

С ростом плотности тока до 15 А/дм^2 размеры кристаллитов уменьшаются до $2 - 5 \text{ мкм}$ для исходного и $0,2 - 0,5 \text{ мкм}$ для модифицированных растворов соответственно (см. рис. 2, б, д, з). При плотности тока $\sim 30 \text{ А/дм}^2$ покрытия имеют мелкозернистую структуру (см. рис. 2, в) и состоят из плотно упакованных кристаллитов с размерами $0,2 - 1,0 \text{ мкм}$. Из электролитов, модифицированных ТМ и МЭА, формируются очень плотно упакованные равномерные покрытия, в которых границы кристаллитов трудно-различимы (см. рис. 2, е, и).

Полученные из модифицированных растворов покрытия характеризуются повышенной адгезией к стальной основе без подслоя, выдерживают испытания термоударом и методом нанесения сетки цапапин.

Заключение. Предложен устойчивый к гидролизу кремнефтористый электролит высокоскоростного ($200 - 400 \text{ мкм/час}$) электроосаждения медных покрытий с плотной мелкозернистой структурой (размеры ОКР $30 - 85 \text{ нм}$, а кристаллитов $- 0,2 - 5 \text{ мкм}$) с близким к 100% выходу по току. Показана возможность бесподслоного осаждения этих покрытий на сталь. С помощью вольтамперометрического исследования выявлены причины высокой скорости осаждения меди и отсутствия побочных процессов пассивации электродов и выделения водорода.

Литература

1. Беленький, М.А. Электроосаждение металлических покрытий : справочник / М.А. Беленький, А.Ф. Иванов. – М.: Металлургия, 1985.
2. Electrochem. Solid-State Letters / S. Balakumar [et al.]. – 2004. – Vol. 7. – P. 4 - 7.

УДК 631.3.02.004.67

СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛОВ ПРИ СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫМ И ЛАЗЕРНЫМ МЕТОДАМИ

В.И. Иванов, Ф.Х. Бурумкулов, Р.Н. Задорожний

ГНУ «Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка»

Введение. В последние годы одной из актуальнейших является проблема поверхностного упрочнения инструментов для механической обработки материалов резанием и давлением, деталей машин широкого назначения путем применения износостойких покрытий. Она решается с помощью многих известных способов поверхностной обработки: диффузион-

ным насыщением, ионным и плазменным осаждением, электроискровым легированием, лазерной обработкой, нанесением гальванических покрытий и др., каждый из которых обладает определенными достоинствами и недостатками, имеет рациональную область использования.

Данная работа направлена на улучшение качественных характеристик поверхностного упрочнения металлической поверхности за счет совмещения перспективных методов обработки – электроискрового легирования (ЭИЛ) и лазерной обработки (ЛО), отличающихся высокой экономичностью и возможностью широкого варьирования технологическими параметрами обработки.

Методы исследования. Работы проводились в три этапа: исследования образцов после обработки ЭИЛ, то же после ЛО, то же после совмещенной обработки ЭИЛ + ЛО. Использовались прямоугольные образцы размерами 30×20×10 мм, изготовленные из сталей У10 и Х12М и подвергнутые объемной термообработке. Микротвердость образцов составляла: из стали У10 – 4120 – 5500 МПа, из стали Х12М – 4730 – 6480 МПа.

Исследованиям подлежали поверхностные слои образцов, полученные различными методами по приведенным в табл. 1 технологическим вариантам.

Таблица 1

Технологические варианты упрочняющей обработки исследуемых образцов

Режимы ЭИЛ на «Элитрон-22А»			Режимы ЛО на «Квант-16»	
электрод	рабочий ток, А	удельное время обработки, мин/см ²	энергия, Дж	диаметр пятна, мм
ВК8	1,3	1,0	–	–
			21	3
			28 – 30	3
Т15К6	1,3	1,0	–	–
			21	3
			28 – 30	3
ТН	1,3	1,0	–	–
			21	3
			28 – 30	3
Графит	1,3	1,0	–	–
			21	3
			25 – 26	3
			28 – 30	3
			33 – 34	3
			39 – 40	3
	2,5	0,5	–	–
			25 – 26	3
			39 – 40	3

Для упрочняющей обработки использовались электроискровая установка модели «Элитрон-22А» и лазерная установка модели «Квант-16».

В качестве материала электродов для ЭИЛ были выбраны металло-керамические твердые сплавы ВК8, Т15К6, безвольфрамовый твердый сплав ТН и графит МПГ-6. Выбор основан на том, что эти материалы широко применяются при ЭИЛ для нанесения износостойких покрытий на различные инструменты и детали машин. Кроме того, они значительно отличаются в меньшую сторону по теплопроводности в сравнении со сталями, что позволяет противодействовать возникновению адгезионных связей на контакте трущейся пары или контакте инструмента с заготовкой.

В работе определялись следующие качественные характеристики поверхностных слоев: шероховатость (R_a), микротвердость (H_{μ}), толщина измененного (упрочненного) слоя (h), сплошность (C), дефектность (D), а также их фазовый состав. При этом применялись профилограф-профилометр модели 252, микротвердомер ПМТ-3, рентген-дифрактометр.

Результаты и обсуждение. Результаты исследований отражены в табл. 2.

Исследование образцов после обработки ЭИЛ показало, что значения шероховатости обработанной поверхности различны для разных электродных материалов. При одинаковых режимах обработки шероховатость поверхности покрытий ниже после обработки ЭИЛ графитом.

Металлографическим анализом образцов установлено наличие на их поверхности белого слоя, сплошность которого достаточно высока, за исключением образцов, подвергнутых ЭИЛ графитом. Дефектов в белом слое не наблюдалось, кроме небольшого их числа в покрытии сплавом ТН.

В результате проведенных измерений микротвердости установлено, что у сформированного при ЭИЛ слоя ее значения значительно выше, чем у основного материала. Но существенной разницы в значениях твердости слоев, полученных при обработке электродами Т15К6 и ВК8, не наблюдается. При исследовании поверхностного слоя, полученного при ЭИЛ графитовым электродом, замерить микротвердость белого слоя не представлялось возможным из-за его малой толщины.

Толщина белого слоя зависит от материала электрода. Для выбранных электрических режимов наибольшая толщина при ЭИЛ электродом из сплава ТН (19 мкм), а наименьшая – графитом (7 мкм).

Рентгенофазовый состав показал наличие в поверхностных слоях в основном двух фаз: γ -Fe и α -Fe с преобладанием последней. Только при обработке электродом Т15К6 появилась фаза TiC.

Металлографические исследования образцов после лазерной обработки показали, что дефектов в виде пор и микротрещин не обнаружено.

стали У10 структура верхнего обработанного слоя состоит из мелкоигльчатого мартенсита и значительного количества остаточного аустенита, что также подтверждается данными рентгеноструктурного анализа.

Таблица 2

Качественные характеристики поверхностных слоев, полученных обработкой ЭИЛ, ЛО и совмещением этих методов

Электрод (покрытие)	R_{α} , мкм	$H_{\mu\text{с.с.}}$, МПа	$H_{\mu\text{тв.}}$, МПа	$h_{6\text{с.}}$, мкм	$h_{\text{тв.}}$, мкм	C, %	D , 1/мм	Фазовый состав
Обработка ЭИЛ								
ВК8	2,5	6450 – 8200	3200 – 3400	12	18	75	0	α -Fe γ -Fe
T15K6	3,3	7500 – 9300	3640 – 3850	15	22	69	0	α -Fe γ -Fe TiC – мало
TН	3,1	6900 – 8100	3760 – 3910	19	20	65	4	не опред.
Графит	1,6	не опред.	3150 – 3280	7	10	42	0	не опред.
Обработка лазерная (ЛО)								
Нет	3,4	6450 – 6670	3210 – 3300	45	60	100	0	α -Fe – мало γ -Fe – мало Fe ₃ C
	2,7	6400 – 9250	3200 – 3330	86	120	100	0	
	4,1	4120 – 6550	2940 – 3190	150	180	100	0	
	2,8	4120 – 4730	2990 – 3070	78	100	100	0	
Обработка ЭИЛ + ЛО								
ВК8	2,2	5560	2570	32	70	85	0	α -Fe γ -Fe TiC WC, Fe ₃ W ₃ C
	2,5	5900	4730	35	74	88	0	
T15K6	3,0	6450	5030	20	80	97	2	
	2,9	9250	6450	48	95	92	3	
TН	3,1	9640	4120	64	98	95	0	
Графит	1,7	нет	3620	нет	60	100	0	

Несмотря на значительное количество остаточного аустенита, твердость этого слоя составляет $H_{\mu} = 4120 - 9250$ МПа, что обуславливается спецификой лазерной обработки (фазовый наклеп, большие скорости нагрева и охлаждения и т.п.).

В области термического влияния (второй слой) на границе с исходной структурой, как правило, наблюдается зона отпуска с пониженной микротвердостью в сравнении с исходной.

Исследования образцов, подвергнутых последовательно обработке ЭИЛ и ЛО, показали, что образующийся упрочненный слой состоит также из двух зон – белого слоя, легированного элементами твердого сплава (карбида титана, вольфрама), и второй зоны – зоны термического влияния. Под ней располагается основной металл в исходном состоянии. Микротвердость белого слоя при данных условиях обработки находится в пределах от 5560 до 9640 МПа, что свидетельствует о некотором его разупрочнении.

Поверхностный слой, сформированный обработкой ЭИЛ, при последующей обработке лазерным лучом своих характеристик не теряет. Более того, весьма положительно то, что существенно, до 4 – 5 раз увеличиваются толщина белого слоя и зоны термического влияния (термодиффузионной зоны), а также наблюдается заметное увеличение ее микротвердости.

На некоторых образцах в слое, легированном электродом Т15К6, наблюдаются отдельные микропоры и микротрещины.

Рентгенофазовым анализом установлено наличие в упрочненном слое при легировании сплавами ВК8, Т15К6 твердых фаз Fe_3W_3C , WC , TiC .

Выводы. Совмещение методов ЭИЛ и ЛО обеспечивает получение положительного эффекта, выраженного в более высокой микротвердости легированного слоя и большей толщине зоны термического влияния.

УДК 621.791.78

ОСОБЕННОСТИ ДВУЛУЧЕВОГО ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЯ СИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ

С.В. Шалупаев, Ю.В. Никитюк

УО «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины»

Введение. Важным направлением применения лазеров в технологических целях являются процессы разделения хрупких неметаллических материалов методами лазерного термораскалывания. Одно из первых сообщений по данной тематике было сделано Ламли (Lamley) [1]. В Советском Союзе широкую известность технология лазерного термораскалывания получила благодаря работам Г.А. Мачулки [2]. В дальнейшем В.С. Кондратенком был разработан метод управляемого лазерного термораскалывания (УЛТ) [3], характерной особенностью которого является последовательный нагрев поверхности материала лазерным излучением с длиной волны 10,6 мкм и ее охлаждение воздушно-водяной смесью. К преимуществам УЛТ относятся высокая точность и скорость разделения, его безотходность и низкая энергоемкость [3].