

Электроискровое легирование графитом стальных поверхностей: технология, свойства, применение

* В. Б. Тарельник^a, А. В. Паустовский^b, ** Ю. Г. Ткаченко^b,
В. С. Марцинковский^a, А. В. Белоус^a, Е. В. Коноплянченко^a, *** О. П. Гапонова^c

^aСумский национальный аграрный университет,

ул. Г. Кондратьева, 160, г. Сумы, 40021, Украина, *e-mail: tarelnik@i.ua

^bИнститут проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины,
ул. Кржижановского, 3, г. Киев, 03680, Украина, ** e-mail: tkachenko_yuri@ukr.net

^cСумский государственный университет,

ул. Римского-Корсакова, 2, г. Сумы, 40007, Украина, *** e-mail: gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua

Исследованы закономерности и получены количественные данные о влиянии времени обработки и энергии разряда при электроискровом легировании стальных поверхностей графитом на толщину, микротвердость и шероховатость цементированных слоев. Толщина упрочненного слоя с увеличением энергии разряда и времени легирования увеличивается. При проведении исследований использовали образцы из сталей 40X, 38ХМЮА, 40ХН2МЮА, 30X13, АРМКО-железа, 12Х18Н10Т и стали 20, применялся графит марки ЭГ-4. Исследования проводились на установках «ЭИЛВ-8А», «ЭИЛВ-9», «Элитрон-22А» и «Элитрон-52А», обеспечивающих энергию разряда в диапазоне 0,1–6,8 Дж. Опыты показали, что глубина цементированного слоя и его микротвердость при одинаковых технологических режимах у разных марок сталей существенно отличаются. Глубина цементации тем больше, чем больше содержание углерода в стали в исходном состоянии. Чем больше энергия разряда, тем эта разница значительнее. Проведенные испытания на износ показали, что применение после электроискровой цементации графитом метода безабразивной ультразвуковой финишной обработки является эффективным и позволяет увеличить износостойкость образцов по сравнению с образцами без упрочнения в 7,8 раза для стали 40X и в 11,5 раза для стали 12Х18Н10Т. Исследования подтвердили эффективность применения для снижения шероховатости технологии поэтапного электроискрового легирования графитовым электродом поверхности образца после цементации. На каждом последующем этапе энергия искрового разряда снижалась. Поэтапное ЭИЛ графитом цементированного слоя стали 38ХМЮА позволило снизить шероховатость поверхности со значений $R_a = 11,9–14,0$ мкм до 0,8–0,9 мкм. Апробация результатов исследований в промышленности показала, что электроискровое легирование графитом позволяет решить ряд практических задач.

Ключевые слова: графит, электроискровые покрытия, энергия искрового разряда, цементация, износостойкость, шероховатость поверхности, микротвердость, легированные стали.

УДК 621.9.048.669.268

ВВЕДЕНИЕ

Широкие возможности изменения свойств стальных поверхностей в нужном направлении открываются при использовании графита в качестве анода в процессе электроискрового легирования. Поверхности электродов подвергаются локальному действию высоких давлений ударной волны и температур [1, 2]. При этом происходит мгновенный разогрев анода, и капля или твердая частица материала анода перемещается к катоду. Летящие от анода к катоду фрагменты нагреваются до высокой температуры. Искровой разряд происходит в микроскопически малых объемах и продолжается 50–400 микросекунд. На катоде образуются лунки и микрованны, в которых частицы анода и катода взаимодействуют между собой и окружающей средой, активизируются диффузионные

процессы, что приводит к образованию новых фаз и изменению структуры в поверхностном слое. Имеющийся научный задел в области применения графита в электроискровых технологиях связан как с исследованием фазовых изменений в поверхностных слоях сплавов железа при электроискровом легировании (ЭИЛ) графитом, так и совершенствованием технологии реализации этого процесса.

Установлено [3], что при ЭИЛ графитом сплавов железа формируется упрочненный слой, сочетающий вязкий аустенит и твердый карбид. Высокая скорость охлаждения приводит к формированию фазового состава по метастабильной диаграмме с образованием карбидов и других метастабильных фаз. Графит в свободном виде в этом случае не выделяется. Применяя компактные электроды металлов и порошки графита, ферросилиция или меди, можно получить в

сформированном слое свободный графит, используемый в качестве твердой смазки для повышения эксплуатационных характеристик деталей пар трения из стали, титановых и медных сплавов [4]. Исследования механизма формирования фаз при электроискровом науглероживании [5] показали, что процесс образования цементитной фазы (Fe_3C) в поверхностном слое стальных образцов происходит через этапы образования жидкой фазы, ее насыщения ионами углерода и азота, последующей скоростной кристаллизации с образованием остаточного аустенита и нитрида железа (Fe_4N). Для повышения износо- и коррозионной стойкости медных деталей в ряде химических сред их обрабатывали методом ЭИЛ алюминиевым, а затем графитовым электродами [6].

ЭИЛ графитовым электродом не сопровождается увеличением размеров детали, что дает основание сравнивать его с разновидностью химико-термической обработки – цементацией [7]. Следует отметить, что при традиционной цементации (нагрев до температуры $900\text{--}950^\circ\text{C}$ и для получения 1 мм слоя – выдержка 10 часов в карбюризаторе) необходимо с целью устранения поволоки и короблений сошлифовать значительную часть поверхностного слоя, причем наиболее твердую. Этот метод не всегда позволяет добиться требуемого результата.

В электроискровых технологиях графит также используют для уменьшения шероховатости поверхностей, сформированных предварительной электроискровой обработкой другими электродными материалами (медь, серебро, никель, титан) [8]. Показано, что наиболее эффективное влияние на шероховатость покрытий оказывает ЭИЛ графитом в том случае, когда предварительная обработка осуществляется электродами из металлов, не образующих растворы с углеродом, или карбида.

Технология электроискрового легирования металлических поверхностей графитовым электродом и различные технологии снижения величины шероховатости стальных образцов после электроискровой цементации (ЭЦ) находят применение при необходимости повышения износостойкости и ресурса работы деталей технологического оборудования и инструментов [9–13].

Проведенные исследования и практический опыт показали перспективность развития этого направления электроискровой технологии. Накоплены данные о фазовых и структурных превращениях в поверхностных слоях сталей и различных металлов при электроискровом легировании графитом, есть сведения о влиянии на структуру и свойства технологических режимов

и механической обработки цементированных поверхностей. Наряду с этим отсутствуют количественные данные о влиянии энергии разряда на глубину цементации, свойства и шероховатость металлических поверхностей, влиянии электроискровой цементации на прочность стальных образцов. Необходимо совершенствовать методы обработки цементированных поверхностей с целью снижения шероховатости и повышения уровня свойств.

Цель настоящей работы:

- исследовать влияние энергии разряда и времени легирования на глубину цементированного слоя, его микротвердость и шероховатость поверхности;

- установить наиболее рациональные режимы обработки цементированных поверхностей, используя способ поэтапного электроискрового легирования графитом и метод безабразивной ультразвуковой финишной обработки (БУФО), с целью снижения шероховатости и оптимизации свойств;

- исследовать влияние электроискрового цементирования на износостойкость и прочность при растяжении стальных образцов;

- апробировать результаты исследований в промышленности.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для достижения требуемых параметров точности размеров и шероховатости рабочей поверхности детали после электроискрового легирования графитом необходимо применение дополнительных методов обработки, в качестве которых были использованы: шлифование абразивными кругами и метод безабразивной ультразвуковой финишной обработки [14]. Последний метод основан на том, что в процессе обработки между деформирующим элементом и обрабатываемой поверхностью возникает периодический контакт с частотой ультразвуковых колебаний. В момент контакта мгновенные напряжения существенно выше средних, что вызывает значительную пластическую деформацию. Так же, как и при других методах поверхностного деформирования (выглаживание, обкатывание и др.), в результате обработки уменьшается шероховатость поверхности. Опыт показал, что БУФО решает проблему растягивающих напряжений в слое, образующемся при ЭИЛ, компенсируя их сжимающими напряжениями, возникающими в процессе обработки. БУФО осуществлялась на базе токарно-винторезного станка 16К20 с применением магнитоотрицательного преобразователя ПМС-39 и ультразвукового генератора УЗУ-030.

Для исследований использовали специальные стальные образцы в виде катушки, состоящей из двух дисков диаметром 50 мм и шириной 10 мм, соединенных между собой промежуточными валиками диаметром 15 мм, которые имели два технологических участка такого же диаметра для закрепления в патроне при обработке. Поверхности дисков перед электроискровой цементацией шлифовали до $R_a = 0,5$ мкм. Образцы закрепляли в патроне токарного станка, после чего производились ЭЦ в автоматизированном режиме и обработка БУФО (рис. 1).



Рис. 1. БУФО стального образца после электроискровой цементации.

При проведении исследований использовали образцы из сталей 40X, 38ХМЮА, 40ХН2МЮА, 30X13, АРМКО-железа и 12X18Н10Т и плоские образцы из стали 20 размером 15x15x6 мм. В качестве электрода применялся графит марки ЭГ-4. ЭЦ проводилась на установках «ЭИЛВ-8А» и «ЭИЛВ-9». При исследовании способа поэтапной ЭЦ с целью снижения шероховатости использовали установки «Элитрон-22А» и «Элитрон-52А», обеспечивающие энергию разряда в диапазоне 0,1–6,8 Дж.

Металлографические исследования шлифов поверхностного слоя образцов в сечении проводились на оптическом микроскопе «Неофот-21». Измеряли микротвердость на микротвердомере ПМТ-3 вдавливанием алмазной пирамиды под нагрузкой 0,5 Н.

Глубину цементации (h) определяли металлографическим методом как расстояние от поверхности изделия до середины переходной зоны. Обычно переходная зона – это доэвтектоидная зона, где в структуре имеются одинаковые объемы феррита и перлита.

Время ЭЦ образцов составляло 5 мин/см². Проведенные эксперименты показали, что рост глубины упрочненного слоя после 5 минут ЭЦ резко замедляется (рис. 2). При энергии разряда 0,5 Дж упрочненный слой в основном формируется в течение одной минуты.

Оптимальное время ЭЦ единицы площади образца при поэтапной обработке с целью сни-

жения шероховатости определяли опытным путем, исходя из степени повреждаемости обрабатываемой поверхности (табл. 1). При большем времени обработки шероховатость практически не изменялась.

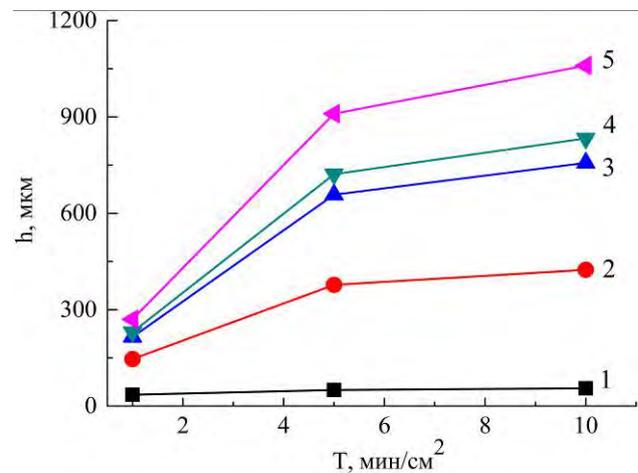


Рис. 2. Зависимость глубины упрочненного слоя от времени легирования графитом стали 40X при энергии разряда 0,5 (1), 1,41 (2), 2,83 (3), 3,4 (4) и 6,8 Дж (5).

Режимы ЭЦ и применяемые методы последующей обработки поверхности приведены при изложении результатов исследований.

Для апробации интегрированной технологии упрочнения стальных деталей ЭЦ и БУФО проводили сравнительные испытания на износостойкость с целью замены технологии изготовления защитной втулки масляных уплотнений из монель-металла, которые применяются в центробежных компрессорах. Испытания на износостойкость проводили на машине трения СМЦ-2 по схеме «кольцо-плоский образец» [15]. Кольца изготавливались из сталей 40X и 12X18Н10Т и монель-металла с покрытием по стандартной технологии. В качестве контртела использовался прямоугольный образец из твердого сплава Т15К6 с шероховатостью рабочей поверхности $R_a = 1,6$ мкм. Испытания проводились в условиях ограниченного смазывания. В качестве смазки использовалось масло индустриальное И20. Оценка износостойкости выполнялась по линейному износу поверхности образцов. Для оценки износостойкости использовался метод искусственных баз по ГОСТ 16524-72. Скорость скольжения составляла $V = 0,8$ м/с, нагрузка – 10 МПа, продолжительность испытаний – 9 часов, что соответствует пути трения 26 км.

На всех этапах исследований измерялась шероховатость поверхности на приборе профилографе – профилометре мод. 201 завода «Калибр», модернизированном таким образом, что результаты через специальное устройство передавались на компьютер.

Статические испытания на растяжение образцов (диаметром 10 и рабочей длиной 50) до и

Таблица 1. Время ЭЦ в зависимости от энергии разряда

Энергия разряда, Дж	0,1	0,31	0,53	0,9	2,83	3,4	6,8
Производительность ЭЦ, мин/см ²	2,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5

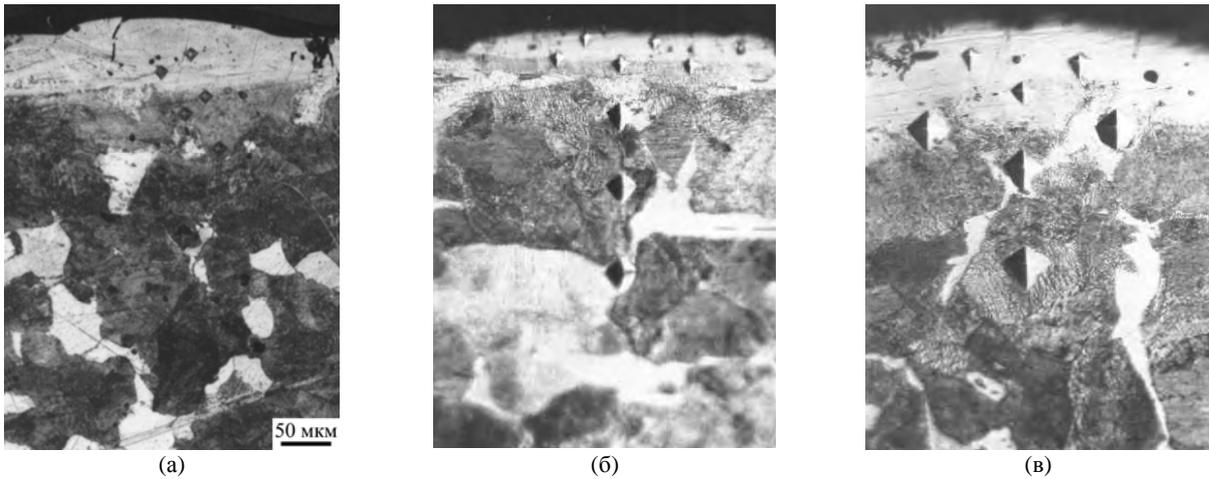


Рис. 3. Вид поперечного сечения образцов из сталей 38ХМЮА (а) и 40Х (б, в) после ЭЦ. Время обработки – 1 мин /см²: (а) – $W_p = 0,9$ Дж, $\times 200$; (б) – $W_p = 0,60$ Дж, $\times 200$; (в) – $W_p = 2,60$ Дж, $\times 250$.

после ЭЦ проведены по стандартной методике в соответствии с ГОСТ 1497-84.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эффективность использования поверхностно упрочненных деталей связана как с показателями геометрических характеристик поверхности (шероховатость, волнистость), поскольку большинство разрушений начинается на поверхности, так и свойствами приповерхностного и упрочненного слоя. При проведении исследований основными параметрами оценки качества поверхностного слоя после электроискровой цементации являлись: толщина цементированного слоя, его микротвердость и структура, шероховатость поверхности. Одновременно изучали структуру и твердость сердцевины стальных образцов. Опыты показали, что с увеличением времени обработки и энергии разряда толщина цементированных слоев возрастает, а структура материала основы остается неизменной (рис. 3).

В структуре образцов можно выделить три характерные зоны: цементированный («белый») слой, переходную зону с мелкодисперсным зерном и зону основного металла. Чем ближе к поверхности, тем выше микротвердость в приповерхностном слое. Микротвердость на поверхности составляет для сталей 38ХМЮА и 40ХН2МЮА 1350 и 760 НВ соответственно (рис. 4). По мере углубления микротвердость снижается и плавно переходит в твердость основы соответственно 225 и 250 НВ. Снижение твердости на поверхности цементированных образцов связано с гетерогенным строением упрочненного слоя, присутствием на поверхно-

сти тонкой трооститной (дисперсной смеси феррита и цементита) полосы или сетки. Толщина трооститной полосы составляет 50–60 мкм. После БУФО такая полоса, как правило, отсутствует. Опыты показали, что при ЭЦ стали 20 трооститной полосы нет.

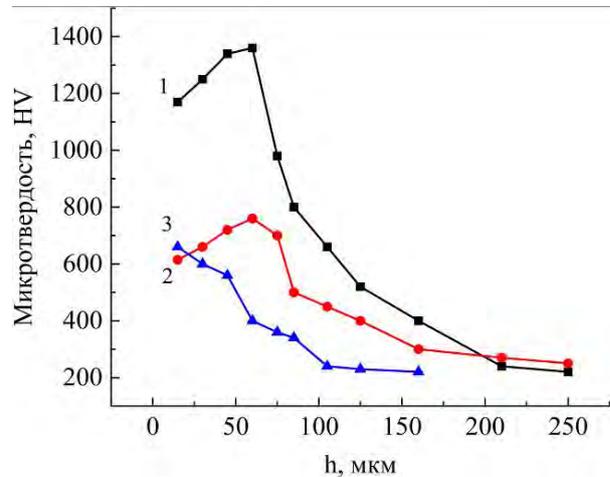


Рис. 4. Распределение микротвердости НВ в цементированном слое стали 38ХМЮА (1) и стали 40ХН2МЮА (2) после ЭЦ ($W_p = 0,9$ Дж, 5 мин/см²) и стали 40Х после поэтапной цементации ($W_p = 2,83$ и 0,9 Дж, 5 и 2 мин/см² соответственно) и обработки БУФО (3).

Установлено, что при цементации стальных поверхностей электроискровым легированием толщина упрочненного слоя с увеличением энергии разряда и времени легирования увеличивается. При этом возрастает и шероховатость поверхности (рис. 5). Максимальная микротвердость на поверхности стали 38ХМЮА изменяется в пределах 900–1010 МПа.

Результаты исследований общей толщины слоя повышенной твердости, максимальной микротвердости на поверхности и шерохо-

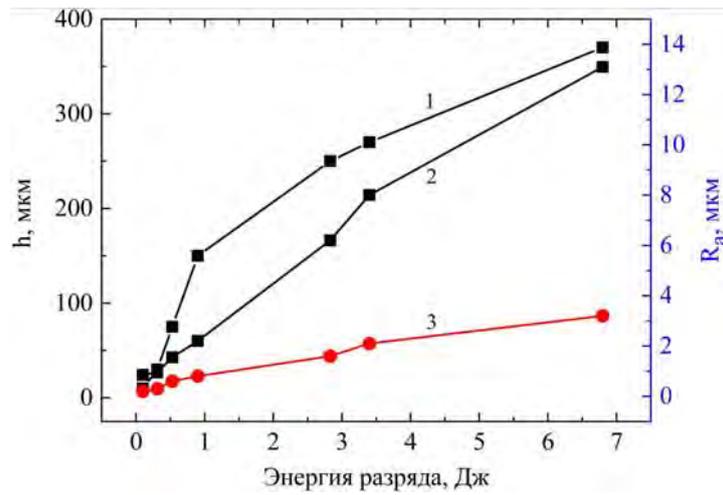


Рис. 5. Зависимость от энергии разряда толщины цементированного слоя h (1), шероховатости поверхности R_a после ЭЦ (2) и после ЭЦ и БУФО (3) стали 38ХМЮА.

Таблица 2. Глубина слоя, микротвердость и шероховатость поверхностей образцов из сталей 40Х и 12Х18Н10Т после электроискровой цементации при использовании БУФО и шлифовки

Энергия разряда, Дж	Метод обработки образца	Глубина слоя после обработки, мкм		Микротвердость, HV		Шероховатость R_a , мкм	
		40Х	12Х18Н10Т	40Х	12Х18Н10Т	40Х	12Х18Н10Т
0,6	ЭЦ+БУФО	50	50	980	880	0,2	0,2
	ЭЦ+БУФО+ШЛ	40	48	920	841	0,6	0,6
	ЭЦ+ШЛ	10	18	780	723	0,6	0,6
	ЭЦ	50	48	987	1013	0,8–0,9	0,9–1,0
2,83	ЭЦ+БУФО	657	210	920	970	0,8	0,8
	ЭЦ+БУФО+ШЛ	635	195	895	950	0,8	0,8
	ЭЦ+ШЛ	580	130	770	790	0,8	0,8
	ЭЦ	658	200	1000	974	5,6–6,5	5,8–6,7
6,8	ЭЦ+БУФО	908	244	854	985	0,8	0,8
	ЭЦ+БУФО+ШЛ	895	220	840	875	0,8	0,8
	ЭЦ+ШЛ	856	110	824	670	0,8	0,8
	ЭЦ	910	250	1050	1100	11,9–14,1	10,0–14,5

ватости после ЭЦ, БУФО и шлифовки сталей 40Х и 12Х18Н10Т приведены в табл. 2.

Исследования показали, что глубина цементированного слоя и его микротвердость при одинаковых технологических режимах у разных марок сталей существенно отличаются. Была проведена серия опытов со сталями различных составов. На рис. 6 приведены результаты измерения глубины упрочненного слоя при ЭЦ в течение 1 и 5 мин/см² подложек из АРМКО-железа и ряда сталей при различных значениях энергии разряда.

Опыты показали, что существует четкая зависимость: толщина цементированного слоя тем больше, чем большее содержание углерода в стали. Глубина цементирования у сталей 40Х и 30Х13 со средним содержанием углерода в исходном состоянии, близким 0,3–0,4%, существенно больше, чем у АРМКО-железа и стали 12Х18Н10Т, содержащей до 0,12% углерода. Чем больше энергия разряда, тем эта разница более значительна. При ЭЦ сталей 40Х и

12Х18Н10Т в течение 5 мин/см² с энергией разряда 6,8 Дж разница толщин упрочненных слоев достигает 660 мкм.

СПОСОБ ПОЭТАПНОЙ ЭЦ

Несмотря на то, что обработка БУФО стальных поверхностей после электроискрового легирования графитовым электродом значительно снижает шероховатость, для многих деталей машин это является недостаточным. Применение после ЭЦ шлифовки не представляется возможным, так как в данном случае удаляется как минимум 50–100 мкм поверхностного слоя с наибольшей твердостью. Есть данные, что для снижения шероховатости электроискрового покрытия достаточно в качестве заключительной операции провести «мягкое» легирование графитом. Выглаживание происходит как за счет нагрева и размягчения гребешков под действием раскаленного графитового электрода, так и выброса металла катода и разрушения выступающих частей поверхности в местах приложения

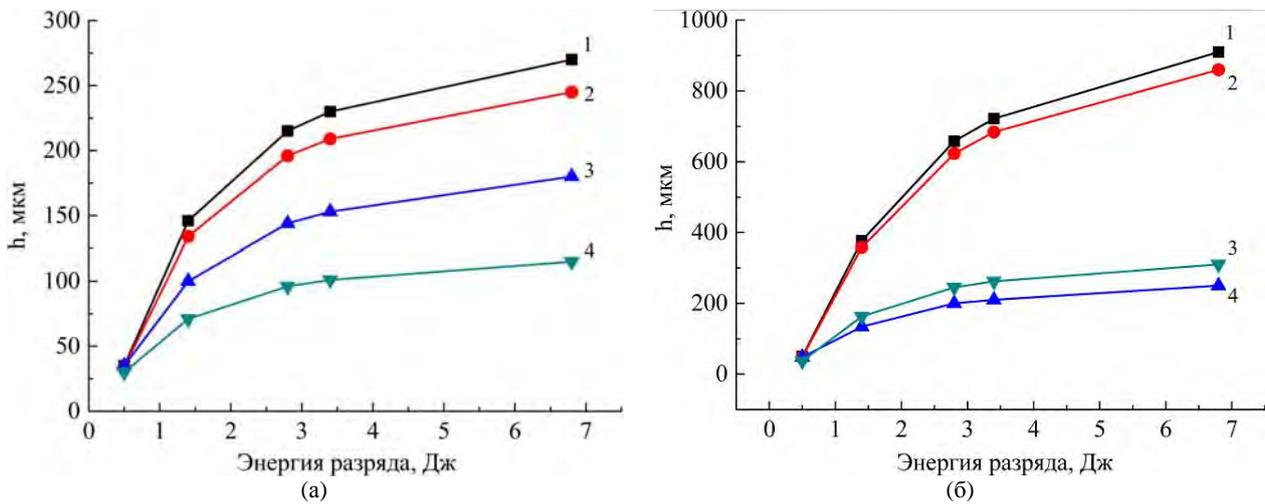


Рис. 6. Зависимость толщины цементированного слоя h от энергии разряда после ЭЦ поверхности в течение 1 (а) и 5 (б) мин/см² сталей 40X (1), 30X13 (2), АРМКО-железа (3) и стали 12X18N10T (4).

Таблица 3. Результаты снижения шероховатости поверхности стальных образцов после цементации электроискровым способом

Марка стали	Энергия разряда, W_p , Дж	Шероховатость, R_a , мкм						
		Производительность, T , мин/см ²						
		после ЭЦ	Энергия разряда, W_p , Дж					
			0,1	0,31	0,53	0,9	2,83	3,4
38ХМЮА	0,1	0,8–0,9						
	0,31	0,9–1,0	$\frac{0,8-0,9}{2}$					
	0,53	1,4–1,7	$\frac{0,8-0,9}{2}$	$\frac{0,9-1,0}{1}$				
	0,9	1,7–2,1	$\frac{0,9-1,0}{2}$	$\frac{1,0-1,1}{1}$	$\frac{1,4-1,7}{1}$			
	2,83	5,7–6,9	$\frac{1,1-1,2}{14}$	$\frac{1,2-1,3}{6}$	$\frac{1,6-1,9}{3}$	$\frac{1,7-2,2}{2}$		
	3,4	8,3–8,9	$\frac{1,3-1,6}{18}$	$\frac{1,4-1,7}{7}$	$\frac{2,0-2,3}{4}$	$\frac{2,3-2,7}{3}$	$\frac{5,7-6,7}{0,5}$	
	6,8	11,9–14,0	$\frac{1,6-1,9}{25}$	$\frac{1,8-2,1}{13}$	$\frac{2,4-2,6}{8}$	$\frac{2,6-3,1}{5}$	$\frac{6,3-6,9}{0,5}$	$\frac{8,5-9,0}{0,5}$
40ХН2МЮА	2,83	5,7–6,7	$\frac{1,0-1,1}{14}$	$\frac{1,2-1,3}{6}$	$\frac{1,5-1,8}{3}$	$\frac{1,7-2,1}{2}$		
12X18N10T	2,83	2,9–3,7	$\frac{0,8-0,9}{14}$	$\frac{1,0-1,2}{6}$	$\frac{1,5-1,8}{3}$	$\frac{1,7-2,0}{2}$		

импульсов [8, 16]. Опыт показал, что «мягкое» легирование графитом не всегда в достаточной мере снижает шероховатость поверхности. В наших исследованиях была использована технология электроискрового легирования поверхности образца после цементации тем же графитовым электродом, что и цементация, но поэтапно, при этом на каждом последующем этапе энергия искрового разряда снижалась [9, 10]. На каждом очередном этапе выполнялось электроискровое легирование графитовым электродом с такой энергией разряда, при которой формируется поверхность с шероховатостью в 2–3 раза ниже, чем на предыдущем этапе. Время легирования, определенное опытным путем, в зависимости от величины энергии разряда изменялось в диапазоне 0,5–2 мин/см² (табл. 1). Увеличение времени легирования не

способствует снижению величины шероховатости поверхности.

В табл. 3 представлены результаты поэтапного снижения величины шероховатости образцов после ЭЦ с различной энергией разряда. Так, например, после ЭЦ стали 38ХМЮА при энергии разряда 2,83 Дж шероховатость поверхности составляет $R_a = 5,7–6,9$ мкм. После ЭИЛ графитовым электродом с $T = 2$ мин/см² и использованием режима с энергией разряда 0,9 Дж шероховатость поверхности составляет $R_a = 1,7–2,2$ мкм. Последующим поэтапным легированием можно получить $R_a = 1,1–1,2$ мкм.

Для сравнения в табл. 3 приведены результаты поэтапного снижения шероховатости сталей 40ХН2МЮА и 12X18N10T после ЭЦ с мощностью разряда $W_p = 2,83$ Дж.

Для того чтобы максимально снизить шероховатость поверхности, например стали 38ХМЮА, после ЭЦ с энергией разряда 6,8 Дж, которая составляет $R_a = 11,9\text{--}14,0$ мкм, необходимо:

- на первом этапе произвести ЭИЛ графитом при $W_p = 2,83$ Дж, то есть с энергией разряда, обеспечивающей снижение величины шероховатости ~ в 2 раза (с 11,9–14,0 до 6,3–6,9 мкм). Время ЭИЛ 0,5 мин/см²;

- на втором этапе произвести ЭИЛ графитом при $W_p = 0,9$ Дж, то есть с энергией разряда, обеспечивающей снижение величины шероховатости ~ в 3 раза (с 6,3–6,9 до 1,7–2,1 мкм). Время ЭИЛ 2 мин/см²;

- на третьем этапе произвести ЭИЛ графитом при $W_p = 0,1$ Дж, то есть с энергией разряда, обеспечивающей снижение величины шероховатости ~ в 2 раза (с 1,7–2,1 до 0,8–0,9 мкм). Время ЭИЛ 2 мин/см².

Поэтапное ЭИЛ графитом цементированного слоя стали 38ХМЮА позволило снизить шероховатость поверхности со значений $R_a = 11,9\text{--}14,0$ мкм до 0,8–0,9 мкм.

Следует отметить, что одноэтапное ЭИЛ графитовым электродом с целью снижения шероховатости поверхности после ЭЦ на любом режиме не позволяет достичь аналогичных результатов.

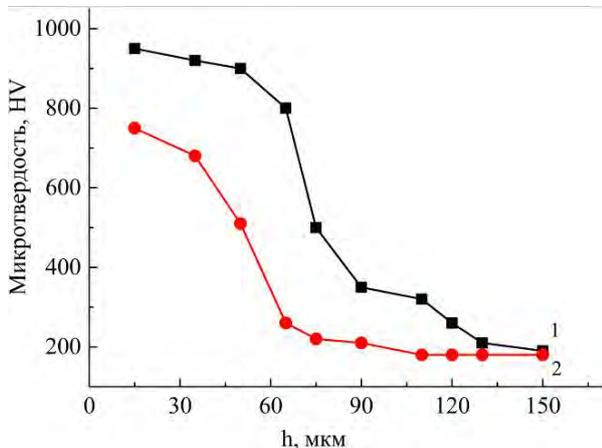


Рис. 7. Распределение микротвердости HV по глубине цементированного слоя стали 20 после ЭЦ при $W_p = 2,83$ Дж (1) и после поэтапного ЭЦ при $W_p = 2,83; 0,9$ и $0,1$ Дж (2).

Анализируя распределение микротвердости в образцах из стали 20 после ЭЦ при $W_p = 2,83$ Дж и поэтапной ЭЦ при $W_p = 2,83; 0,9$ и $0,1$ Дж (рис. 7), можно сказать, что в обоих случаях наибольшая микротвердость упрочненного слоя отмечается ближе к поверхности. Для первого образца она составляет 920–950 HV при глубине распространения до 60 мкм, а для второго образца – 690–720 HV при глубине 30 мкм. По мере углубления для обоих образцов величина микротвердости плавно снижается, и на глубине 130 и 100 мкм соответствует микротвердости

основы – 180 HV. Уменьшение толщины и микротвердости упрочненного слоя для образца с поэтапным ЭЦ можно объяснить как влиянием ударного действия нагретого до высокой температуры графитового электрода, так и незначительной эрозией подложки. Ранее было показано [17], что механическое ударное воздействие на цементированный слой приводит к измельчению карбидов и перераспределению углерода в поверхностном слое толщиной 30–40 мкм.

Таким образом, в результате поэтапной ЭЦ для стали 20:

- снижается шероховатость поверхностного слоя с $R_a = 4,79$ до $R_a = 1,10$ мкм и с $R_z = 13,62$ до $R_z = 3,14$ мкм;

- снижается микротвердость в «белом» слое с 920–950 HV до 690–720 HV;

- снижается со 130 до 100 мкм общая глубина зоны повышенной твердости поверхностного слоя.

ВЛИЯНИЕ ЭЦ И БУФО НА ПРОЧНОСТЬ

Целесообразность применения методик нанесения упрочняющих защитных покрытий в значительной степени определяется величиной, знаком и характером распределения остаточных технологических напряжений в поверхностных слоях системы «основа-покрытие». Покрытие, независимо от способа его получения, всегда влияет на механические свойства материала [18]. Надежность защиты и упрочнения изделий при эксплуатации, износостойкость конструктивных материалов с покрытием во многом определяют статическая и циклическая прочности изделий с покрытием. В связи с этим исследование влияния ЭЦ на прочность при растяжении, предел текучести, относительное удлинение и сужение стальных образцов является актуальной научной задачей. Полученные в работе данные представлены в табл. 4.

Как видно из приведенных в табл. 4 данных, упрочнение образцов методом ЭЦ приводит к увеличению в 1,1 раза предела прочности при растяжении и в 1,04 раза предела текучести для образцов из стали 40Х; в 1,04 и соответственно в 1,06 раза для образцов из стали 12Х18Н10Т. Применение дополнительно БУФО увеличивает предел прочности при растяжении испытываемых материалов в 1,22 раза для образцов из стали 40Х и в 1,7 раза – для образцов из стали 12Х18Н10Т.

Электроискровая обработка стальной поверхности графитом приводит к появлению в системе «покрытие-основа» термических напряжений. Величина и знак напряжений зависят от соотношения коэффициентов термического расширения фаз, формирующих покрытие, и стали, а также

Таблица 4. Прочность при растяжении, предел текучести, относительное удлинения и сужение образцов из сталей 40X и 12X18H10T после ЭЦ

Энергия разряда, Дж	Предел текучести, МПа		Предел прочности при растяжении, МПа		Относительное удлинение, %		Относительное сужение, %	
	ЭЦ	ЭЦ + БУФО	ЭЦ	ЭЦ + БУФО	ЭЦ	ЭЦ + БУФО	ЭЦ	ЭЦ + БУФО
Сталь 40X								
–	315	315	570	570	17	17	38	38
0,6	327	375	627	695	16	18	37	36
2,83	319	380	615	690	15	18	36	35
3,4	320	378	605	685	15	17	36	36
Сталь 12X18H10T								
–	196	196	510	510	40	40	55	55
0,6	208	264	530	867	39	28	54	45
2,83	207	270	526	860	37	27	55	43
3,4	207	255	525	858	37	30	53	44

температурных интервалов реализации технологического процесса. Полученные данные отражают влияние остаточных технологических напряжений, действующих в поверхностных слоях и формируемых в процессе ЭЦ, на изменение характеристик статической прочности конструкционных материалов. Представленные значения прочности при растяжении свидетельствуют о том, что величина и знак напряжений в цементированном слое способствуют повышению прочности стального образца после ЭЦ.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для апробации технологии цементирования графитом стальных деталей электроискровым способом и последующего применения БУФО проведены сравнительные испытания на износостойкость с целью замены технологии изготовления защитной втулки масляных уплотнений, которые применяются в центробежных компрессорах. Традиционно в плавающих уплотнениях компрессоров в качестве материала основы запорных втулок применяется монель-металл (сплав на основе никеля, содержащий 27–38% меди). Этот сплав обладает хорошей коррозионной стойкостью, достаточно высоким пределом прочности и хорошей пластичностью в горячем и холодном состоянии. Для увеличения ресурса работы втулок на рабочую поверхность плазменным напылением или вакуумной наплавкой наносится коррозионно-стойкий и износостойкий никелевый сплав Хастеллой, в состав которого входят молибден, хром, железо, углерод и ряд легирующих добавок.

Проведенные испытания на износ (табл. 5) показали, что применение электроискровой

цементации графитом и метода БУФО является эффективным и позволяет увеличить износостойкость образцов по сравнению с образцами без упрочнения в 7,8 раза для стали 40X и в 11,5 раза для стали 12X18H10T. По сравнению с покрытием из сплава Хастеллой на монель-металле износостойкость образцов из сталей 40X и 12X18H10T, упрочненных по технологии ЭЦ+БУФО, выше в 1,2 и в 1,1 раза соответственно. Стальные защитные втулки уплотнений компрессоров нашли практическое применение и заменили втулки из монель-металла.

На основании проведенных исследований на предприятии «ТРИЗ» (Товарищество реализации инженерных Задач, г. Сумы, Украина) разработан ряд технологических процессов упрочнения деталей для компрессоров. Две трети всех отказов компрессоров происходит вследствие нарушения работоспособности уплотнений. Поэтому одним из наиболее ответственных узлов, обеспечивающих герметичность компрессорного агрегата, его надежную, безопасную и безотказную работу, является узел уплотнения. Рабочая поверхность деталей этого узла должна быть выполнена из твердого износостойкого материала, а ее основа должна обладать достаточной пластичностью для обеспечения возможности напрессовки на вал и требований усталостной прочности. Цементация после посадки на вал термообработанных втулок из стали 38X2MЮА осуществляется электроискровым способом с применением БУФО (рис. 8а). Аналогично упрочнялись контактирующие торцевые поверхности уплотнительных плавающих колец (рис. 8б) и ответных деталей корпуса и крышки. Процесс ЭЦ торцевых поверхностей колец плавающих уплотнений и защитных втулок производился на установке «Элитрон 22 А»

Таблица 5. Износ образцов из сталей 40X, 12X18H10T и покрытия из сплава Хастеллой на монель-металле

Наименование технологии	Линейный износ образцов, мкм		
	40X	12X18H10T	Покрытие из сплава Хастеллой на монель-металле
Без упрочнения	30,98	50,35	4,8
	30,89	49,78	
	31,07	50,02	
ЦЭЭЛ+БУФО	4,41	4,51	
	3,98	4,45	
	4,12	4,34	
ЦЭЭЛ+БУФО+ШЛ	4,39	4,71	
	4,18	4,69	
	4,21	4,73	
ЦЭЭЛ+ШЛ	9,51	10,02	
	9,48	10,10	
	9,56	10,08	



(а)



(б)

Рис. 8. Внешний вид защитной втулки узла уплотнения после ЭЦ (а) и кольцо плавающего уплотнения центробежного компрессора, на котором указаны места ЭЦ (б).

при энергии разряда 0,5 Дж. Глубина упрочненного слоя составила 30–50 мкм, микротвердость 900–1100 НВ. После чего с целью снижения шероховатости и трения производилось легирование контактных поверхностей серебром при энергии разряда 0,05 Дж.

Использование ЭЦ, а затем метода БУФО позволяет получить качественную упрочненную поверхность, параметры которой достигаются при меньших (в 5–10 раз) затратах, чем с помощью материалов и технологий, применяемых ранее. Метод ЭЦ можно применять без полной разборки агрегатов, упрочняться могут детали любых размеров.

ВЫВОДЫ

1. Установлены закономерности и получены количественные данные о влиянии времени обработки и энергии разряда при электроискровом легировании стальных поверхностей графитом на толщину, микротвердость и шероховатость цементированных слоев. Толщина упрочненного слоя с увеличением энергии разряда и времени легирования растет, достигая для стали 40X 0,9 мм при микротвердости 1100 НВ.

2. Показано, что глубина цементированного слоя и его микротвердость при одинаковых

технологических режимах у разных марок сталей существенно отличаются. Глубина ЭЦ тем больше, чем больше содержание углерода в стали в исходном состоянии. Чем больше энергия разряда, тем эта разница значительнее.

3. Исследования подтвердили эффективность применения для снижения шероховатости технологии поэтапного электроискрового легирования графитовым электродом поверхности образца после цементации. На каждом последующем этапе энергия искрового разряда снижалась. Поэтапное ЭИЛ графитом цементированного слоя стали 38ХМЮА позволило снизить шероховатость поверхности со значений $R_a = 11,9–14,0$ мкм до 0,8–0,9 мкм.

4. Апробация результатов исследований в промышленности показала, что ЭИЛ графитом позволяет формировать на поверхностях стальных деталей слои повышенной твердости и износостойкости без изменения исходного размера детали. Полученные значения прочности при растяжении свидетельствуют о том, что величина и знак напряжений в цементированном слое способствуют повышению прочности стального образца после ЭЦ. Все это позволило решить ряд практических задач, повысив эксплуатационные характеристики деталей компрессоров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. *Электроискровой способ изменения исходных свойств металлических поверхностей*. М.: Изд. АН СССР, 1958. 177 с.
2. Верхотуров А.Д. *Электрофизические и электрохимические методы обработки*. 1983, (1), 3–5.
3. Михайлюк А.И., Гитлевич А.Е., Иванов А.И., Фомичева Е.И. и др. *ЭОМ*. 1986, (4), 23–27.
4. Михайлюк А.И., Гитлевич А.Е. *ЭОМ*. 2010, **46**(5), 37–44.
5. Ершов В.М. *Сборник научных трудов сотрудников Донбасского государственного технического университета*. Алчевск: Изд-во ДонГТУ, 2011. Вып. 31, 219–225.
6. Михайлюк А.И., Ревенко В.Г., Натаров Н.Н. *Физика и химия обработки материалов*. 1993, (1), 101–106.
7. Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревутский В.М. *Электроискровое легирование металлических поверхностей*. Кишинев: Штинца, 1985. 196 с.
8. Михайлюк А.И. *ЭОМ*. 2003, **39**(3), 21–23.
9. Марцинковский В.С., Тарельник В.Б., Братушак М.П. *Способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием*. RU пат. 2468899, МПК В 23Н 9/00, 2012. Бюл. № 34.
10. Марцинковский В.С., Тарельник В.Б., Братушак М.П. *Спосіб цементації сталевих деталей електроерозійним легуванням*. UA пат.101715, МПК 23Н 9/00, 2013. Бюл. № 8.
11. Марцинковский В.С., Тарельник В.Б. *Металлообработка*. 2011, (6), 116–119.
12. Файншмидт Е.М., Астафьев Г.И., Шевченко О.И. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2011, (4), 26–31.
13. Михайлюк А.И. *Металловедение и термическая обработка*. 2000, (7), 23–26.
14. Холопов Ю.В., Зинченко А.Г., Савиных А.А. *Безабразивная ультразвуковая финишная обработка металлов*. Л.: ЛДНТП, 1988. 18 с.
15. Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Колмаков А.Г., Рыбакова Л.М. *Методы испытаний на трение и износ*. М: Интермет инжиниринг, 2001. С. 357.
16. Лазаренко Н.И. *Электроискровое легирование металлических поверхностей*. М.: Машиностроение, 1976. 46 с.
17. Сизова О.В., Колубаев Е.А. *Известия Вузов. Физика*. 2003, (2), 27–30.
18. Изволенский Е.В., Краснов А.Н., Матвеев Н.В. *Проблемы прочности*. 1984, (10), 38–41.

Поступила 18.01.17

Summary

Consistencies were studied and quantity data collected about an effect of processing time and discharge energy on the thickness, micro-hardness and roughness of consolidated layers during electric-spark alloying of the steel surfaces with graphite. It was found that the thickness of the strengthened layer increases with the gain of the discharge energy and the time of alloying. In the study, the following materials were used: specimens of steels 40X, 38XMЮА, 40XH2MЮА, 30X13, АРМКО-iron, 12X18H10T as well as steel 20, graphite ЭГ-4. Tests were carried out on devices: «EILV-8A», «EILV-9», «Elitron-22A» и «Elitron-52A», that provide the discharge energy in the range 0.1–6.8 J. The experiments demonstrated that the depth and the micro-hardness of the consolidated layer treated with the same technological regime are significantly different for different steel grades. The depth of consolidation increases with a higher initial carbon content in the steel. The higher the discharge energy, the greater this difference. Wear tests showed that usage of the method of nonabrasive ultrasound final processing after electric-spark alloying with graphite is effective and allows increasing wear-resistance of specimens by 7.8 times for steel 40X and by 11.5 times for steel 12X18H10T. The research confirmed that the staged electric-spark alloying of specimen surface after consolidation with graphite electrode is effective for roughness decreasing. The discharge energy was lowering at each next stage. The staged electric-spark alloying of the consolidated layer of steel 38XMЮА with graphite allowed decreasing of the surface roughness from $R_a = 11.9\text{--}14.0\ \mu\text{m}$ to $0.8\text{--}0.9\ \mu\text{m}$. The industrial tests showed that the electric-spark alloying with graphite offers solutions to a number of practical tasks.

Keywords: graphite, electric-spark coating, spark discharge energy, consolidation layer, wear-resistance, surface roughness, micro-hardness, alloyed steel.