

*к.т.н. Ершов В.М.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ СТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ В ЖИДКОЙ СРЕДЕ

Приведені результати рентгенівського фазового аналізу поверхневого шару мало вуглецевої сталі після електроіскрового легування залізом, нікелем, вольфрамом, графітом і твердим сплавом на повітрі, у воді і мінеральному маслі.

***Ключові слова:** фазовий рентгенівський аналіз, електроіскрове легування сталі, вода, мінерально масло, залишковий аустеніт.*

Приведены результаты рентгеновского фазового анализа поверхностного слоя малоуглеродистой стали после электроискрового легирования железом, никелем, вольфрамом, графитом и твердым сплавом на воздухе, в воде и минеральном масле.

***Ключевые слова:** фазовый рентгеновский анализ, электроискровое легирование стали, вода, минеральное масло, остаточный аустенит.*

В ранних исследованиях [1,2], посвященных электроискровому легированию (далее – ЭИЛ) сталей, наибольшее внимание уделялось массопереносу вещества анода на поверхность катода - стального изделия. Именно процессом осаждения материала анода и изменением его химического состава катодного материала, большинство исследователей объясняют эффект упрочнения поверхности стальных деталей. В то же время известно, что физико-механические свойства любого материала в значительной степени зависят не только от его химического состава, но и от его фазового и структурного состава [3].

Как было показано нами ранее [4-6], фазовый состав поверхностного слоя сталей после ЭИЛ, существенно отличается от фаз материала, переносимого с анода. Само изменение химического и фазового состава катодного материала происходит во время движения ионов анодного вещества в канале искрового разряда. Поэтому на фазовый и химический состав осаждаемого слоя должно влиять внешнее окружение канала разряда (стриммера). В ранее названных монографиях [1,2] было показано, что в жидких средах (масле, воде) массоперенос при ЭИЛ

усиливается и привес изделий значительно превосходит значения, полученные при обработке на воздухе.

Целью настоящей работы является изучение фазового состава стальной поверхности после ЭИЛ различными анодными материалами на воздухе, в воде и минеральном масле.

Для настоящего исследования, в качестве катодного материала были выбраны цилиндрические образцы диаметром 15 мм и $h = 12$ мм из малоуглеродистой стали марки 08кп (0.07%С) и анодные электроды в виде стержней диаметром 5 мм и длиной 20 мм из армко – железа, никеля, вольфрама, графита и твердого сплава ВК8. Искровое легирование стальной поверхности катодных образцов на воздухе, в воде и минеральном масле выполняли на экспериментальной установке по режимам нашей ранней работы [5]. Легирование в жидкостях выполняли в специальной емкости, где поток жидкости, высотой над образцом в 5-7 мм, постоянно омывал поверхность образца, а продукты выброса и вспенивания над стальной поверхностью, непрерывно удалялись постоянно обновляемыми порциями жидкости. Процесс искрового легирования проводили со скоростью 5 мин/см² с энергией разряда на воздухе 0.5 Дж, а в жидкостях – 0.25 Дж.

После ЭИЛ, образцы подвергали рентгенографированию на дифрактометре ДРОН-1.5 в фильтрованном железном излучении. Дифрактограммы с поверхности обработанных образцов, снятые в интервале дифракционных углов от 40 до 75⁰ 2 ν , т.е. в интервале максимальной интенсивности аналитических линий возможных фаз. записывали на ленту электронного потенциометра ЭПП-09. Фрагменты индцированных дифрактограмм исследуемых образцов приведены на рисунках 1 – 3.

Легирование железом. Эспериментальные исследования начали с ЭИЛ стальных образцов анодными электродами из армко-железа. При этом искровая обработка первого образца производилась на воздухе, второго - в водопроводной воде, а третьего - в трансформаторном масле. Фрагменты дифрактограмм этого варианта обработки образцов приведены на рисунке 1.

На дифрактграмме образца, прошедшего ЭИЛ железом на воздухе (рисунок 1а-1), видно, что в структуре поверхностного слоя фиксируются фазы закаленного состояния (мартенсит и остаточный аустенит) и значительное количество нитридной фазы Fe₄N (линия (111)_н). Появление нитридной фазы в структуре поверхностного слоя малоуглеродистой стали свидетельствует о том, что ионы железа на пути от анода к катоду вступили во взаимодействие с ионами азота воздуха, образовали

нитрид, а некоторая часть ионов азота насытила аустенит катодной поверхности, что вызвало эффект закалки с образованием остаточного азотистого аустенита.

При ЭИЛ железом в воде (рисунок 1а -2) привело к некоторому уширению линии (110) феррита, что свидетельствует о появлении в структуре поверхностного слоя малоуглеродистого мартенсита. Других фаз в структуре слоя не фиксируется, а это означает, что ионизация воды в межэлектродном пространстве в момент разряда, изолирует канал разряда от азота воздуха и не приводит к образованию новых фаз.

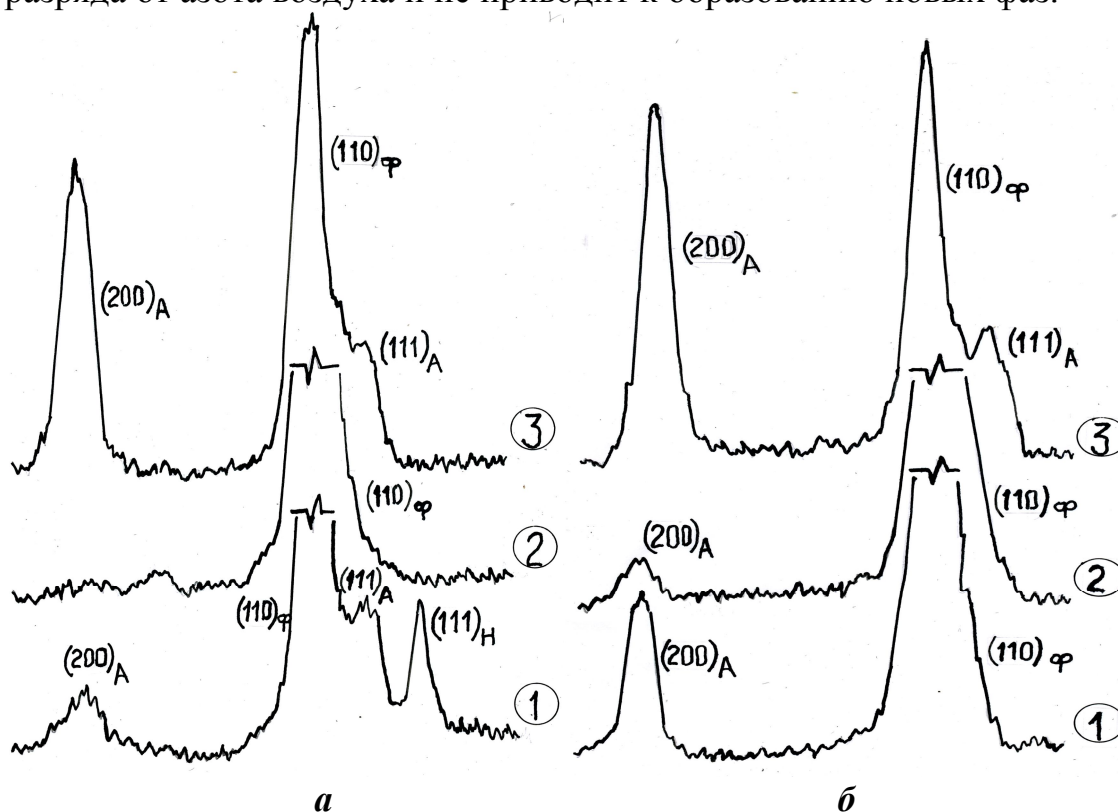


Рисунок 1 – Фрагменты индцированных дифрактограмм стальной поверхности после ЭИЛ армко-железом (а) и никелем (б) на воздухе (1), в воде (2) и масле (3).

Обозначения фаз: А – остаточный аустенит,
Ф – феррит, Н – нитрид Fe₄N

Искровое легирование стали железом в среде минерального масла, как это видно из дифрактограммы рисунка 1а – 3, привело к эффекту закалки слоя с образованием большого количества остаточного аустенита. Других фаз в структуре слоя здесь не обнаружено. На наш взгляд, этот факт свидетельствует об активной роли минерального масла в образовании ионов углерода непосредственно при искровом разряде в межэлектродном пространстве. Вероятно, искровой разряд расщепляет молеку-

лы углеводородов, что приводит к образованию активных ионов углерода, которые насыщают аустенит поверхностного слоя стального образца и вызывают стабилизацию его при быстром охлаждении поверхности. Концентрацию углерода в остаточном аустените можно определить по параметру его кристаллической решетки, как это было сделано нами в работе [5]. Результаты расчета параметров кристаллической решетки остаточного аустенита, интенсивности его дифракционных линий и расчетных значений концентрации углерода приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры кристаллической решетки остаточного аустенита (a), интенсивность и ширина его дифракционной линии (200) (H_{200} и B_{200} соответственно), концентрация углерода в нем (%C) для различных материалов анода и внешних сред ЭИЛ.

Среда ЭИЛ	Показатель	Материал анодного электрода				
		железо	никель	вольфрам	графит	тверд. сплав
Воздух	a , нм	0.3624	0.3596	0.3639	0.3627	0.3627
	H_{200} , мм	20	69	29	22	10
	B_{200} , мрад	10.0	6.9	9.6	10.0	8.7
	%C	1.94	1.09	2.39	2.03	2.03
Вода	a , нм	-	0.3591	-	0.3630	0.3620
	H_{200} , мм	-	19	-	40	18
	B_{200} , мрад	-	10.9	-	7.4	11.7
	%C	-	0.94	-	2.12	1.82
Минерал. масло	a , нм	0,3622	0,3615	0,3622	0,3625	0,3627
	H_{200} , мм	107	118	87	48	140
	B_{200} , мрад	7,8	8,3	7,4	7,8	7,8
	%C	1,88	1,67	1,88	1,97	2,03

Из данных таблицы 1 следует, что ЭИЛ стали железом в минеральном масле привело к получению остаточного аустенита с максимально возможной концентрацией атомов углерода в γ -железе (2%), а малая ширина его линии (200), свидетельствует о химической однородности распределения углерода по сечению слоя (4 – 5 мкм).

Легирование никелем. Как видно из дифрактограмм рисунка 1б-1, искровое легирование стальной поверхности в воздушной среде никелем (типичным элементом, не образующим карбидов), привело к закалке поверхностного слоя стали с образованием большого количества остаточного аустенита без следов нитрида. Причем, согласно данных

таблицы 1, концентрация атомов углерода в аустените оказалась пониженной (0.9-1.0%).

ЭИЛ никелем в воде привел к закалке поверхностного слоя с малым количеством остаточного аустенита (рисунок 1б-2), что однозначно свидетельствует о тормозящем влиянии водной среды на движение ионов никеля от анода к катоду.

Искровое легирование стальной поверхности никелем в среде минерального масла произвело эффект закалки слоя с образованием большого количества остаточного аустенита (рисунок 1б – 3). Вероятно, атомы углерода, полученные из углеводородной среды масла в зоне разряда, насытили аустенит катодного материала до максимальной концентрации (1.7%С), чем и вызвали его стабилизацию.

Легирование вольфрамом ЭИЛ на воздухе стальной поверхности вольфрамом – типичным карбидообразующим элементом, привело к формированию структуры, состоящей из мартенсита, остаточного аустенита (линия $(200)_A$), карбида типа Me_6C (линия 511_{K_2}) и чистого вольфрама (линия 110_w) (рисунок 2а -1).

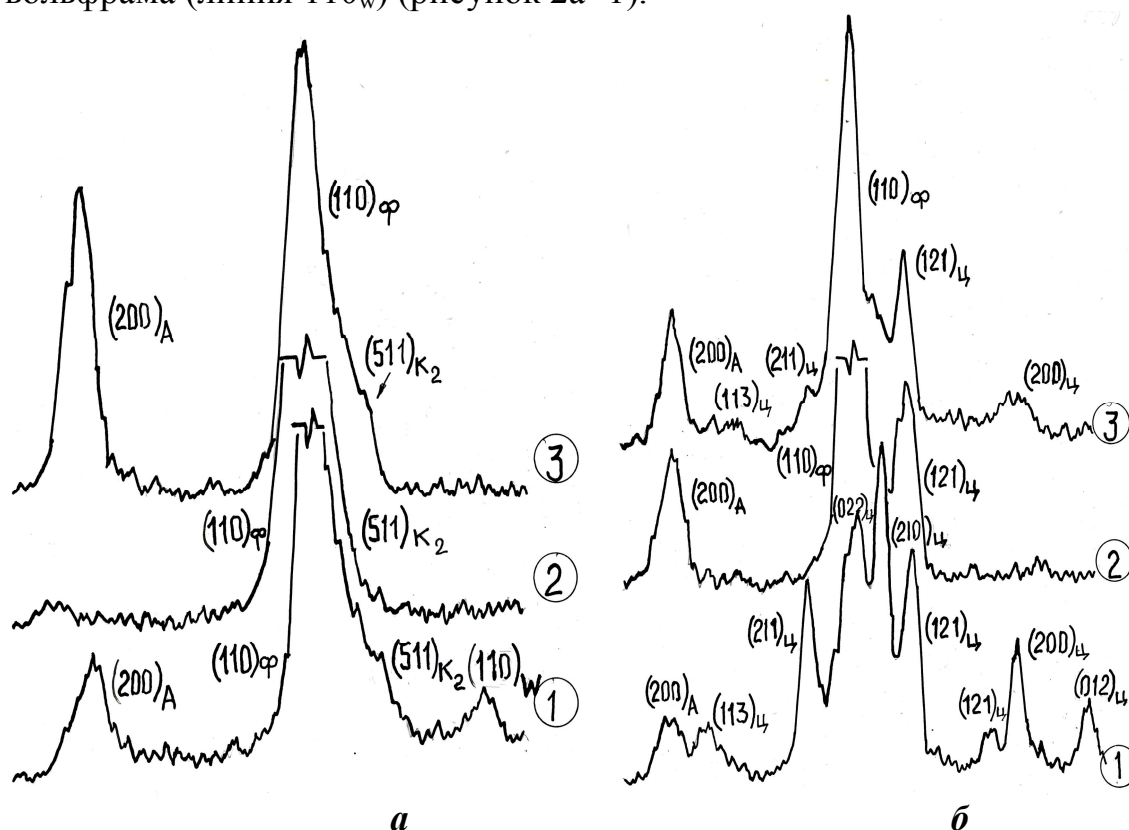


Рисунок 2 – Фрагменты индцированных дифрактограмм стальной поверхности после ЭИЛ вольфрамом (а) и графитом (б) на воздухе (1), в воде (2) и в минеральном масле (3).

Обозначение фаз: А – остаточный аустенит;
Ф – феррит; Ц – цементит; К – карбид типа Me_6C .

Здесь, также как при легировании никелем в воздушной среде, нитрид железа в поверхностном слое не обнаруживается, а это свидетельствует, на наш взгляд, о том, что нитридная фаза может образовываться только из летящих от анода ионов железа, а не из атомов железа в поверхности катода. Легирование вольфрамом в водной среде (рисунок 2а-2) привело к закалке с образованием небольших количеств остаточного аустенита и следов карбида M_6C . Иная картина структуры слоя при легировании вольфрамом в среде минерального масла (рисунок 2а-3). Здесь видно, что закаленный поверхностный слой включает в себя большое количество остаточного аустенита с очень высокой концентрацией атомов углерода (1.9-2.4%) и небольшое количество карбида. Вероятно, ионы углерода, образовавшиеся из диссоциированных молекул масла, ускоряются электростатическим полем разряда и при бомбардировке поверхности стального катода, насыщают его до большой концентрации.

Легирование графитом. Цементация стальной поверхности при ЭИЛ графитом в воздушной среде была изучена нами ранее в работе [4]. В настоящем исследовании был подтвержден эффект цементации поверхностного слоя, то есть факт образования при искровом разряде в воздушной среде большого количества цементитной фазы (рисунок 2б-1). Кроме данной фазы в закаленном слое присутствует небольшое количество остаточного аустенита с высокой концентрацией атомов углерода (таблица 1).

ЭИЛ графитом в водной среде привел к усилению эффекта закалки с увеличенным количеством остаточного высокоуглеродистого аустенита. Кроме того, на дифрактограммах образцов после ЭИЛ графитом в водной среде, отмечается присутствие в слое цементитной фазы с необычным соотношением интенсивности дифракционных линий. Действительно, целый ряд дифракционных линий цементата на дифрактограммах не обнаруживаются, в то время как сильная линия (121) цементита имеет высокую интенсивность (рисунок 2б-2). Возможно, это связано со своеобразной текстурой цементитных кристаллов в слое.

Искровое легирование графитом в среде минерального масла не изменило фазовый состав поверхностного слоя, если сравнивать его с результатом ЭИЛ в воде (рисунок 2б-3). При том же фазовом составе, только интенсивность некоторых дифракционных линий цементита заметно выше. Остаточный аустенит, как и в предыдущем случае, имеет высокую концентрацию углерода (таблица 1).

Легирование твердым сплавом. Как известно из практики поверхностного упрочнения сталей и сплавов, ЭИЛ твердым сплавом находит самое широкое применение [1,2]. При этом легирование поверхностного слоя производят на воздухе, а влияние жидких сред на формирование структуры поверхностного слоя при ЭИЛ, не изучено.

Искровое легирование твердым сплавом марки ВК8 производили на воздухе, в водопроводной воде и минеральном масле. На рисунке 3 приведены дифрактограммы со стальной поверхности для всех трех вариантов сред ЭИЛ.

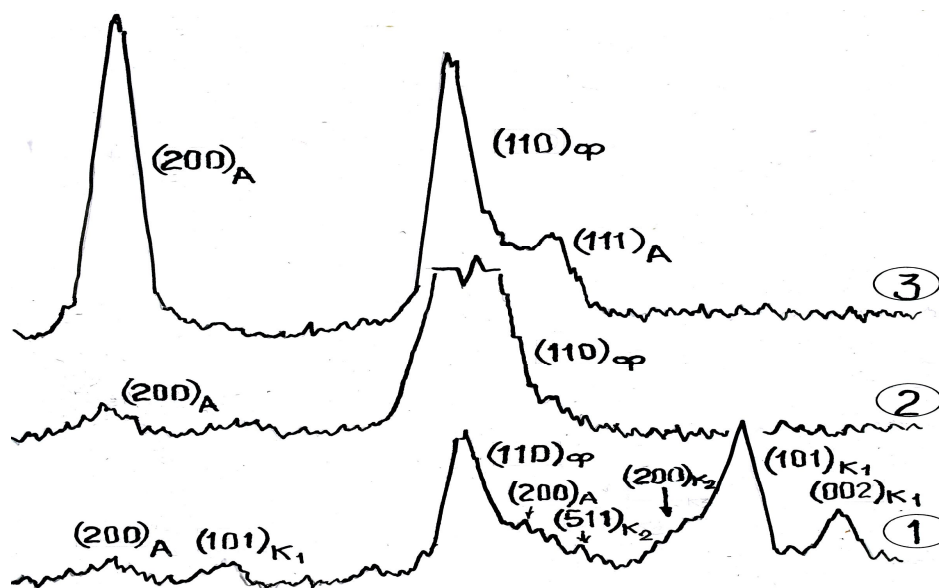


Рисунок 3 – Фрагменты индцированных дифрактограмм стальной поверхности после искрового легирования твердым сплавом ВК8 на воздухе (1), в воде (2) и масле (3). Обозначение фаз: А – остаточный аустенит; Ф – феррит; K_1 – карбид M_2C и K_2 – карбид M_6C .

Как видно из дифрактограмм рисунка 3 -1, ЭИЛ твердым сплавом на воздухе дал небольшой эффект закалки с малым количеством высокоуглеродистого остаточного аустенита (2%С). Кроме того, упрочненный слой включает в себя смесь монокарбида вольфрама W_2C и сложного карбида типа Fe_3W_3C . Аналогичные данные были получены нами ранее [5].

Искровое легирование в воде и масле (рисунки 3 -2, 3) привело к формированию закаленного слоя с остаточным аустенитом, а карбидов в поверхностном слое не обнаруживается. Это свидетельствует о том, что при искровом разряде вольфрамовый карбид WC диссоциирует на

составляющие, а ионы углерода, образующиеся при этом, насыщают аустенит поверхностного слоя, что обеспечивает при охлаждении закалку слоя с образованием высокоуглеродистого остаточного аустенита. При ЭИЛ в масле концентрация атомов углерода в канале разряда дополнительно возрастает из-за диссоциации углеводородов масла, что приводит к дополнительному увеличению количества остаточного аустенита в слое.

Таким образом, на основании полученных результатов исследования, можно сделать следующие выводы:

1. Жидкая среда, в которой происходит искровой разряд, оказывает значительное влияние на фазовый состав осаждаемого на катод слоя металла.

2. Искровое легирование железом в воздушной среде позволяет осаждать на катод анодный материал с нитридной фазой, образующейся из ионизированного азота и ионов железа.

3. Водная среда, в которой происходит искровой разряд, не пропускает ионы анодного металла к катоду. Только легкие ионы углерода проникают в аустенитизированный поверхностный слой катода, насыщают его до значительной концентрации, чем обеспечивают закалку слоя с большим количеством остаточного аустенита.

4. Искровое легирование в минеральном масле создает повышенную концентрацию атомов углерода в канале разряда за счет диссоциации углеводородов, что способствует дополнительному насыщению углеродом аустенита поверхностного слоя катода.

Библиографический список

1. *Верхотуров А.Д. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей / А.Д. Верхотуров, И.М. Муха. – К. : Техника, 1982. - 179 с.*

2. *Иванов Г.П. Технология электроискрового упрочнения инструментов и деталей машин / Г.П. Иванов. – М.: Машгиз., 1961. - 303 с.*

3. *Полевой С.Н. Упрочнение металлов / С.Н. Полевой, В.Д. Евдокимов. – М.: Машиностроение - 1986. - 320 с.*

4. *Ершов В.М. Цементация стальной поверхности при электроискровой обработке графитом / В.М. Ершов // Сборник научных трудов сотрудников ДонГТУ, № 31. – Ладо. - 2011. - С. 219 – 225.*

5. *Ершов В.М. К вопросу о механизме формирования фаз металлов при электроискровом легировании / В.М. Ершов // Сборник научных трудов сотрудников ДонГТУ, №37. - 2012. - С. 170-178.*

6. Ершов В.М. Карбидообразование металлов при электроискровом науглероживании / В.М. Ершов // Сборник научных трудов сотрудников ДонГТУ, №24. - 2007. - С. 212-217.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Петрушовым С.Н.