним до напрямку рисок від останньої шліфувальної операції. При цьому легше вловити момент зникнення рисок. При обробці на дисках зручніше і безпечніше тримати зразок на тій частині диска, яка рухається від шліфувальника. Зразок не слід сильно притискати до диска.

Полірування триває 5–10 хв. В кінці полірування зразок рекомендують повільно повертати проти обертання диска. Полірування закінчують після того, як мікрошліф набуває дзеркальну поверхню. Знову ж правильним критерієм високої якості поверхні мікрошліфа є відсутність на ній дефектів у вигляді рисок.

У ряді випадків, коли механічне полірування не дає задовільних результатів (дуже м'які метали і сплави) або його не можна застосувати через зміцнення поверхні шару шліфа, застосовують **електролітичне** або **хімічне** полірування.

Оцінка якості металографічного шліфа. Готовий шліф не повинен мати подряпин від шліфування, сторонніх забруднень, поверхня його повинна бути плоскою. Невеликий «завал» країв шліфа допустимий тільки у тому випадку, коли дослідження країв не передбачається.

Найбільшій чистоті шліфа слід домагатися при дослідженні неметалевих включень. Абсолютно неприпустимо наявність на шліфі сторонніх забруднень, які можуть бути прийняті за неметалеві включення. Глибина рельєфу металографічного шліфа не повинна перевищувати глибини фокуса об'єктива, котрий застосовують. При вивченні мікроструктури зі збільшенням до 100 разів максимальна глибина рельєфу не повинна перевищувати 4 мкм. При великих (максимальних) збільшеннях можливо допускати глибину рельєфу не більше 0,5 мкм.

Виявлення мікроструктури металів і сплавів. Відполірований зразок, перш за все, потрібно вивчити під мікроскопом в непроtraitованому

стані. Вивчення непротираженого шліфа дозволяє визначити наявність дефектів (пор, тріщин тощо) і неметалічних включень.

Поверхню відполірованого зразка потрібно промити, знежирити і висушити. Для знежирення застосовують спирт етиловий (C_2H_5OH), спирт метиловий (CH_3OH), ефір етиловий ($C_4H_{10}O$), ацетон (C_3H_6O).

Зразки промивають в окремих випадках тими самими рідинами, що і знежирюють, але частіше за все водою (водопровідною або дистильованою). Після промивання зразок висушують фільтрувальним папером або підігрітим сухим повітрям. Розглядати непротиражені зразки потрібно при двох збільшеннях: при малому (50–100) для того, щоб скласти загальне уявлення про зразок, і при великому – для вивчення непротираженої поверхні, зокрема, будову і колір неметалічних включень вивчають при великих збільшеннях.

Більшість способів виявлення мікроструктури зводиться до виявлення меж між фазами, до отримання рельєфу на поверхні зерен і фарбування фаз або структурних складових. При цьому вдається виявити якісну відмінність фаз, двійникові утворення, блочну структуру і орієнтування зерна відносно площини шліфа і взаємну орієнтацію зерен.

На сьогодні основними способами виявлення мікроструктури є:

- хімічне травлення розчинами;
- електрохімічне травлення за допомогою електроструму;
- «теплове травлення» дією кисню повітря при високих температурах;
- при високій температурі з застосуванням реагентів або у вакуумі;
- травлення в солях при відносно високих температурах;
- катодне травлення у вакуумі з струмом високої напруги;
- за розбіжністю магнітних і немагнітних фаз при додаванні магнітного поля або без нього.

– за зміною обсягу при вторинних перетвореннях. Найбільшого поширення набули перші два способи виявлення мікроструктури.

Під дією хімічних реагентів в чистих металах і однофазних сплавах, перш за все, виявляються межі між окремими зернами. При більш тривалій інтенсивній дії реагенту на окремих зернах виявляють фігури травлення, які зазвичай мають правильну геометричну форму, що відповідає кристалічній будові металу.

Принципові особливості процесів, що протікають при виявленні мікроструктури: процеси протікають на поверхні металу протягом порівняно коротких часових відрізків; їх інтенсивність пов'язана з різницею в природі фаз і агресивністю середовища, що впливає; процес впливу повинен бути перерваний і не доведений до стадії глибокого роз'їдання металу;

Відтінки металу на межах і всередині зерна різняться рівнями вільної енергії. В електрохімічній парі (межа зерна – його поверхня) електродний потенціал на межі має більш негативне значення, ніж за зерном. Розчинення відбувається і на поверхні зерна, однак, з меншою швидкістю, ніж на межах. Межі зерен травлення позначаються тонкими темними лініями через втрату

відбитого світла в поглибленнях між зернами. Також відбувається і розчинення шарів металу на межах зерен, вони стають все більш поглибленими і широкими, витравлення шарів відбувається інтенсивно.

Виготовлення та підготовка металографічних шліфів складається з п'яти операцій:

- 1) вирізування зразка (не обов'язково);
 - 2) закріплення зразка або монтування (не обов'язково);
 - 3) шліфування;
 - 4) полірування;
 - 5) травлення (виявлення мікроструктури).
- Зробити висновки.

Контрольні питання

1. Сутність основних операцій процесу підготовки поверхонь деталей перед газотермічним напиленням.
2. Технологічні вимоги до конструкції поверхонь напилювальних деталей.
3. Активація поверхонь напилювальних деталей та виробів.
4. Струменево-абразивна обробка поверхонь напилювальних виробів.
5. Технологія нанесення покриттів газополуменевим напиленням. Сутність процесу, переваги, недоліки і технологічні можливості.

Література: [1, с. 188–200; 2, с. 109–112]

Лабораторна робота 5.

Дослідження залежності якості наплавленого металу від його хімічного складу

Мета: дослідження зв'язку між вихідними матеріалами та властивостями оброблених деталей.

Завдання: експериментально дослідити вплив змін складу наплавлених шарів на їх твердість.

Необхідні прилади, матеріали: джерело живлення ВДГ-303-1; зварювальний дріт Св-08Г2С; балон з CO₂; деталь; штангенциркуль.

Теоретичні відомості та методичні рекомендації

У більшості випадків у наплавлених низьколегованих композиціях спостерігається пропорційна залежність між твердістю та зносостійкістю. Твердість матеріалу підвищується зі збільшенням вмісту вуглецю і тому більш зносостійким виявляється метал, склад якого відповідає середньолегованим сталям. Однак підвищення в наплавленому металі кількості вуглецю ускладнює наплавлення через необхідність попереднього підігріву деталі для уникнення тріщин. Тому для підвищення зносостійкості наплавлений метал рекомендують легувати хромом, марганцем, молібденом та іншими елементами при обмеженій кількості вуглецю. Враховуючи роль вуглецю, його еквівалент використовують, з одного боку, як показник здатності до наплавлення, з іншого – як показник твердості наплавленого шару. За рекомендаціями Міжнародного інституту зварювання для низьколегованих композицій вуглецевий еквівалент розраховують за формулою:

$$C_{екв} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14}. \quad (5.1)$$

Між вуглецевим еквівалентом і максимальною твердістю нанесеного шару при наплавленні електродами існує залежність:

$$H_{max} = 660C_{екв} \pm 40, \quad (5.2)$$

де H_{max} – максимальна твердість за Вікерсом.

Електроди, які використовують для ручного наплавлення вуглецевих і низьколегованих сталей забезпечують різний склад наплавлених шарів.

1. Ознайомитись з обладнанням та правилами його використання.

2. Встановити режими і провести наплавлення валиків різними електродами (за вказівкою викладача).
3. Дані по електродах та хімічному складу занести до таблиці 5.1.
4. Визначити вуглецевий еквівалент та розрахункове значення твердості для кожного складу наплавленого матеріалу.
5. Дані вимірювань та розрахунків занести до таблиці 5.2.
6. Підготувати поверхню кожного валика до вимірювання твердості.
7. Зробити висновки.

Таблиця 5.1 – Марка та хімічний склад електрода

Номер з/п	Марка електроду	Склад елементів, %						
		C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V
1								
2								
3								
4								
5								
...								

Таблиця 5.2 – Результати експерименту

Номер з/п	Марка електроду	Вуглецевий еквівалент, $C_{екв}$	Розрахована твердість, H_{max}
1			
2			
3			

Контрольні питання

1. Для чого існує вуглецевий еквівалент?
2. Від чого залежить величина вуглецевого еквіваленту?
3. Які є способи підвищення зносостійкості наплавленого металу?
4. Для яких матеріалів справедливі формули, за допомогою яких проводились розрахунки в лабораторній роботі?
5. Показником чого є вуглецевий еквівалент?
6. Який основний хімічний елемент використовується при розрахунку вуглецевого еквіваленту?
7. Що таке здатність до наплавлення?

Література: [1, 205–208; 3, 5–20]

Лабораторна робота 6.

Особливості формування валиків при наплавленні під шаром флюсу

Мета: дослідження впливу технологічних параметрів на геометрію наплавленого матеріалу.

Завдання: експериментальне дослідження геометричних параметрів форми валиків від умов наплавлення.

Необхідні прилади, матеріали: джерело живлення ВДУ-504, дріт зварювальний, флюс АН-348А, сталеві пластини/

Теоретичні відомості та методичні рекомендації

Характерною особливістю наплавлення під шаром флюсу є провар основного металу. Частка основного металу в наплавленому валику визначається співвідношенням площі проплавлення основного металу F_o до площі всього валика F_n :

$$\gamma = \frac{F_o}{F_o + F_n} = \frac{F_o}{F}, \quad (6.1)$$

де F – площа, що утворюється плавленням електрода.

Величина γ коливається в широких межах. У звичайних умовах вона дорівнює 0,6–0,65. При наплавленні глибокий провар непотрібний, тому застосовують різні технологічні прийоми, які дозволяють знизити глибину провару γ .

Геометричні параметри валиків (ширина – B , глибина проплавлення – H , збільшення валика – e) і відповідно γ залежать від погонної енергії наплавлення:

$$\frac{q}{V_n} = \frac{0,24U_d \cdot I_d \cdot \eta}{V_n}, \quad (6.2)$$

де I_d – струм дуги, А; U_d – напруга дуги, В; η – ефективний коефіцієнт корисної дії процесу нагрівання (при наплавленні під флюсом $\eta = 0,7 - 0,85$); V_n – швидкість наплавлення, см/с; 0,24 – коефіцієнт співвідношення електро-технічних і теплових одиниць, кал/Дж.

Погонна енергія знаходиться в прямій залежності від перерізу наплавленого валика:

$$\frac{q}{V_n} = 150 \cdot F_n, \text{ кал/см}, \quad (6.3)$$

де F_n – площа перерізу валика в мм².

Для правильного регулювання режиму наплавлення необхідно знати, як впливають сила струму, діаметр електрода, напруга дуги та швидкість наплавлення на формування валика.

Із збільшенням зварювального струму (при цій напрузі та швидкості переміщення дуги) збільшується об'єм рідини ванни, оскільки збільшується кількість дроту, який розплавляється, та більше тепла виділяється на основний метал. Тиск дуги збільшується, внаслідок чого підсилюється викидання рідкого металу з кратера. Дуга заглиблюється в основний метал. Глибина та площа проплавленого металу збільшується, а ширина провару практично не змінюється, що призводить до підвищення висоти наплавленого валика.

При надмірному збільшенні сили струму формування наплавленого валика погіршується. Відсутній плавний перехід від поверхні наплавленого металу до основного, ускладнюється розтікання металу, стає можливим поява підрізів, зменшується кількість розплавленого флюсу.

Збільшення напруги на дузі, при незмінних силі струму та швидкості навпаки, веде до збільшення кількості тепла, що виділяється на одиницю довжини валика. При цьому зростає довжина дуги та покращується нагрівання країв ванни. Глибина провару практично не змінюється, а ширина наплавленого валика збільшується пропорційно зростанню кількості тепла. Збільшується кількість розплавленого флюсу – зростає його втрата. Крім цього, підвищення напруги погіршує стійкість дуги.

Швидкість наплавлення також впливає на формування валика. При малих швидкостях наплавлення (до 20 м/год) дуга виштовхується на поверхню металу – проплавлення основного металу зменшується, а ширина валика зростає.

При дуже низьких швидкостях наплавлення (менше 10 м/год) провар основного металу відсутній. У діапазоні середніх швидкостей (20–40 м/год) збільшення швидкості наплавлення призводить до зменшення ширини валика, при цьому глибина провару практично від швидкості не залежить.

Діаметр електродного дроту безпосередньо впливає на формування валика. Змінюючи діаметр електрода при незмінній силі струму, ми змінюємо тим самим густину струму, а значить, і тиск дуги на зварювальну ванну. При збільшенні перерізу електрода тиск дуги зменшується, що призводить до зменшення глибини проплавлення та деякому підвищенню ширини наплавленого валика. Для значного збільшення ширини валика, наплавлення виконують «розщепленими» електродами або електродною стрічкою.

1. Ознайомитись з обладнанням та способами налагодження його на заданий режим роботи.

2. Виконати наплавлення валиків, змінюючи силу струму. Виконати замірювання розмірів валиків (ширина – B та висота посилення – H). Дані занести до таблиці 6.1.

3. Виконати наплавлення валиків, змінюючи напругу на дузі. Виконати вимірювання розмірів валиків (ширина B та висота посилення H). Дані занести до таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Робоча таблиця

Номер з/п	I_d , А	U_d , В	V_n м/с	B , мм	e , мм	H , мм	F_0 , мм ²	F_e , мм ²	γ

4. Виконати наплавлення валиків, змінюючи швидкість наплавлення. Виконати вимірювання розмірів валиків (B – ширина та висота наплавлення H). Дані занести до таблиці 6.1.

5. За вказівкою викладача, зміну одного з параметрів режиму виконати при напавленні валиків послідовно однієї та другої пластини, які потім роз'єднати й підготувати переріз до вимірювань H , F_0 , F_e дані занести до таблиці 6.1.

6. Побудувати графіки залежності геометричних розмірів валиків та γ від параметрів наплавлення (сили струму, напруги на дузі та швидкості наплавлення).

7. Зробити висновки.

Контрольні питання

1. Від чого залежить хімічний склад напавленого шару металу?
2. Від чого залежать геометричні параметри валиків при напавленні?
3. Як впливає збільшення струму на формування валика при напавленні?
4. Як впливає напруга на дузі на формування валика при напавленні?
5. Як впливає швидкість наплавлення на формування валика?

Література: [1, 210–230; 3, 5–25]

Література

1. Нанесення покриття : навч. посіб. / В. М. Корж [та ін.] ; за ред. К. А. Ющенко. – Київ : Арістей, 2005. – 204 с.
2. Вельбой В. П.. Технологія і обладнання для напилення : конспект лекцій / В. П. Вельбой, П. В. Каплун. – Хмельницький : ХНУ, 2006. – 142 с
3. Гладкий П. В. Наплавочні порошкові смуги та дроти. Довідник / П. В. Гладкий, В. І. Юматова, А. П. Жудра. Вид. 2-ге. – Київ : Техніка, 2007. – 36 с.
4. Модульне середовище для навчання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://msn.khmnmu.edu.ua/>

ЗМІСТ

Вступ	3
<i>Лабораторна робота 1.</i>	
Визначення швидкості частинок при газотермічному напиленні.....	5
<i>Лабораторна робота 2.</i>	
Аналіз теплових процесів на поверхні виробу при газотермічному напиленні	8
<i>Лабораторна робота 3.</i>	
Аналіз процесу зчеплення частинок матеріалу, що напилюють з поверхнею основи при газотермічному напиленні	11
<i>Лабораторна робота 4.</i>	
Приготування зразків для металографічного дослідження мікроструктури	15
<i>Лабораторна робота 5.</i>	
Дослідження залежності якості наплавленого металу від його хімічного складу.....	22
<i>Лабораторна робота 6.</i>	
Особливості формування валиків при наплавленні під шаром флюсу	24
Література	27