

Г. В. Кирик, д.т.н., доцент, президент, Лауреат Государственной премии, П. Е. Жарков, к.т.н., доцент, академик УТА, вице-президент, Лауреат Государственной премии, (концерн «NICMAS», г. Сумы, Украина), В. Б. Тарельник, д.т.н., проф., Е. В. Коноплянченко, к.т.н., доцент, И. Е. Волошин, аспирант (Сумский национальный аграрный университет, г. Сумы, Украина)

## Новый способ нитроцементации стальных деталей

Предложен способ упрочнения поверхностей термообработанных стальных деталей, который включает цементацию методом электроэрозионного легирования (ЦЭЭЛ) и азотирование, которые осуществляют одновременно. Таким образом, происходит процесс нитроцементации методом ЭЭЛ (НЦЭЭЛ). С целью снижения шероховатости поверхности, операцию НЦЭЭЛ проводят, по крайней мере, в два этапа со снижением энергии разряда на каждом последующем этапе.

**Ключевые слова:** электроэрозионное легирование, цементация, азотирование, нитроцементация, поверхностный слой, микротвердость, шероховатость.

Запропоновано спосіб зміцнення поверхонь термооброблених сталевих деталей, який включає цементацію методом електроерозійного легування (ЦЕЕЛ) і азотування, які здійснюють одночасно. Таким чином, відбувається процес нитроцементації методом ЕЕЛ (НЦЕЕЛ). З метою зниження шорсткості поверхні, операцію НЦЕЕЛ проводять, що найменше, в два етапи зі зниженням енергії розряду на кожному наступному етапі.

**Ключові слова:** електроерозійне легування, цементація, азотування, нитроцементація, поверхневий шар, микротвердість, шорсткість.

Proposed a method for hardening the surfaces of heat-treated steel parts, which includes carburizing by electroerosion alloying (CEEA) and nitriding, which are carried out simultaneously. Thus, the process of nitrocarburizing by the EEA method (NCEEA) takes place. In order to reduce the surface roughness, the NCEEA operation is performed in at least two stages with a decrease in the discharge energy at each subsequent stage.

**Key words:** electroerosive alloying, carburizing, nitriding, nitrocarburizing, surface layer, microhardness, roughness

### Постановка проблемы в общем виде.

Большинство ответственных деталей и узлов центробежных компрессоров, насосов, турбин и других роторных машин работают при высоких скоростях, нагрузках и температурах, а также в условиях коррозионного, абразивного и других видов воздействия рабочих сред. Повышение надёжности и долговечности динамического оборудования остаётся актуальной задачей и требует комплексного подхода.

Применение упрочняющих и защитных покрытий существенно повышает качество продукции в машиностроении, обеспечивает надёжную работу узлов и деталей в тяжёлых условиях эксплуатации оборудования, позволяет снизить материальные и энергетические затраты на эксплуатацию машин, уменьшить расход дорогостоящих конструкционных материалов. Поэтому исследования, направленные на создание новых и повышение качества уже существующих защитных технологий актуальны и своевременны.

### Анализ последних исследований и публикаций.

Одним из наиболее простых с технологической точки зрения методов упрочнения деталей является поверхностное электроэрозионное легирование (ЭЭЛ). Его достоинствами являются: локальность воз-

действия, малый расход энергии, отсутствие объёмного нагрева материала и др. Применяя ЭЭЛ, можно повысить твердость металлической поверхности нанесением на нее материала более высокой твердости или диффузионным введением в поверхностный слой необходимых химических элементов из окружающей среды или из материала анода [1].

Однако ЭЭЛ термообработанных деталей, подвергаемых в условиях эксплуатации высоким нагрузкам, например, деталей штампов, валов прокатных станков и других подобных деталей, не всегда приводит к желаемому результату. Причиной выхода из строя некоторых из них является то, что под слоем повышенной твердости после ЭЭЛ появляется зона отпуска, то есть, зона сниженной твердости. Это приводит к так называемому продавливанию упрочненного слоя и, как следствие, к быстрому износу детали. ЭЭЛ в данном случае принесет вред, особенно если допустимый износ легированной поверхности превышает толщину слоя повышенной твердости.

В соответствии со способом, [2], проведение ионного азотирования (ИА) или до, или после ЭЭЛ позволяет устранить зоны пониженной твердости при использовании электродов из чистых твердых износостойких металлов. Кроме того, при

этом наблюдается плавное изменение твердости упрочненного слоя и увеличение общей глубины зоны повышенной твердости.

Недостатком такого способа является низкая производительность процесса, поскольку уже при повышении производительности до 0,4 см<sup>2</sup>/мин, нежелательная шероховатость и сплошность поверхности при ЭЭЛ хромом, вольфрамом и твердым сплавом Т15К6, соответственно, составляют 4, 6; 7,8 и 5,4 мкм и 90, 55 и 80%, что значительно сужает область применения способа для упрочнения деталей машин.

Известен способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием (ЦЭЭЛ) [3], который имеет ряд достоинств, основными из которых являются: достижение 100% сплошности упрочнения поверхностного слоя; повышение твердости поверхностного слоя детали за счет диффузионно-закалочных процессов; легирование можно осуществлять в строго указанных местах, не защищая при этом остальную поверхность детали; отсутствие объёмного нагрева детали и связанных с этим поводом и короблений; простота применения технологии; гибкая привязка к имеющемуся оборудованию; процесс упрочнения не требует специальной подготовки и высокой квалификации рабочего.

В данном способе используется

энергия разряда 0,036–6,8 Дж и производительность 1,0–0,2 см<sup>2</sup>/мин.

При цементации стальных деталей ЭЭЛ толщина упрочненного слоя зависит от энергии разряда и времени легирования (производительности процесса). С увеличением энергии разряда и времени легирования толщина упрочненного слоя увеличивается. При этом возрастает и шероховатость поверхности. Так при ЭЭЛ углеродом среднеуглеродистой легированной стали 40X (Ra=0,5 мкм) с производительностью 0,2 см<sup>2</sup>/мин при энергии разряда 6,8 Дж толщина слоя повышенной твердости составляет более 1,15 мм. Шероховатость поверхности при этом соответствует Ra=11,7–14,0 мкм.

Известен также способ ЦЭЭЛ, который используют для снижения шероховатости поверхности деталей машин и, следовательно, для расширения области их применения. Данный способ состоит в том, что ЦЭЭЛ проводят поэтапно, снижая на каждом этапе энергию разряда, [4]. В известном способе используется энергия разряда 0,036 – 6,8 Дж и производительность 14,0–2,0 см<sup>2</sup>/мин.

Несмотря на очевидные достоинства, основным из которых является снижение шероховатости поверхности деталей машин с сохранением качества поверхностного слоя, данный способ имеет ряд недостатков. Прежде всего, это - снижение микротвердости поверхностного слоя в результате отпуска при повторной (поэтапной) обработке поверхности графитовым электродом, но с меньшей энергией разряда. Кроме того, снижается глубина слоя повышенной твердости.

Для устранения указанных выше недостатков создан способ упрочнения поверхностей термообработанных стальных деталей [5], который включает операцию ЭЭЛ и операцию ИА, причем, операцию ИА осуществляют или до, или после операции ЭЭЛ в течение времени, достаточного для насыщения поверхностного слоя детали азотом на глубину зоны термического влияния. Операцию ЭЭЛ выполняют графитовым электродом с энергией разряда 0,1 – 6,8 Дж и производительностью 0,2 – 4,0 см<sup>2</sup>/мин. При этом ЦЭЭЛ проводят, по крайней мере, в два этапа со снижением энергии разряда на каждом последующем этапе, причем, первый этап легирования графитовым электродом выполняют с энергией разряда 0,1–6,4 Дж и производительностью 0,2 – 4,0 см<sup>2</sup>/мин., а второй – с энергией разряда 0,1 – 2,83 Дж и производительностью 0,2 – 2,0 см<sup>2</sup>/мин.

В данном случае поэтапная ЦЭЭЛ до ИА приводит к снижению микротвердости в зоне термического влияния (т. е. под слоем повышенной твердости может образоваться зона пониженной твердости), при этом после ИА в течение времени, достаточного для насыщения поверхностного слоя детали азотом на глубину зоны термического влияния, провал твердости устраняется.

В табл. 1 представлено распределение микротвердости в поверхностном слое образцов стали 40X, термообработанных на твердость 3900–4000 МПа и упрочненных различными способами, а также приведены результаты влияния этих способов упрочнения на шероховатость формируемого упрочненного по-

верхностного слоя.

Анализ табл. 1 показывает, что при ЦЭЭЛ, как и при ЭЭЛ хромом, вольфрамом и твердым сплавом Т15К6 образцов стали 40X, термообработанных на твердость 3900–4000 МПа, под слоем повышенной твердости располагается зона отпуска («провал твердости»). В данном случае эта зона располагается на глубине ≈60 мкм и составляет 3800 МПа. ИА проводимое, как до ЦЭЭЛ, так и после устраняет характерный «провал твердости» и в обоих случаях отмечается плавное снижение твердости.

Таким образом, при упрочнении термообработанных деталей методом ЭЭЛ, необходимо до или после легирования подвергать их ИА, в течение времени достаточном для насыщения металла азотом на глубину зоны термического влияния. При этом в качестве электрода инструмента целесообразно применять графитовый электрод, что обеспечивает при всех прочих равных условиях наибольшую твердость и наименьшую шероховатость поверхностного слоя. В результате совершается процесс насыщения поверхностного слоя азотом и углеродом, который называется нитроцементацией.

Следует отметить, что наибольшая твердость (12000 МПа) и глубина зоны повышенной твердости (≈220 мкм) отмечается при ЦЭЭЛ проводимой после ИА.

Аналогичные результаты можно получить, если ИА в течение времени, достаточного для насыщения поверхностного слоя детали азотом на глубину зоны термического влияния проводить до ЦЭЭЛ. Причем, с целью снижения шероховатости поверхности, ЦЭЭЛ следует проводить

**Таблица 1. Шероховатость и распределение микротвердости в поверхностном слое образцов из стали 40X, термообработанных на твердость 3900–4000 МПа, после упрочнения различными способами [5]**

Способ упрочнения	Микротвердость, МПа (шаг измерения ~30 мкм)								Ra, мкм
	1	2	3	4	5	6	7	8	
ИА	7200	5010	4800	4800	4800	4010	3900	4000	0,5
ЦЭЭЛ	7010	3800	4300	4100	3900				0,8
ЦЭЭЛ + ИА	8200	5600	5510	5010	4600	4400	4310	3980	0,8
ИА + ЦЭЭЛ	12000	6500	6200	4600	4410	4410	4230	4160	0,8
ЭЭЛс r + ИА*	8000	5500	5400	5100	5000	4300	3900		2,6
ЭЭЛW + ИА*	8000	5000	4200	4100	4000	4000	3900		3,3
ЭЭЛТ15К6+ИА*	5000	3800	4200	4100	4000	4000	4000		5,1
ИА+ЭЭЛс r*	9000	5200	5000	4900	4700	4500	3950		2,6
ИА+ЭЭЛW*	10000	4800	4200	4000	3900	3900			3,3
ИА+ЭЭЛТ15К6*	7000	5500	4900	4700	4600	4500	3950		5,1

\* - данные взяты из [2].



Рис. 1. Установка «ЭИЛ – 8А»

позатупно, снижая на каждом этапе энергию разряда. В данном случае твердость в зоне термического влияния снижаться не будет, так как свойства азотированной поверхности практически не изменяются при повторных нагревах вплоть до 500 - 600 °С, в то время как при нагревах цементированной и закаленной поверхности до 225-275 °С ее твер-

дость снижается.

При ЦЭЭЛ стальной азотированной поверхности происходит процесс аналогичный нитроцементации, только в данном случае насыщение поверхности азотом и углеродом протекает поочередно, а во время традиционной нитроцементации – одновременно.

Несмотря на ряд положительных результатов, предложенных выше, существующий метод не лишен недостатков. Это прежде всего: большая длительность процесса ИА (до 24 часов), большие затраты как электроэнергии, так и необходимых реагентов, изготовление образца свидетеля для контроля результатов упрочнения, а также необходимость защиты отдельных участков поверх-

ности изделия, например, резьб от упрочнения. Следовательно, задача повышения качества термообработанных деталей не утратила своей актуальности.

Для устранения указанных выше недостатков создан способ упрочнения поверхностей термообработанных стальных деталей, который, как и способы, известные из уровня техники, включает ЦЭЭЛ, который отличается тем, что в зону легирования подается азот. В данном случае одновременно протекают два процесса ЦЭЭЛ и азотирование, что по сути является процессом нитроцементации методом ЭЭЛ (НЦЭЭЛ).

Таким образом, целью настоящей работы является совершенствование технологии упрочнения термообработанных деталей за счет объединения методов ЦЭЭЛ и азотирования, путем проведения процесса ЭЭЛ графитовым электродом в окружающей среде азота.

#### Методика и обсуждение результатов

Для исследования процессов цементации и нитроцементации методом ЭЭЛ использовали специальные образцы из стали 40Х, термообработанные аналогично способу [5], на твердость 3900-4000 МПа. Образцы изготавливали в виде катушки, состоящей из двух дисков, диаметром 50 мм и шириной 10 мм, соединенных между собой проставкой диаметром 15 мм, имеющей два технологических участка такого же диаметра. Поверхности дисков шлифовали до Ra=0,5 мкм.

Процесс ЦЭЭЛ и НЦЭЭЛ осуществляли в автоматическом режиме с помощью установки модели «ЭИЛ – 8А» (рис. 1). В табл. 2 приведены основные режимы ее работы, а также рекомендуемая производительность процесса ЭЭЛ. Для емкостей накопительного конденсатора С=20 мкФ и С=300 мкФ установка имеет по 8 режимов работы.

Образцы закрепляли в патроне токарного станка, после чего производили:

- ЦЭЭЛ путем поэтапного легирования графитовым электродом марки ЭГ-4 (ОСТ 229-83) с энергией разряда 0,42 Дж (1-й этап) и 0,14 Дж (2-й этап) и с производительностью, соответственно, 0,4 и 0,2 см<sup>2</sup>/мин;
- НЦЭЭЛ путем поэтапного легирования графитовым электродом марки ЭГ-4 (ОСТ 229-83) с энергией разряда 0,42 Дж (1-й этап) и 0,14 Дж (2-й этап) и с производительностью, соответственно, 0,2 и 0,1 см<sup>2</sup>/мин.

Способ нитроцементации осуществляется за счет использования

Таблица 2. Режимы работы установки «ЭИЛ – 8А»

Номер режима	Производительность процесса ЭЭЛ см <sup>2</sup> /мин		Энергия разряда W, Дж	
	C=20 мкФ	C=300 мкФ	C=20 мкФ	C=300 мкФ
1	0,14-0-13	0,25-0,20	0,01	0,14
2	0,14-0-13	0,33-0,25	0,014	0,22
3	0,17-0,14	0,33-0,25	0,02	0,28
4	0,20-0,17	0,50-0,33	0,024	0,35
5	0,25-0,20	1,0-0,50	0,03	0,42
6	0,25-0,20	1,0-0,67	0,034	0,49
7	0,33-0,25	2,0-1,0	0,038	0,56
8	0,33-0,25	2,0-1,0	0,043	0,63

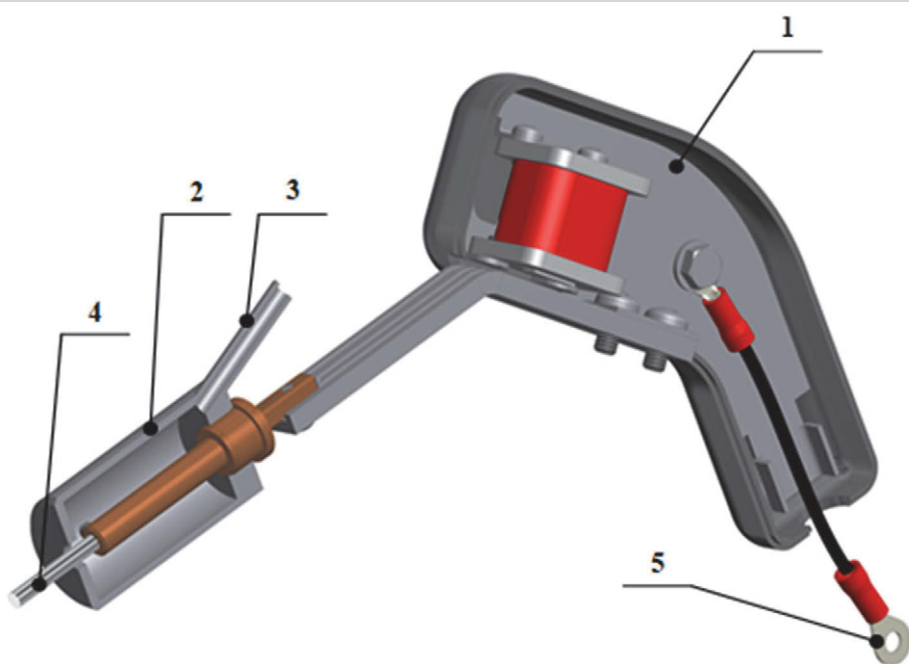


Рис. 2. Устройство для подачи газа в зону легирования:  
1 - вибратор, 2 - оправка для подвода газа, 3 - штуцер подвода газа, 4 - электрод, 5 - подсоединение вибратора к генератору ЭЭЛ

приспособления, которое закрепляется на вибраторе установки ЭЭЛ (рис. 2).

В связи с тем, что при НЦЭЭЛ происходит охлаждение легируемого участка струей азота, производительность при НЦЭЭЛ была в два раза снижена на обоих этапах, что в два раза увеличило время процесса при нитроцементации.

Из упрочненных образцов вырезали сегменты, из которых изготовляли шлифы, которые исследовали на оптическом микроскопе «Неофот-2», где проводили оценку качества слоя, его сплошности, толщины и строения зон подслоя – диффузионной зоны и зоны термического влияния. Одновременно проводили дюрOMETрический анализ на распределение микротвердости в поверхностном слое и по глубине шлифа от поверхности.

Замер микротвердости выполняли на микротвердомере ПМТ-3 вдавливанием алмазной пирамиды под нагрузкой 0,05 Н. На всех этапах обработки измеряли шероховатость поверхности на приборе профилографе - профилометре мод. 201 завода «Калибр». В табл. 3 представлено распределение микротвердо-

Таблица 2. Результаты ЦЭЭЛ и НЦЭЭЛ поверхностного слоя образцов из стали 40Х

Способ упрочнения	Микротвердость, МПа (шаг измерения ~30 мкм)					Ra, мкм
	1	2	3	4	5	
ЦЭЭЛ	7010	3800	4300	4100	3900	0,8
НЦЭЭЛ	10500	6200	5300	4300	4000	0,7

сти в поверхностном слое образцов стали 40Х, термообработанных на твердость 3900-4000 МПа и упрочненных ЦЭЭЛ и НЦЭЭЛ, а также приведены результаты влияния этих способов упрочнения на шероховатость формируемого упрочненного поверхностного слоя.

На рис. 3 показаны микроструктуры поверхностного слоя стали 40Х и распределение микротвердости по глубине слоя при цементации и нитроцементации методом ЭЭЛ.

Анализ табл. 3 и рис. 3 показывает, что при ЦЭЭЛ образцов стали 40Х под слоем повышенной твердости располагается зона отпуска («провал твердости»). В данном случае эта зона располагается на глубине ~60...70 мкм и составляет 3800 МПа.

Процесс НЦЭЭЛ, проведенный

на указанных режимах, устраняет характерный «провал твердости», при этом отмечается общее повышение и плавное снижение твердости в переходной зоне. Снижение шероховатости поверхности при НЦЭЭЛ объясняется защитой зоны легирования струей азота от окружающей воздушной (окислительной) среды.

#### Выводы:

1. Установлено, что при упрочнении термообработанных деталей необходимо процесс ЭЭЛ поверхностного слоя углеродом, совмещать с азотированием, причем, с целью снижения шероховатости поверхности, НЦЭЭЛ проводить поэтапно, снижая на каждом этапе энергию разряда.

2. Определено, что наибольшая микротвердость (10500 МПа), глубина зоны повышенной твердости (120 мкм) и меньшая шероховатость (Ra = 0,7 мкм) отмечаются при НЦЭЭЛ.

#### Список литературы:

1. Лазаренко Н.И. Электроискровое легирование металлических поверхностей. – М. Машиностроение, 1976. – 46 с.
2. Патент України на винахід № 103701, 23Н 5/00. Спосіб зміцнення поверхонь сталевих деталей, підданих термічній обробці / В.С. Марцинковський, В.Б. Тарельник / Опубл. 11.11.2013, Бюл. № 21.- 3с.
3. Патент Российской Федерации на изобретение № 2337796. МПК В 23Н 9/00. Способ цементации стальных деталей электроэрозийным легированием. / Марцинковский В.С., Тарельник В.Б., Белоус А.В.; Заявл. 05.10.2006; Опубл. 10.04. 2008, Бюл. № 31.- 3с.
4. Патент України на винахід № 101715, 23Н 9/00. Спосіб цементції сталевих деталей електроерозійним легуванням/ В.С. Марцинковський, В.Б. Тарельник, М.П. Братуцак / Опубл. 25.01.2013, Бюл. № 8.-3с.
5. Патент Российской Федерации на изобретение № 2603932 Способ упрочнения поверхностей термообработанных стальных деталей / В.Б. Тарельник, В.С. Марцинковский, Т.П. Волошко, Богдан Антошевский/ Опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34.-3с.

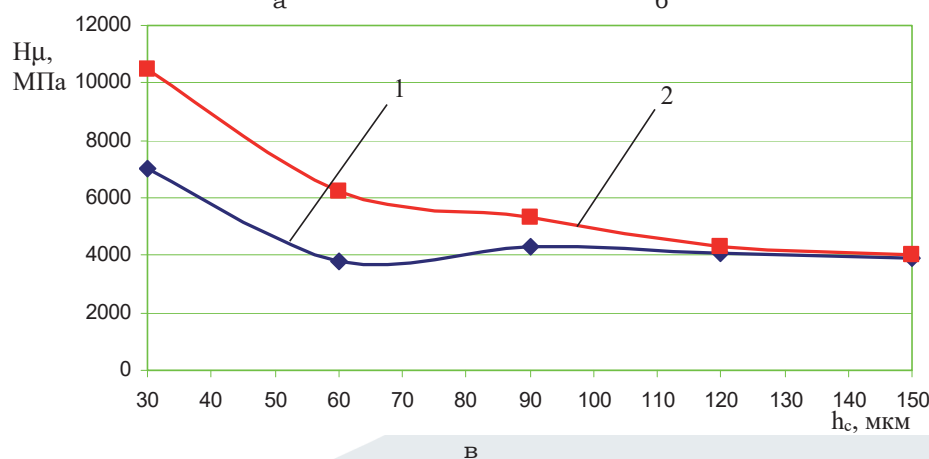
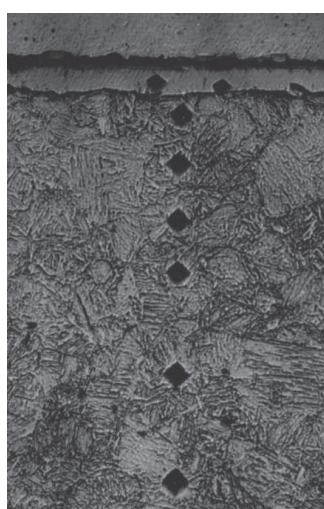


Рис. 3. Микроструктура образцов стали 40Х после: а – ЦЭЭЛ; б - НЦЭЭЛ и распределение микротвердости по глубине слоя (в) при: 1 - ЦЭЭЛ; 2- НЦЭЭЛ