

УДК 669.14.018.298.2

# ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХОНЬ ЛИСТОВИХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ РОЗМІРНІЙ ОБРОБЦІ ЕЛЕКТРИЧНОЮ ДУГОЮ

**В.І. Носуленко**

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри  
Кафедра обробки металів тиском  
Кіровоградський національний технічний університет  
пр. Університетський, 8, м. Кіровоград, Україна, 25006  
Контактний тел.: (0522) 39-04-19

**О.С. Чумаченко**

Кандидат технічних наук, доцент  
Кафедра лазерної техніки та фізико-технічних технологій  
Національний технічний університет „Київський  
політехнічний інститут”  
просп. Перемоги, 37, м. Київ-56, Україна, 03056  
Контактний тел.: (0522) 27-51-06

*Описана залежність властивостей поверхневих шарів виробів із залізвуглецевих сплавів та продуктів їх ерозії від потужності стаціонарних електричних розрядів, використаних для розмірної обробки, і витрати робочої рідини*

*Ключові слова: електрична дуга, мікротвердість, продукти ерозії*

*Описана зависимость свойств поверхностных слоев изделий из железоуглеродистых сплавов и продуктов их эрозии от мощности стационарных электрических разрядов, применяемых для размерной обработки, и расхода рабочей жидкости*

*Ключевые слова: электрическая дуга, микротвердость, продукты эрозии*

*Dependence of superficial layers properties of wares is described from iron-carbon alloys and products of their erosion from power of stationary electric discharge, applied for dimensional treatment, and expense of working liquid*

*Keywords: voltaic arc, microhardness, products of erosion*

## Вступ

Термічне різання листового металу із використанням перетвореної в тепло енергії електричного дугового розряду, зокрема плазмове, набуває все більшого поширення. Спосіб розмірної обробки металів електричною дугою (РОД) має широкі можливості формоутворення, і високу економічну ефективність при виконанні розділових операцій листового металу, зокрема в комбінації із плазмовим різанням. В якості матеріалу для електродів-інструментів в умовах РОД застосовують переважно графіт, що має високу ерозійну стійкість, і чавун. Утворення продуктів ерозії і своєчасне їх видалення є важливою умовою високопродуктивного і стійкого процесу. Для забезпечення потрібних властивостей оброблених поверхонь і розробки технологічних процесів важливим є системне дослідження впливу основних характеристик електричного розряду, якими визначається режим обробки, на структуру і властивості поверхонь виробів та продуктів ерозії із залізвуглецевих сплавів, як основних матеріалів для отримання листових деталей. Технологія розмірної обробки електричною дугою постійного струму в поперечному потоці рідини забезпечує оплавлення поверхневих шарів оброблених

матеріалів і великі швидкості охолодження при перекристалізації даних шарів, що повинно приводити до суттєвих змін мікроструктури, фазового складу і властивостей шарів.

Мета роботи – вивчення впливу основних параметрів (робочий струм, напруга, тиск робочої рідини і речовина електрода-інструмента) режимів розмірної обробки електричною дугою постійного струму на структуру і властивості оброблюваних поверхонь та продуктів ерозії залізвуглецевих сплавів із вмістом вуглецю до 3,5 % ваг.

## Результати досліджень

В якості робочої рідини використана технічна вода, молекули якої в зоні дії електричної дуги можуть дисоціювати на атомарний водень і кисень, що може приводити до додаткового окислення як продуктів ерозії, так і оброблюваних поверхонь. Виходячи з цього, в роботі вивчали структуру, фазовий склад і мікротвердість оброблених поверхонь і продуктів ерозії.

У табл. 1 наведено хімічний склад матеріалів, використаних як робочі електроди, в табл. 2 – параметри розмірної обробки.

Таблиця 1

Хімічний склад сталей і чавунів використаних як робочі електроди

Матеріал електродів	Хімічний склад електродів % вага					
	Fe	C	Si	Mn	S	P
Сталь У8	ост.	0,78	0,26	0,30	0,015	0,012
Сталь 20	ост.	0,20	0,27	0,50	0,040	0,040
Сталь 40	ост.	0,40	0,27	0,65	0,040	0,040
Чавун 43	ост.	3,51	2,27	0,70	0,067	0,085
Чавун	ост.	3,44	1,64	0,74	0,023	–

Згідно табл. 2, робочий струм змінювався від 125 до 500 А, напруга – від 13 до 45 В, тиск робочої рідини – від 0,6 до 1,6 МПа. В якості електродів використано сталі, чавуни і графіт.

Таблиця 2

Значення параметрів режимів розмірної обробки електричною дугою виробів зі сталей і чавунів

Режим обробки	Параметри режимів обробки			Матеріал електродів	
	I, А	U, В	Pст, МПа	анод	катод
1	125	30	0,6	Сталь У8	Сталь У8
2	460	30	0,7	Сталь У8	Сталь У8
3	145	13	1,4	Сталь У8	Сталь У8
4	125	13	1,0	Сталь У8	Графіт
5	450	35	0,8	Сталь У8	Графіт
6	460	35	1,0	Сталь 20	Графіт
7	460	35	1,0	Сталь 40	Графіт
8	170	40	1,3	Сталь 20	Графіт
9	160	32	1,1	Чавун 43	Чавун 43
10	500	35	1,3	Чавун 43	Чавун 43
11	150	30	1,5	Чавун	Чавун

Мікроструктура і мікротвердість вивчалися на одних і тих же ділянках. На рис. 1 приведена мікроструктура і крива розподілу мікротвердості поверхнього шару сталі 20 обробленої по режиму 6.

Структура чітко складається з трьох шарів: поверхневий монолітний шар товщиною до 0,05 мм, світлий двофазний (2 – продукти розпаду аустеніту, 3 – ферит) шар товщиною 0,15 – 0,20 мм і структура початкового стану сталі 20 (3 – ферит, 4 – перліт). Причому поверхневий „білий шар” практично присутній у всіх зразках, оброблених електричною дугою.

В літературі зустрічаються роботи, автори яких роблять спробу дати пояснення природи виникнення „білого шару” і визначити його фазовий склад. Так, в роботі [3] Палатник Д.С. пише, що при електричному різанні армо-заліза мідним електродом (катод) утворюється „білий шар”, який майже не травиться і „безсумнівно, містить цементит”. Нетравимість цього шару пікратом натрію (що виявляє цементит) і зафарбовує його в чорний колір) автор пояснює впливом розчинених в цементиті елементів робочого середовища (аніліну, трансформаторного масла). Він також

вважає, що при обробці сталей твердими сплавами типу ВК, стеліт) в поверхневому шарі також утворюється карбід, але складніший по складу, ніж цементит.

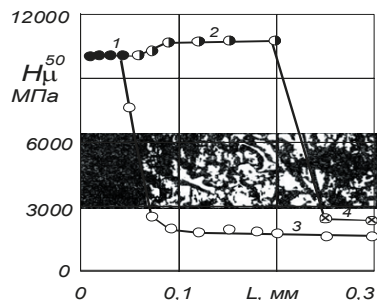


Рис. 1. Мікроструктура і крива розподілу мікротвердості поверхнього шару сталі, обробленої по режиму 6

Ляпунов М.Д. вважає, що при обробці загартованих сталей 45 і У8 і жароміцної сталі 5ХНВ „білий шар” складається з первинних дендритів аустеніту і аустенітно-перлітної евтектики із мікротвердістю НВ 512-915 кгс/мм<sup>2</sup> [4].

У роботі [5] зазначено, що при електроконтактному шліфуванні дугою постійного струму в „білому шарі” спостерігається безструктурний мартенсіт, перехідний в голковий.

І нарешті, в роботі [6] повідомляється, що при електроімпульсній обробці загартованих вуглецевих сталей в „білому шарі” видно дуже дисперсні фази в метастабільному стані.

Так, згідно літературних даних, „білий шар” може складатися як з цементиту (простого і складного), так і з аустеніту і мартенсіту, чим і пояснюється висока мікротвердість даного шару.

Структура і криві зміни мікротвердості (рис. 1) обробленої поверхні показують, що поверхневий шар товщиною 0,05 мм можна розглядати як моноліт із високою мікротвердістю (до 10000 МПа).

У другому шарі спостерігаються дві фази, одна з яких має мікротвердість близько 11000 МПа (2), а друга (3) – близько 2000 МПа. По загальному вигляду і конфігурації фазових включень структура середнього шару відрізняється від початкової структури сталі 20 лише кольором окремих структурних включень, які в середньому шарі мають дуже високу мікротвердість. (11000 МПа) і світлий (2) вигляд, а в основному шарі темне забарвлення (4) і мікротвердість близько 2500 МПа. Таку різницю в мікротвердості можна пояснити так. Зона початкової структури складається зі світлого фериту (3) і темних включень (4) перліту із мікротвердістю 2500 МПа. Середня зона – це зона суттєвого термічного впливу, де температура ще нижча за ліквідус, але вище за солідус. Це приводить до того, що зерна перліту перетворюються на зерна аустеніту евтектоїдного складу. Проте висока мікротвердість даних зерен свідчить про те, що в процесі різкого охолодження аустеніт частково перетворюється на мартенсіт і ферит, і ми маємо справу із метастабільними продуктами його розпаду. Ферит середньої зони практично нічим не відрізняється від фериту початкової сталі.

Мікротвердість поверхнього шару на 1000 МПа нижча, ніж „аустеніту” середнього шару. Це пов'язано з тим, що поверхневий „білий шар” кристалізується

із рідкого розплаву при підвищених швидкостях охолодження і є метастабільними продуктами розпаду збідненого аустеніту із вмістом 0,2 % ваг. вуглецю коли вміст його в аустеніті середнього шару складає 0,8% % ваг. Причому розпад збідненого аустеніту проходить більш повно, ніж збагаченого, і поверхневий шар краще травиться, ніж зерна аустеніту проміжного шару.

На рис. 2 приведена мікроструктура і графік зміни мікротвердості поверхневого шару чавуну 43, обробленого по режиму 10 (катод).

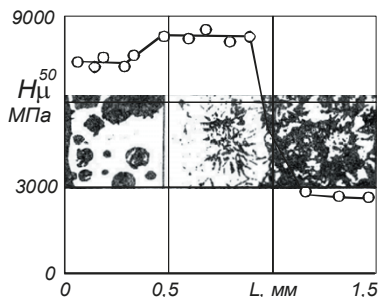


Рис. 2. Мікроструктура і крива розподілу мікротвердості поверхностного шару чавуну 43, обробленого по режиму 10 (катод)

Як і у попередньому випадку, структура чітко складається з трьох шарів: поверхневий світлий товщиною до 0,35 мм, середній світлий, із включеннями первинного графіту товщиною 0,65 мм і темний шар початкової перлітної структури сірого чавуну. Як і у випадку сталі 20, мікротвердість поверхневого шару чавуну на 1000 МПа нижче, ніж проміжного шару. Пов'язано це з тим, що даний шар кристалізується із рідкого стану, де весь графіт розчинений, і при підвищених швидкостях охолодження аустеніт розпадається порівняно слабо.

Проміжна зона утворена внаслідок нагріву чавуну в твердому стані, тобто температура вища за солідус, але нижча ліквідуса. Це приводить до перетворення перліту на аустеніт евтектоїдного складу, який в процесі охолодження розпадається більш повно і дає приблизно таку ж мікротвердість, як і у випадку сталі 20.

У третій зоні ніяких суттєвих змін структури, а отже, і мікротвердості не спостерігається.

Таким чином, можна вважати, що внаслідок впливу електричної дуги на електроди утворюється поверхневий зміцнений шар, що складається з двох ділянок: зовнішнього, утвореного шляхом гартування із рідкого стану, і внутрішнього, зміцненого гартуванням із твердого стану.

Для всіх режимів обробки отримані мікроструктури і графіки розподілу мікротвердості в поверхневих шарах. Результати представлені в табл. 3 у вигляді значень мікротвердості і середньої товщини поверхневих шарів.

Аналіз табличних даних показав, що збільшення потужності дуги від 1,9 до 17,5 кВт приводить до збільшення товщини зміцненого шару анода від 0,05 до 0,22 мм і шару катода від 0,10 до 0,95 мм. Товщина зміцненого шару катода у всіх випадках в 2-4 рази більше товщини анодного шару. Але мікротвердість зміцненого шару анода завжди вища, ніж катода. Пояснюється це

тим, що коли бомбардування анода здійснюється електронами, то катода – позитивними іонами вуглецю. Це приводить, з одного боку, до інтенсивнішого нагріву речовини катода і, з іншого – до збагачення речовини катода вуглецем (якщо електрод-інструмент графіт або залізовуглецевий сплав), що обумовлює стійкість збагаченого аустеніту і пониження мікротвердості продуктів його розпаду.

Таблиця 3

Значення мікротвердості і товщини поверхневого шару сталей і чавунів для різних режимів обробки

Режим обробки	Полярність електрода	Потужність дуги, кВт	Мікротвердість шару, МПа	Товщина поверхневого шару, мм
2	анод	13,8	10000	0,13
3	анод	1,9	9700	0,05
3	катод	1,9	6800	0,10
4	анод	1,6	11000	0,09
5	анод	15,8	9000	0,12
6	анод	16,1	11000	0,25
7	анод	16,1	8000	0,10
9	катод	5,1	8200	0,20
10	анод	17,5	10500	0,22
10	катод	17,5	8650	0,95
11	анод	4,5	7500	0,09
11	катод	4,5	7000	0,12

Фазовий аналіз оброблених поверхонь проводився на установці УРС-50И-М в залізовому випромінюванні. Швидкість руху лічильника 2 град/хв при швидкості руху стрічки самописця 2400 мм/год. Оскільки попередні дослідження поверхонь показали, що в основному в сталях спостерігаються розмиття ліній фериту, було зроблено припущення про наявність мартенсіту. Для перевірки, цього була застосована методика виявлення мартенсіту, запропонована в роботі [7].

Результати фазового аналізу приведені в табл. 4, із якої виходить, що всі оброблені поверхні сталей складаються з: фериту і мартенсіту (ймовірно, настільки дисперсних, що не виявляються за допомогою світлової мікроскопії) зі заниженим вмістом вуглецю порівняно з його вмістом в початкових структурах сталей. У чавунах поверхневі шари містять в основному розмиті лінії аустеніту і мартенсіту.

Таблиця 4

Фазовий склад і вміст вуглецю в мартенсіті поверхневих шарів сталей і чавунів

Режим обробки	Полярність електрода	Речовина електрода	Фазовий склад поверхні сплаву	Вміст вуглецю в мартенсіті % ваг.
3	анод	ст. У8	март., ферит	0,62
4	анод	ст. У8	март., ферит	0,72
5	анод	ст. У8	март., ферит	0,53
7	анод	ст. 20	март., ферит	0,13
8	анод	ст. 40	март., ферит	0,26

Дослідження мікроструктур різних фракцій продуктів ерозії сталей і чавунів показали, що вони мало відрізняються один від одного і подібні мікроструктурам продуктів ерозії сталі У8, обробленої по режиму 2 (рис. 3).



Рис. 3. Мікроструктура продуктів ерозії сталі У8, режим 2,  $\times 70$ . Діаметри часток: а –  $70 \cdot 10^{-5}$ ; б –  $2 \cdot 10^{-4}$ ; в –  $4 \cdot 10^{-4}$ ; г –  $7 \cdot 10^{-4}$

Спільною закономірністю для продуктів ерозії зі сталей, отриманих при розмірній обробці електричною дугою при різних режимах, є наступне:

- 1) продукти ерозії всіх фракцій переважно має сферичну форму;
- 2) значна частина продуктів ерозії середньої і крупної фракцій має усадкові раковини сферичної форми;
- 3) велика частина продуктів ерозії на відміну від поверхневих шарів електродів має внутрішню будову, помітну навіть при 70-кратному збільшенні як на дрібних, так і на крупних фракціях.

Це означає, що продукти ерозії охолоджуються із меншою швидкістю, ніж поверхневі шари оброблених деталей.

Мікропори всередині середніх і крупних фракцій часто займають 50-80% об'єму продуктів ерозії. Отже, їх не можна розглядати як просто усадкові раковини. Ймовірно, в процесі відриву рідкого розплаву від поверхні електрода потоком рідини відбувається захоплення крапель робочої рідини розплавленим металом і випаровування їх зі збільшенням об'єму крапель рідкого розплаву із подальшою кристалізацією тонких поверхневих шарів рідкого розплаву.

В умовах РОД розмір продуктів ерозії збільшується при збільшенні сили струму і зменшенні тиску робочої рідини. На осцилограмах процесу кожному елементарному ерозійному акту і утворенню продуктів ерозії відповідають коливання робочої напруги (рис. 4), подібно до коливань напруги зварювальної дуги при крупно- чи дрібнокрапельному перенесенні матеріалу [8]. При збільшенні тиску робочої рідини амплітуда коливань напруги зменшується (рис. 4, б), що відповідає зменшенню розмірів отримуваних продуктів ерозії і видаленню матеріалу електродів за один ерозійний акт меншими порціями.

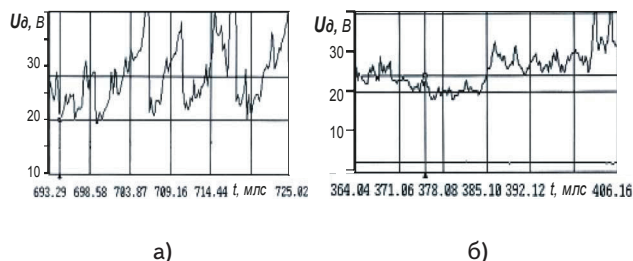


Рис. 4. Осцилограми РОД при утворенні продуктів ерозії: а – крупної фракції (1,3 мм); б – середньої фракції (0,6 мм)

У табл. 5 приведені значення мікротвердості і фазового складу продуктів ерозії, отриманих при різних

режимах обробки. Фазовий аналіз продуктів ерозії проводився на установці ДРОН-2,0 в кобальтовому випромінюванні, швидкість руху лічильника 1 град/хв, швидкість руху стрічки 600 мм/год.

Таблиця 5

Значення мікротвердості і фазового складу продуктів ерозії сталей і чавунів, оброблених на різних режимах

Режим обробки	Значення мікротвердості продуктів ерозії, МПа, фракції			Фазовий склад		
	велика	середня	дрібна	$\alpha$ -Fe	$\gamma$ -Fe	оксиди
1	4656	6470	7620	март., фер.	–	FeO
2	6646	7620	8082	март., фер.	–	FeO
3	6137	7208	7457	март., фер.	–	FeO
4	6178	7010	7675	март., фер.	–	FeO
5	8036	8571	9233	март., фер.	–	FeO
6	4896	5296	5693	март., фер.	–	FeO
7	5867	6470	6579	март., фер.	–	FeO
8	4415	7208	8571	март., фер.	–	FeO
9	6269	7377	8082	март., фер.	ауст.	–
10	5961	7620	7992	мартенсит	ауст.	–
11	7537	8571	9652	мартенсит	ауст.	–

### Висновки

Аналіз експериментальних даних показує, що практично для всіх сталей і чавунів зі зменшенням розміру фракцій (підвищенням швидкості охолодження мікротвердість порошку зростає, наближаючись до мікротвердості оброблених поверхонь.

Зі збільшенням вмісту вуглецю в сталях твердість продуктів ерозії зростає, проте твердість продуктів ерозії чавунів знаходиться між значеннями мікротвердості ст. 40 і ст. У8, що пов'язано з усталеністю пересиченого аустеніту.

Збільшення робочого струму в 3 рази приводить до підвищення мікротвердості продуктів ерозії сталі У8 на 1500 МПа.

За всіх рівних умов обробки заміна катода зі сталі У8 на графітовий приводить до підвищення мікротвердості продуктів ерозії приблизно на 1000 МПа.

З таблиці 5 видно, що продукти ерозії простих сталей складаються з фериту, мартенсіту і окислу заліза, коли продукти ерозії чавунів містять лише аустеніт і мартенсіт.

### Література

1. Носуленко В. И. Электрическая дуга в поперечном потоке среды-диэлектрика как источник тепла для новых технологий // Электронная обработка материалов, 2005, № 2. – С. 26 – 32.
2. Носуленко В. И., Чумаченко О. С. Электроразрядная обработка листовых деталей как новые возможности и высокоэффективная альтернатива традиционным технологиям // Электронная обработка материалов, 2005, № 3. – С. 20 – 25.

3. Палатник Л.С. Рентгенографическое исследование превращений в поверхностном слое металлов, подвергавшихся действию электрических разрядов. – Изв. вузов АН СССР, 1951, т. 15, № 1, с. 80 – 85.
4. Ляпунов М.А. Электроимпульсная обработка высокопрочных металлов и сплавов. - Киев; Наукова думка, 1965.
5. Витлин В.Б., Давыдов А.С. Электрофизические методы обработки в металлургическом производстве. – М.: Металлургия, 1979.
6. Лившиц А.Л., Кравец А.Т. Электроимпульсная обработка металлов. – М.: Машиностроение, 1967.
7. Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгенографический и электронномикроскопический анализ. – М.: Металлургия, 1970, С. 121 – 126.
8. Пономарев В., А.В. да Коста, Скотти А. Влияние капли электродного металла на напряжение дуги при сварке в защитных газах // Автоматическая сварка, 2002, № 4. – С. 7 – 11.

УДК 544.032.65

*В роботі були розглянуті основні принципи метода фотодинамічної терапії з використанням напівпровідникових квантово-розмірних структур в якості фотосенсибілізаторів. Приведені результати досліджень напівпровідникових квантових точок в якості потенційних фотосенсибілізаторів*

*Ключові слова: фотодинамічна терапія, фотосенсибілізатор, квантові точки*

*В работе рассмотрены основные принципы метода фотодинамической терапии с использованием полупроводниковых квантово-размерных структур в качестве фотосенсибилизаторов. Приведены результаты исследований полупроводниковых квантовых точек как потенциальных фотосенсибилизаторов*

*Ключевые слова: фотодинамическая терапия, фотосенсибилизатор, квантовые точки*

*In this work the basic principles of photodynamic therapy method are considered using semiconductor quantum dimensional structures as photosensitizers. The results of investigation of semiconductor quantum dots as potential photosensitizers are present*

*Key words: photodynamic therapy, photosensitizer, quantum dots*

# СПЕКТРО- СКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ КВАНТОВО- РАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ МЕТОДА ФОТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ

**И.В. Березовская\***

E-mail: berezovskaya.irina@gmail.com

**Ю.Т. Жолудов**

Старший научный сотрудник\*

\*Кафедра «Биомедицинские приборы и устройства»

Харьковский национальный университет

радиоэлектроники

просп. Леніна, 14, м.Харків, Україна, 61166

Контактный тел.: (057) 702-03-69

E-mail: rzh@kture.kharkov.ua

## 1. Введение

Важное место в использовании новых технологий занимает медицина. Актуальным и перспективным в современной медицине является метод фотодинамиче-

ской терапии (ФДТ). Метод лечения онкологических заболеваний, который обладает рядом преимуществ перед традиционными методами лечения, что вызывает интерес в изучении этого метода и понимания его внутренних процессов с целью повышения его эффективности.