

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 621.432

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).32-42](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).32-42)

М.М. Студент, проф., д-р техн. наук, ст. наук. співр., **М.Я. Головчук**, асп., мол. наук. співр., **Г.В. Чумало**, канд. техн. наук, ст. наук. співр., **В.М. Гвоздецький**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.

Фізико-механічний інститут НАН України, м. Львів, Україна

e-mail: student.phmi@gmail.com, golovchuk@gmail.com, chumalo@nas.gov.ua, gvosdetcki@gmail.com

С.І. Маркович, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

markob0@ukr.net;

Г.В.Похмурська, проф., д-р техн. наук

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

e-mail: zvdv@ukr.net

Вплив діаметра електродних порошкових дротів на механічні характеристики електродугових покриттів

В роботі проведено впливу діаметра електродних порошкових дротів на механічні характеристики електродугових покриттів. Покриття отримували на оригінальному обладнанні, застосовуючи для напилювання модельні порошкові дрони базових систем легування Fe–Cr–C та Fe–Cr–W діаметром 1,6 та 2,4 мм. Досліджено вплив діаметра порошкових дротів на структуру, електродугових покриттів різного діаметра. Встановлено залежність поруватості, мікротвердості, адгезії до сталеві основи, абразивної зносостійкості електродугових покриттів, напилених з порошкових дротів з різною кількістю шихти, від товщини ламелей у структурі покриттів. Визначено вплив товщини ламелей у структурі покриттів, напилених з порошкових дротів з різною кількістю шихти (залежно від їх діаметра 1,6 та 2,4 мм), на їх абразивну зносостійкість. Встановлено, що товщина ламелей у покриттях усіх проаналізованих систем легування зростала зі збільшенням об'єму розплавленого металу. Показано, що кількість оксидної фази у структурі покриттів зростає вдвічі зі збільшенням дистанції розпилювання порошкових дротів від 80 до 120 мм. Більше оксидної фази (на 40...100%) виявили у покриттях, сформованих із ПД діаметром 2,4 мм з вищим коефіцієнтом заповнення його оболонки шихтою порівняно із покриттями, сформованими із порошкових дротів діаметром 1,6 мм з нижчим заповненням. Встановлено, що поруватість, та мікротвердість покриттів із розроблених порошкових дротів зростає із збільшенням товщини ламелей в їх структурі та, відповідно, діаметру. Встановлено, що із збільшенням товщини ламелей у структурі покриттів з порошкових дротів 250X21ВФГС та порошкових дротів 50ХН2Р5ГС їх адгезія до сталеві основи дещо зменшилася, що зумовлено виникненням в покриттях напружень розтягу, які спричиняють появу мікротріщин або мережі тріщин у їх структурі. Водночас адгезія покриттів із порошкових дротів 50Х6МГ2С до сталі зросла, що зв'язали з більшим вмістом вуглецю у крупних ламелях та сприятливими умовами для формування в них високовуглецевого мартенситу, який має найменший коефіцієнт термічного розширення та спричиняє найменші залишкові напруження розтягу у покриттях. Встановлено, що абразивна та газоабразивна зносостійкість покриттів із ПД 250X21ВФГС знизилася, а із ПД 50ХН2Р5ГС підвищилася внаслідок збільшення товщини ламелей у їх структурі за використання порошкових дротів більшого діаметра.

покриття, порошкові дрони, мікротвердість, абразивна зносостійкість, поруватість, напруження

М.М. Студент, проф., д-р техн. наук, ст. науч. сотр., **М.Я. Головчук**, асп., мл. научн. сотр., **Г.В. Чумало**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., **В.М. Гвоздецький**, канд. техн. наук ст. науч. сотр.

Фізико-механічний інститут НАН України, г. Львов, Україна

С.І. Маркович, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Україна

Г.В.Похмурська, проф., д-р техн. наук

Національний університет «Львівська політехніка», г. Львов, Україна

Влияние диаметра электродных порошковых проволок на механические характеристики электродуговых покрытий

В работе проведено исследование влияния диаметра электродных порошковых проволок на механические характеристики электродуговых покрытий. Покрытия получали на оригинальном оборудовании, применяя для напильвания модельные порошковые провода базовых систем легирования Fe–Cr–C и Fe–Cr–W диаметром 1,6 и 2,4 мм. Исследовано влияние диаметра порошковых проволок разного диаметра на структуру электродуговых покрытий. Установлена зависимость пористости, микротвердости, адгезии к стальной основе, абразивной износостойкости электродуговых покрытий, напыленных из порошковых проводов с разным количеством шихты, от толщины ламелей в структуре покрытий. Определено влияние толщины ламелей в структуре покрытий, напыленных из порошковых проводов с разным количеством шихты (в зависимости от их диаметра 1,6 и 2,4 мм), на их абразивную износостойкость. Установлено, что толщина ламелей в покрытиях всех проанализированных систем легирования росла с увеличением объема расплавленного металла. Показано, что количество оксидной фазы в структуре покрытий растет вдвое с увеличением дистанции распыливания порошковых проволок от 80 до 120 мм. Больше оксидной фазы (на 40-100%) обнаружили в покрытиях, сформированных из порошковых проволок диаметром 2,4 мм с высшим коэффициентом заполнения его оболочки шихтой сравнительно с покрытиями, сформированными из порошковых проводов диаметром 1,6 мм с низким заполнением. Установлено, что пористость и микротвердость покрытий из разработанных порошковых проволок растет с увеличением толщины ламелей в их структуре и, соответственно, диаметру. Установлено, что с увеличением толщины ламелей в структуре покрытий из порошковых проволок 250X21ВФГС и порошковых проводов 50ХН2Р5ГС их адгезия к стальной основе несколько уменьшилась, что предопределено возникновением в покрытиях растягивающих напряжений, которые влекут появление микротрещин или сети трещин в их структуре. В то же время адгезия покрытий из порошковых проводов 50Х6МГ2С к стали выросла, что связали с большим содержанием углерода в крупных ламелях и благоприятными условиями для формирования в них высокоуглеродистого мартенсита, который имеет наименьший коэффициент термического расширения и влечет наименьшие остаточные напряжения в покрытиях. Установлено, что абразивная и газоабразивная износостойкость покрытий из ПД 250X21ВФГС снизилась, а из ПД50ХН2Р5ГС повысилась в результате увеличения толщины ламелей в их структуре за использование порошковых проводов большего диаметра.

покрытия, порошковые проволоки, микротвердость, абразивная износостойкость, пористость, напряжения

Постановка проблеми. Електродугове напилення покриттів широко використовується у промисловості, для захисту від корозії, відновлення розмірів деталей машин а також від абразивного та газоабразивного зношування, як за кімнатних так і за підвищених температур [1-3]. Для напилення зносостійких покриттів переважно використовують як електродні матеріали - порошкові дроти (ПД) діаметром 1,6...1,8 мм. Такі ПД не завжди можуть забезпечити високий коефіцієнт заповнення шихтою, а значить і не можуть забезпечити необхідний вміст легувальних елементів у покриттях. В той же час покриття із ПД, що експлуатуються в умовах абразивного зношування особливо в корозійних середовищах потребують у своєму складі не менше 12 мас.% хрому. Використання ПД більших діаметрів дозволяє суттєво збільшити їх коефіцієнт заповнення шихтою, а значить суттєво збільшити вміст легувальних елементів у структурі покриттів. Однак досліджень, які б показували вплив діаметра ПД та продуктивності напилювання покриттів на структуру та абразивну зносостійкість, у світовій літературі немає. Це стримує розвиток методу електродугового напилювання покриттів та не дає змоги створювати нові ПД із підвищеним вмістом легувальних елементів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений огляд літературних джерел показав, що ПД, які використовуються як витратні електродні матеріали для

електродугового напилення покриттів, дають змогу отримувати покриття із високими експлуатаційними характеристиками [4-6]. Електродугові покриття із ПД застосовують для відновлення геометричних розмірів деталей машин, для захисту від абразивного зношування як за кімнатних так і за підвищених температур а також для захисту від корозійно-абразивного зношування у технологічних середовищах [7]. Порошкові дроти для ЕДП виготовляють в сталевій, нікелевій та алюмінієвій оболонках, як правило, діаметром 1,6 - 1,8 мм особливо у США та Європейському Союзі, хоча в деяких випадках використовуються порошкові дроти більшого діаметру [8]. Так в роботі [7] застосовано ПД діаметром 3 мм в комбінації з суцільнотягнутим дротом діаметром 2 мм. Однак вплив діаметра ПД на фізико - механічні характеристики покриттів практично не висвітлено у літературних джерелах.

Постановка завдання. Для ефективного застосування ПД необхідно виявити взаємозв'язок діаметра порошкових дротів з процесами формування структури, фазового складу покриттів та їх фізико-механічними характеристиками. Наявність цієї інформації дозволить розробляти нові порошкові дроти для електродугового напилення зносостійких покриттів із підвищеним вмістом легувальних елементів для експлуатації в робочих корозивних середовищах.

Виклад основного матеріалу. Електродугові покриття отримували на оригінальному обладнанні, розробленому та виготовленому у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України (рис.1). Для напилювання використовували модельні ПД базових систем легування Fe–Cr–C та Fe–Cr–В діаметром 1,6 та 2,4 мм (табл. 1, рис. 2).

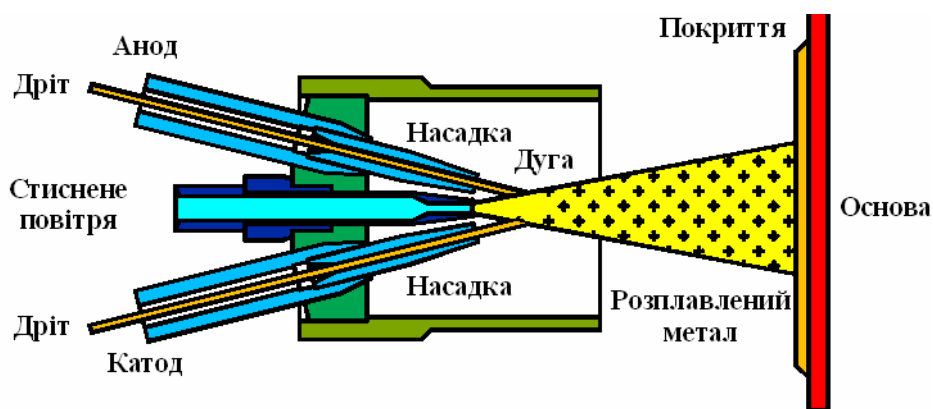


Рисунок 1 – Типова схема формування електродугових покриттів

Для отримання однакового хімічного складу порошкових дротів до шихти ПД більшого діаметру додатково додавали порошок заліза.

Металографічні дослідження на електронних сканівних мікроскопах “LEO-840” (з приставкою для мікроелементного аналізу) та ZEISS EVO-40XVP (із системою рентгенівського мікроаналізу INCA Energy). Адгезію покриттів до сталевій основі (сталь 20) визначали штифтовим методом. Відкрити поруватість покриттів визначали шляхом просочуванням покриттів гасом із наступним зважуванням зразків.

Фазовий склад покриттів досліджували на дифрактометрі ДРОН-3.0 у $\text{CuK}\alpha$ – випромінюванні з фокусуванням трубки за схемою Бреґга-Брентано.

Таблиця 1 – Хімічний склад використаних модельних порошкових дротів

Марка ПД	Ø ПД, мм	Вміст елементів, мас. %									
		Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	B	V	Mo	W
50XH2ГР5С	1,6	90,6	0,55	0,19	1,09	0,20	1,38	5,95	-	-	-
	2,4	91,1	0,45	0,30	1,20	0,22	1,75	4,96	-	-	-
250Х21ВФГС	1,6	74,4	2,80	0,30	0,39	21,1	-	-	0,60	-	0,40
	2,4	74,00	2,51	0,62	0,38	21,4	-	-	0,52	-	0,55
50Х6Г2МС	1,6	91,7	0,41	0,40	1,56	5,4	-	-	-	0,50	-
	2,4	90,6	0,47	0,40	1,40	6,6	-	-	-	0,51	-

Джерело: [5]

Абразивне зношування покриттів досліджували за умов жорстко закріпленого абразиву з використанням абразивного корундового диска марки СМ-2 із розміром зерна 20 мкм діаметром та шириною 150 та 8 мм, частота обертання якого становила $2,7 \text{ с}^{-1}$ (58 м/хв), а навантаження в зоні контакту - $P = (14,7 \pm 0,25) \text{ Н}$. Газоабразивне зношування покриттів досліджували за температури $200 \text{ }^\circ\text{C}$ упродовж 50 год. Абразивну зносостійкість оцінювали за втратою маси зразків після випроб за швидкості руху абразиву 36 м/сек. За абразив використали кварцовий пісок зернистістю до 200 мкм.

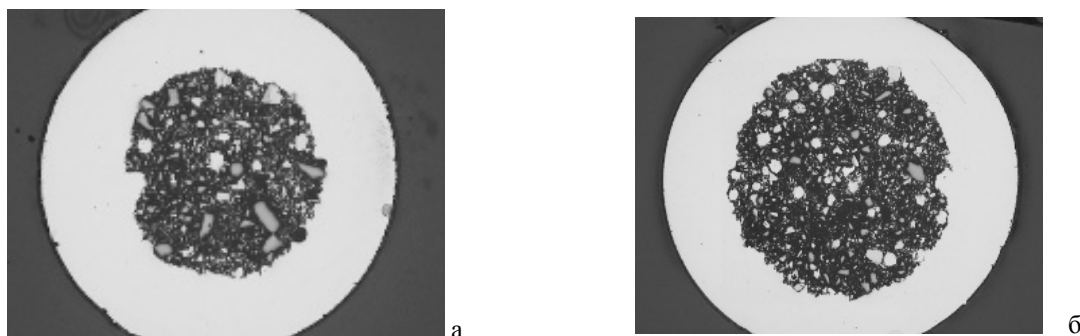


Рисунок 2 – Поперечний переріз порошкових дротів діаметром 1,6 (а) та 2,4 (б) мм.

Джерело: розробка авторів

Вплив діаметра ПД на структуру, електродугових покриттів із модельних ПД різного діаметра, хімічний склад яких наведений у табл. 1.

Під час електродугового напилювання покриттів між торцями дротів виникає дуга, в якій дроти розплавлялися, а їх розплав диспергувався повітряним струменем на краплини, які, вдаряючись об напилювану поверхню, деформувалися у формі «блюдечок» (ламелей) і шар за шаром формували покриття. Для аналізу фракційного та хімічного складу краплин їх вловлювали у снігову мішень. Металографічним та спектральним аналізом виявили, що серед краплин зустрічаються повністю оксидні краплини, краплини із зовнішнім шаром із оксидів та краплини без оксидів взагалі.

Встановили, що із збільшенням діаметра ПД та струму дуги об'єм розплавленого металу на торцях ПД збільшувався і тому повітряний струмінь диспергував його на краплини більшого діаметру (рис. 3). Як наслідок у покриттях всіх систем легування товщина ламелей (як структурна ознака покриттів) зростала (рис. 4).

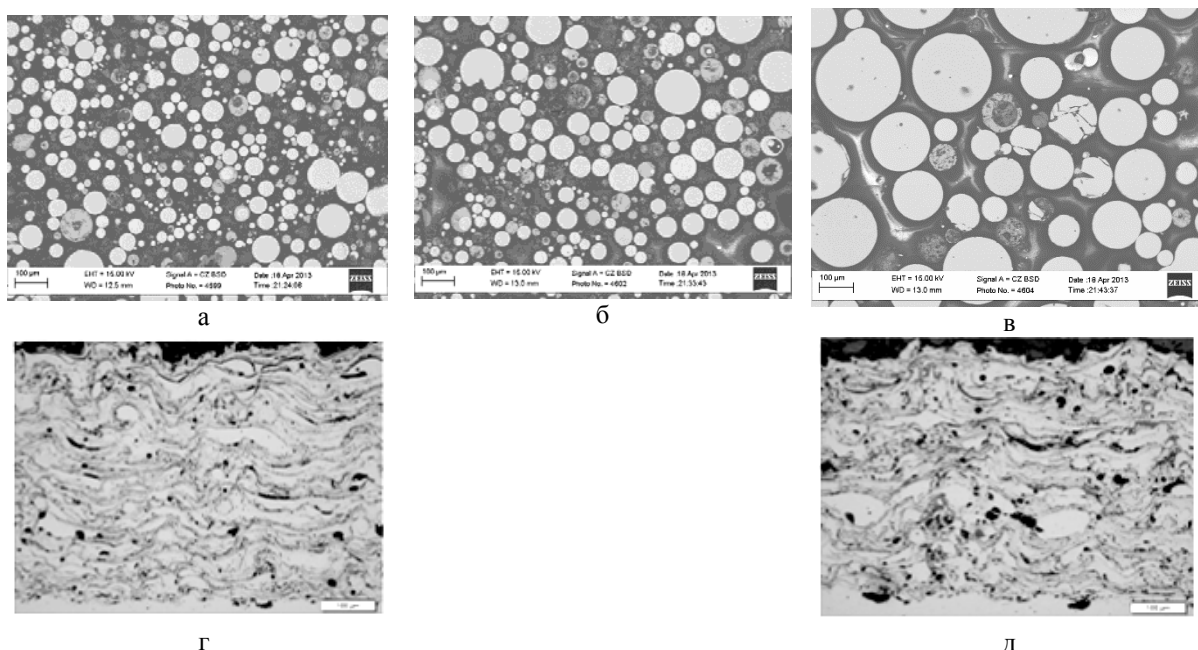


Рисунок 3 – Морфологія краплин, та структура покриттів отриманих розпиленням порошкових дротів у снігову мішень за струму дуги, який визначає продуктивність напилювання, 125 (а, г) 150 (б) та 180 (в, д).

Джерело: розробка авторів

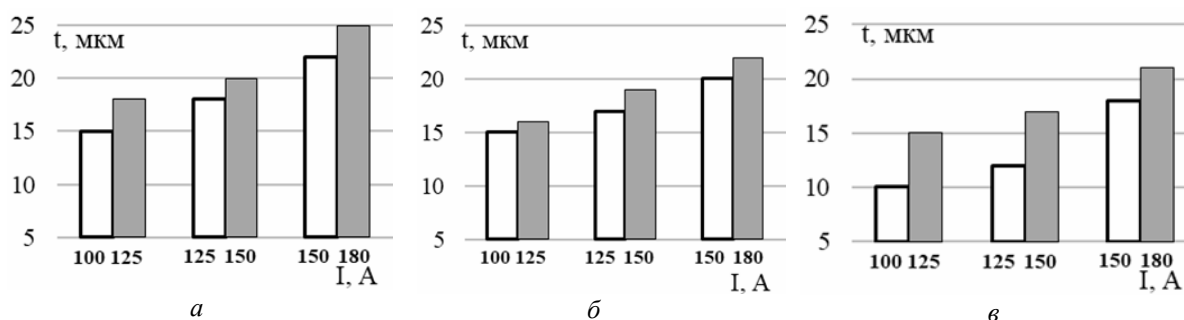


Рисунок 4 – Залежність товщини ламелей t у покриттях з ПД 50Х6Г2МС (а), ПД 250Х21ВФГС (б) та ПД 50ХН2Р5ГС (в) залежно від продуктивності напилювання покриттів (за величиною струму), отриманих з ПД діаметром 1,6 (світлі стовпчики) та 2,4 (темні стовпчики) мм

Джерело: розробка авторів

Оскільки процес напилювання покриттів проводили з використанням повітряного струменя, то виявилось, що у багатьох випадках ламелі покриттів відокремлені одна від одної тонкими прошарками оксидних фаз (рис. 5). Показали, що із збільшенням дистанції напилювання від 80 до 120 мм (що рівноцінно зростанню часу перебування крапель у повітряному струмені) вміст оксидної фази у покриттях зростає удвічі. У покриттях сформованих із ПД діаметром 2,4 мм виявили на 40...100 % більше оксидної фази, ніж у покриттях сформованих з ПД діаметром 1,6 мм. Це зумовлено більшим об'ємом шихти у ПД більшого діаметру, порожнини між порошинками якої заповнені повітрям, яке інтенсивно окиснює краплини розплаву всередині ПД і на їх торцях під час напилювання покриттів.

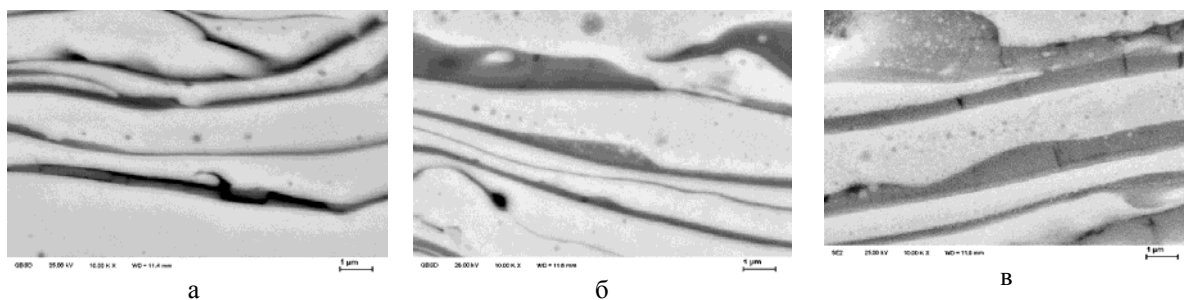


Рисунок 5 – Оксидні прошарки між ламелями у структурі покриттів, напилених порошковим дротом з дистанції 80 (а), 100 (б), 120 (в) мм

Джерело: розробка авторів

Фазовим аналізом встановили, що матричною фазою структури покриття із ПД 50X6Г2МС був мартенсит із невеликою кількістю оксиду заліза Fe_3O_4 (табл. 2). Тоді як матричною фазою покриття із ПД 250X21ВФГС був залишковий аустеніт з невеликою кількістю мартенситу та оксидів хрому та заліза ($Cr_2O_3 + Fe_3O_4$). Швидка кристалізація краплин на сталевій основі сприяла утворенню у структурі покриття великої кількості залишкового аустеніту. Матричною фазою покриття із ПД 50XН2Р5ГС був мартенсит, в якому виявили нанорозмірні включення складнолегованого бориду $FeCrB$ та невелику кількість оксиду заліза Fe_3O_4 . У цьому випадку швидка кристалізація краплин привела до утворення великої кількості центрів кристалізації боридів, які за браком часу встигали вирости лише до нанорозмірів.

Таблиця 2 – Фазовий склад елементів структури покриттів із досліджуваних ПД

Марка ПД	α -Fe, мас.%	γ -Fe, мас.%	Оксиди, мас.%	FeCrB мас.%
50X6Г2МС	90 мартенситу	-	Fe_3O_4	-
250X21ВФГС	28 мартенситу	60 залишкового аустеніту	$Cr_2O_3+Fe_3O_4$	-
50XН2Р5ГС	47 мартенситу	-	Fe_3O_4	40

Джерело: розробка авторів

Вплив товщини ламелей у структурі покриттів, напилених ПД з різною кількістю шихти (залежно від їх діаметра 1,6 та 2,4 мм), на їх поруватість, мікротвердість, адгезію до сталевій основі, абразивну зносостійкість.

Поруватість покриттів всіх систем легування зростала із збільшенням товщини ламелей у структурі напилених покриттів і, відповідно, діаметра ПД (рис. 6). Така закономірність зумовлена зростанням діаметра краплин, які формували покриття. Із збільшенням діаметра краплин при ударі об поверхню напилювання відбувалося інтенсивне їх розбризкування, що зумовило виникнення мікропорожнин між ламелями у структурі покриттів.

Встановили, що мікротвердість покриттів із ПД 50X6Г2МС та ПД 50XН2Р5ГС зростала із збільшенням товщини ламелей у структурі покриттів, що особливо яскраво проявилось за використання для напилювання ПД більшого діаметра (рис. 7а, б). Це пояснили випаровуванням та вигоранням легувальних елементів із краплин, особливо вуглецю під час їх розпилювання. Із збільшенням діаметра краплин кількість вуглецю, що вигорів з краплин зменшувалася. А вищий вміст вуглецю у мартенситній матричній фазі покриттів відповідав за підвищення їх мікротвердості.

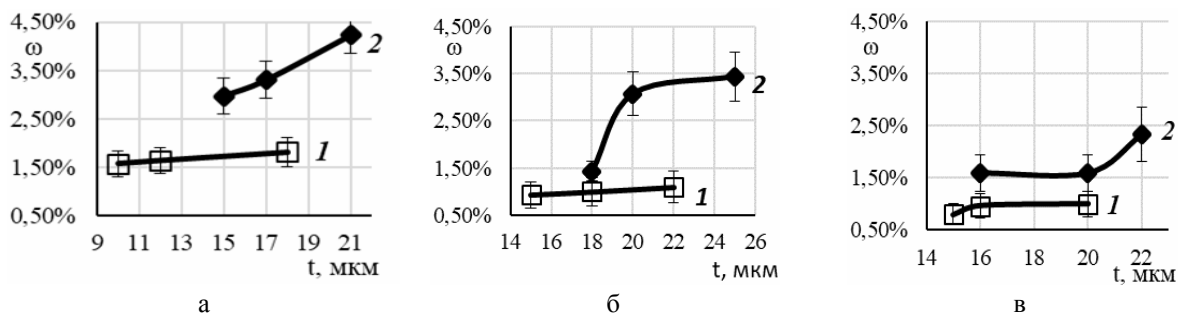


Рисунок 6 – Вплив товщини ламелей t у структурі покриттів із ПД 50XH2P5GC (а), ПД 50X6Г2МС (б) та ПД 250X21ВФГС (в) діаметром 1,6 (1) та 2,4 (2) мм на поруватість покриттів ω

Джерело: розробка авторів

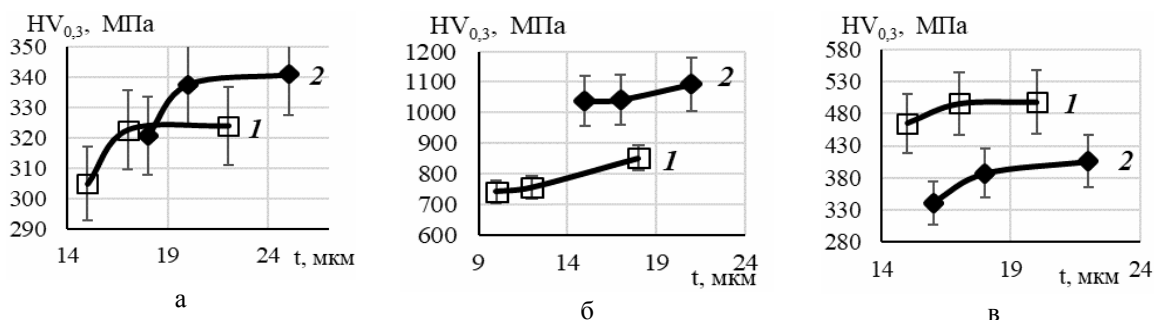


Рисунок 7 – Вплив товщини ламелей t у структурі покриттів із ПД 50X6Г2МС (а), ПД 50XH2P5GC (б) та ПД 250X21ВФГС (в) діаметром 1,6 (1) та 2,4 (2) мм на їх мікротвердість $HV_{0,3}$

Джерело: розробка авторів

Разом з тим в покриттях із ПД 250X21ВФГС виявили протилежну тенденцію впливу товщини ламелей на мікротвердість за використання дроту більшого діаметру (рис. 7в). Це зумовлено фазовим складом цих покриттів, а саме значною кількістю залишкового аустеніту в них, якому властива нижча мікротвердість, ніж високовуглецевому мартенситу. З дрібних краплин, що формувалися під час розпилювання ПД меншого діаметру, вуглецю вигоряло значно більше, а значить і вміст аустеніту у ламелях покриття був нижчим, а мартенситу - вищим.

Адгезія покриттів із ПД 50XH2P5GC та ПД 250X21ВФГС дещо зменшувалася із зростанням товщини ламелей у структурі покриттів, спричиненої особливо за використання ПД більшого діаметра (рис. 8а, б). Це зумовлено виникненням у напилених покриттях напружень розтягу. Внаслідок їх впливу в покриттях виникали мікротріщини або навіть формувалася їх мережа, що суттєво знижувало їх адгезію до сталеві основи. Для покриття із ПД 50X6Г2МС виявили обернену закономірність (рис. 7в). Із збільшенням товщини ламелей у структурі покриття та діаметра ПД його адгезія до сталеві основи зростала. Це пояснили більшою тепловою енергією краплин, меншим вигорянням вуглецю із них та формуванням покриттів із матричною фазою високовуглецевого мартенситу. Чим більше вуглецю у мартенситі, тим менший коефіцієнт термічного розширення покриття, що зумовлює менший рівень залишкових напружень розтягу в ньому.

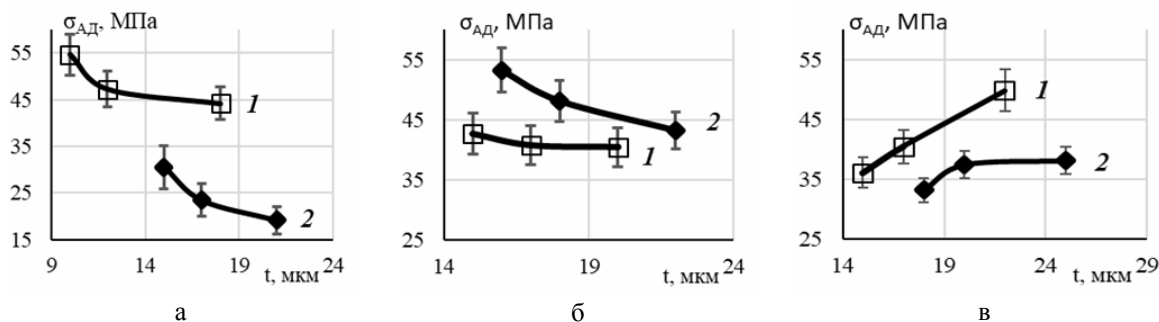


Рисунок 8 – Вплив товщини ламелей t у структурі покриттів із ПД 50ХН2Р5ГС (а), ПД 250Х21ВФГС (б) та ПД 50Х6Г2МС (в) діаметром 1,6 (1) та 2,4 (2) мм на їх адгезію $\sigma_{ад}$ до сталеві основи

Джерело: розробка авторів

Вплив товщини ламелей у структурі покриттів, напилених ПД з різною кількістю шихти (залежно від їх діаметра 1,6 та 2,4 мм), на їх абразивну зносостійкість.

Із збільшенням товщини ламелей у структурі покриттів, напилених ПД 250Х21ВФГС (особливо більшого діаметра), їх абразивна зносостійкість зменшується (рис. 9а). Такий результат пояснили більшою кількістю залишкового аустеніту у покритті (табл. 2), який має меншу мікротвердість ніж мартенсит. Із менших за діаметром краплин вигоряє більше вуглецю ніж із більших краплин. Тому в покритті, напиленого ПД діаметром 1,6 мм вуглецю менше, ніж у покритті з ПД діаметром 2,4 мм, а значить і менше залишкового аустеніту.

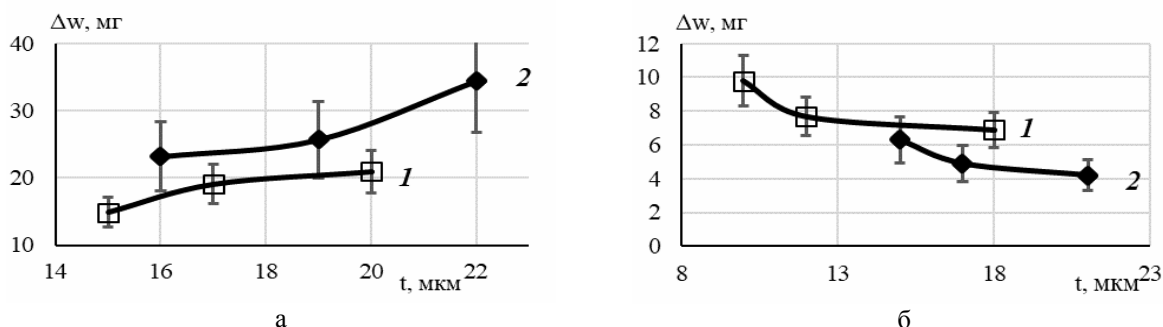


Рисунок 9 – Вплив товщини ламелей t у структурі покриттів із 250Х21ВФГС (а) та ПД 50ХН2Р5ГС (б) діаметром 1,6 (1) та 2,4 (2) мм на їх абразивну зносостійкість за втратою маси зразків Δw . (дати в мг)

Джерело: розробка авторів

Із збільшенням товщини ламелей у покриттях, напилених ПД 50ХН2Р5ГС (особливо більшого діаметра) їх абразивна зносостійкість ($1 / \Delta w$) зростала. Це зумовлено збільшенням твердості таких покриттів та меншим рівнем залишкових напружень розтягу. У таких покриттях напруження розтягу релаксують завдяки утворенню мікротріщин, які, однак, не знижують абразивної зносостійкості.

Характер зміни газоабразивної зносостійкості покриттів із цих ПД аналогічний до отриманого для абразивної зносостійкості. Газоабразивна зносостійкість покриттів з ПД 250Х21ВФГС зменшувалася із збільшенням товщини ламелей та діаметра ПД (рис. 10а), тоді як покриттів із ПД 50ХН2ГР5С – вона зростала і для покриттів із ПД більшого діаметра була вищою (рис. 10б).

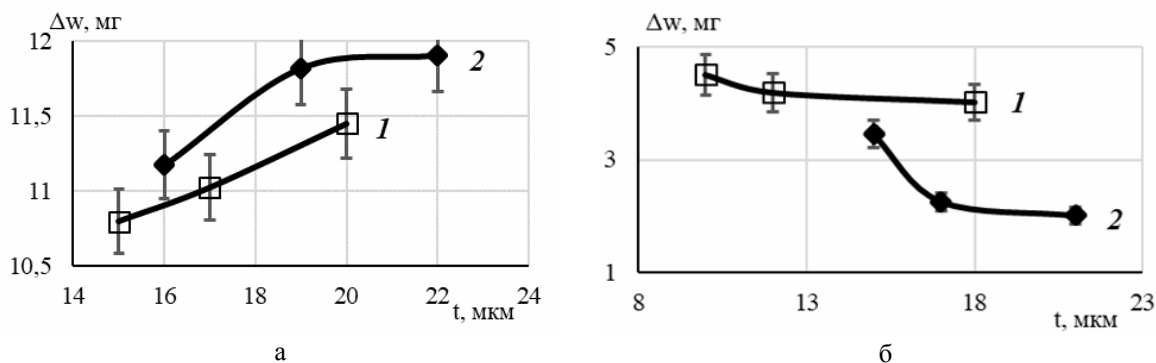


Рисунок 10 – Вплив товщини ламелей t у структурі покриттів із ПД 250X21ВФГС (а) та ПД 50ХН2Р5ГС (б) діаметром 1,6 (1) та 2,4 (2) мм на їх газоабразивну зносостійкість за втратою маси зразків Δw . (дати в мг)

Джерело: розробка авторів

Висновки. Встановлено, що товщина ламелей у покриттях усіх проаналізованих систем легування зростала зі збільшенням об'єму розплавленого металу на торцях ПД з відповідним формуванням краплин більшого діаметру під час його диспергування повітряним струменем, що реалізовувалось завдяки використанню ПД більшого діаметра з відповідно вищим коефіцієнтом заповнення його оболонки шихтою та підвищеного струму дуги.

Показано, що кількість оксидної фази у структурі покриттів зростає вдвічі зі збільшенням дистанції розпилювання ПД від 80 до 120 мм. Більше оксидної фази (на 40...100%) виявили у покриттях, сформованих із ПД діаметром 2,4 мм з вищим коефіцієнтом заповнення його оболонки шихтою порівняно із покриттями, сформованими із ПД діаметром 1,6 мм з нижчим заповненням. Це зумовлено більшим об'ємом шихти у ПД більшого діаметру, порожнини між порошинками в якій заповнені повітрям, яке інтенсивно окиснює краплини розплаву всередині ПД і на їх торцях під час напилювання покриттів.

Встановлено, що поруватість, та мікротвердість покриттів із розроблених ПД зростає із збільшенням товщини ламелей в їх структурі та, відповідно, діаметру ПД. Збільшення мікротвердості зумовлено меншим випаровуванням та вигоранням елементів легування з краплин, що формують покриття, а збільшення поруватості спричинено інтенсивним розбризкуванням краплин при ударі об напилювану поверхню, що сприяє виникненню мікропорожнин між ламелями покриття.

Встановлено, що із збільшенням товщини ламелей у структурі покриттів з ПД 250X21ВФГС та ПД 50ХН2Р5ГС їх адгезія до сталеві основи дещо зменшилася, що зумовлено виникненням в покриттях напружень розтягу, які спричиняють появу мікротріщин або мережі тріщин у їх структурі. Водночас адгезія покриттів із ПД 50X6МГ2С до сталі зросла, що зв'язали з більшим вмістом вуглецю у крупних ламелях та сприятливими умовами для формування в них високовуглецевого мартенситу, який має найменший коефіцієнт термічного розширення та спричиняє найменші залишкові напруження розтягу у покриттях.

Встановлено, що абразивна та газоабразивна зносостійкість покриттів із ПД 250X21ВФГС знизилася, а із ПД 50ХН2Р5ГС підвищилася внаслідок збільшення товщини ламелей у їх структурі за використання ПД більшого діаметра.

Список літератури

1. Effect of high-temperature corrosion on the gas-abrasive resistance of electric-arc coatings / M. M. Student, H. V. Pokhmurs'ka, V. V. Hvozdet's'kyi, M. Ya. Holovchuk, M. S. Romaniv. *Materials Science*. 2009. Vol.44, №4. P. 481-489.

2. Influence of the composition of charge of powder wires on the structure and properties of electric-arc coatings / H. V. Pokhmurs'ka, M. Ya. Holovchuk, Yu. V. Dz'oba, V. M. Hvozdet's'kyi, L. V. Dzyubyk. *Materials Science*. 2018. Vol.53, №6. P. 868-874.
3. М. М. Студент, М. Я. Головчук, В. М. Гвоздецький. Вплив хімічного складу порошкових дротів на структуру та зносостійкість покриттів різного хімічного складу. *Проблеми трибології*. 2017. №3. С. 56-61.
4. Korobov Yury. Arc-Sprayed Fe-Based Coatings from Cored Wires for Wear and Corrosion Protection in Power Engineering Coatings. 2018. Vol. 8(2). P.71.
5. Структура и свойства электродуговых покрытий на основе феробора, полученных из порошковых проволок / А. Л. Борисова, И. В. Миц, Т. В. Кайда [и др.]. *Автоматическая сварка*. 1991. 9. С. 66 – 68.
6. Dallaire S., Levert H. Synthesis and deposition of TiB₂ containing materials by arc spraying. *Surface and Coatings Technology*. 1992. 50, 2, P. 241 – 248.
7. Багатофункціональні электродугові покриття / М.М. Студент та ін.; Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАНУ, Видавництво “Простір-М”, 350. С. 2018.
8. Microstructural Characterization and Wear Properties of Fe-Based Amorphous-Crystalline Coating Deposited by Twin Wire Arc Spraying / Ana Arizmendi-Morquecho, Araceli Campa-Castilla, C. Leyva-Porras, Josué Almicar Aguilar Martinez, Gregorio Vargas Gutiérrez, Karla Judith Moreno Bello, L. López López. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2014, Vol. 2014. |Article ID 836739 <https://doi.org/10.1155/2014/836739>
9. Черновол М.І., Мажейка О.Й., Маркович С.І., Студент М.М. Трибологічні характеристики композиційних покриттів, отриманих электродуговим напиленням порошкового та суцільнотягнутого дроту. *Проблеми трибології*. 2006. № 4. С. 88-96.

Referencis

1. Student, M.M., Pokhmurs'ka, H.V., Hvozdet's'kyi, V.V., Holovchuk, M. Ya. & Romaniv, M.S. (2009). Effect of high-temperature corrosion on the gas-abrasive resistance of electric-arc coatings. *Materials Science*. Vol.44, 4, 481-489 [in English].
2. Pokhmurs'ka, H.V., Holovchuk, M.Ya., Dz'oba, Yu. V., Hvozdet's'kyi, V.M. & Dzyubyk L.V. (2018). Influence of the composition of charge of powder wires on the structure and properties of electric-arc coatings. *Materials Science*, Vol.53, 6, 868-874 [in English].
3. Student, M.M., Holovchuk, M.Ya. & Hvozdet's'kyj, V.M. (2017). Vplyv khimichnoho skladu poroshkovykh drotiv na strukturu ta znosostyjkist' pokryttiv riznoho khimichnoho skladu [Influence of chemical composition of flux-cored wires on the structure and wear resistance of coatings of different chemical composition]. *Problemy trybolohii – Problems of tribology*, 3, 56-61 [in Ukrainian].
4. Korobov Yury (2018). Arc-Sprayed Fe-Based Coatings from Cored Wires for Wear and Corrosion Protection in Power Engineering Coatings, 8(2), 71 [in English].
5. Borisova, A.L. et al. (1991). Struktura i svojstva jelektrodugovykh pokryttij na osnove ferobora, poluchennyh iz poroshkovykh provolok [Structure and properties of ferroboration-based electric arc coatings obtained from flux-cored wires]. *Avtomaticheskaja svarka – Automatic welding*, 9, 66 – 68 [in Russian].
6. Dallaire, S. & Levert, H. (1992). Synthesis and deposition of TiB₂ containing materials by arc spraying. *Surface and Coatings Technology*, 50, 2, 241 – 248 [in English].
7. Student, M.M., Pokhmurs'ka, H.V., Hvozdet's'kyj, V.M., Stupnyts'kyj, T.R., Posuvajlo, V.M. & Markovych, S.I. (2018). *Bahatofunktsional'ni elektroduhovi pokryttia [Multifunctional electric arc coatings]*. Vydavnytstvo “Prostir-M” [in Ukrainian].
8. Ana Arizmendi-Morquecho, Araceli Campa-Castilla, C. Leyva-Porras, Josué Almicar Aguilar Martinez, Gregorio Vargas Gutiérrez, Karla Judith Moreno Bello, L. López López (2014). Microstructural Characterization and Wear Properties of Fe-Based Amorphous-Crystalline Coating Deposited by Twin Wire Arc Spraying. *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2014. |Article ID 836739 <https://doi.org/10.1155/2014/836739> [in English].
9. Chernovol, M.I., Mazhejka, O.J., Markovych, S.I. & Student, M.M. (2006). Trybolohichni kharakterystyky kompozytsijnykh pokryttiv, otrymanykh elektroduhovym napylenням poroshkovoho ta sutsil'notiahnutoho drotu [Tribological characteristics of composite coatings obtained by electric arc sputtering of flux-cored and solid wire]. *Problemy trybolohii – Problems of tribology*, 4, 88-96 [in Ukrainian].

Mykhajlo Student, Prof., DSc., Senior Researcher, **Myroslav Golovchuk**, post-graduate, Junior Research **Halyna Chumalo**, PhD tech. sci., Senior Researcher, **Volodymyr Hvozdet'skii**, PhD tech. sci., Senior Researcher
Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

Sergiy Markovych, Assos. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Hanna Pohkmurska, Prof., DSc.

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

Influence of Diameter of Electrode Powder-like Wires is on Mechanical Descriptions of Elektrodogovikh Coverages

The influence of the diameter of the electrode flux-cored wires on the mechanical characteristics of the electric arc coatings is carried out in the work. Electric arc coatings were obtained on the original equipment, developed and manufactured at the Institute of Physics and Mechanics. GV Karpenko NAS of Ukraine. For spraying, model flux-cored wires of basic doping systems Fe – Cr – C and Fe – Cr – B with a diameter of 1.6 and 2.4 mm were used. The influence of the diameter of flux - cored wires on the structure, electric arc coatings from model flux - cored wires of different diameters is investigated. The dependence of porosity, microhardness, adhesion to the steel base, abrasive wear resistance of electric arc coatings sprayed from flux-cored wires with different amounts of charge on the thickness of the lamellae in the coating structure has been established. The influence of the thickness of the lamellae in the structure of coatings sprayed from flux-cored wires with different amounts of charge (depending on their diameter 1.6 and 2.4 mm) on their abrasive wear resistance was determined. It was found that the thickness of the lamellae in the coatings of all analyzed alloying systems increased with increasing volume of molten metal at the ends of flux-cored wires with the corresponding formation of droplets of larger diameter during its dispersion by air jet. shell charge and high arc current.

It is shown that the amount of oxide phase in the structure of coatings doubles with increasing spray distance of flux-cored wires from 80 to 120 mm. More oxide phase (40... 100%) was found in coatings formed of flux-cored wires with a diameter of 2.4 mm with a higher filling factor of its shell charge compared to coatings formed of flux-cored wires with a diameter of 1.6 mm with lower filling. This is due to the larger volume of the charge in the powder wires of larger diameter, the cavities between the powders in which are filled with air, which intensively oxidizes the melt droplets inside the powder wires and at their ends during spraying.

It is established that the porosity and microhardness of coatings from the developed flux-cored wires increase with the increase of the thickness of the lamellae in their structure and, accordingly, the diameter of the flux-cored wires. The increase in micro hardness is due to less evaporation and burnout of alloying elements from the droplets forming the coating, and the increase in porosity is caused by intensive spraying of droplets when hitting the sprayed surface, which contributes to micro cavities between the lamellae of the coating.

It was found that with increasing the thickness of the lamellae in the structure of coatings of flux-cored wires 250H21VFGS and flux-cored wires 50HN2R5GS their adhesion to the steel base decreased slightly due to the occurrence of tensile stresses in coatings, which cause micro cracks or cracks. At the same time, the adhesion of 50X6MG2C flux-cored wire coatings to steel increased due to the higher carbon content of large lamellae and favorable conditions for the formation of high-carbon martensite, which has the lowest coefficient of thermal expansion and causes the lowest residual tensile stresses.

It was found that the abrasive and gas-abrasive wear resistance of coatings from flux-cored wires 250X21BΦГC decreased, and from flux-cored wires 50XH2P5ГC increased due to the increase in the thickness of the lamellae in their structure using a larger diameter.

coating, flux-cored wires, microhardness, abrasion resistance, porosity, stress

Одержано (Received) 28.09.2020

Прорецензовано (Reviewed) 17.10.2020

Прийнято до друку (Approved) 19.10.2020