

А. Н. Жуков, главный инженер (ПАО «Сумское НПО» г. Сумы, Украина)

## Повышение качества термообработанных стальных деталей интегрированными технологиями ионного азотирования и электроэрозионного легирования

В статье представлены результаты металлографического и дюрOMETрического анализа поверхностных слоев стали 40X и 38X2MЮА упрочненных методом электроэрозионного легирования (ЭЭЛ) и ионного азотирования (ИА). Показано преимущество комбинированных технологий (ЭЭЛ+ИА и ИА+ЭЭЛ) над отдельно взятыми.

**Ключевые слова:** электроэрозионное легирование, ионное азотирование, интегрированные технологии, микротвердость, слой.

У статті представлені результати металографічного і дюрOMETричного аналізу поверхневих шарів стали 40X і 38X2MЮА зміцнених методом електроерозійного легування (ЕЕЛ) і іонного азотування (ІА). Показана перевага комбінованих технологій (ЕЕЛ+ІА і ІА+ЕЕЛ) над окремо взятими.

**Ключові слова:** електроерозійне легування, іонне азотування, інтегровані технології, микротвердість, шар.

The article presents the results of metallographic and durometric analysis of surface layers of 40H and 38H2MUA steel, which is hardened by electroerosion alloying (EEA) and ion nitriding (IN) methods. The advantage of combined technologies (EEA + IN and IN + EEA) over separately taken is shown.

Key words: electroerosion alloying, ion nitriding, integrated technologies, microhardness, layer.

### Постановка проблемы в общем виде

Одним из основных показателей качества машин является их надежность. Наиболее распространенной причиной отказов машин признана не поломка, а износ и повреждение рабочих поверхностей их деталей и рабочих органов. Как правило, все разрушения деталей начинаются с разрушения их поверхностей.

Применение упрочняющих и защитных покрытий существенно повышает качество продукции в машиностроении, обеспечивает надежную работу узлов и деталей в тяжелых 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 покрытий актуальны и своевременны.

### Анализ последних исследований и публикаций

Одним из наиболее простых с технологической точки зрения методов создания защитных покрытий является поверхностное электроэрозионное легирование (ЭЭЛ). Его достоинствами являются: локальность воздействия, малый расход энергии, отсутствие объемного нагрева материала, простота автоматизации и «встраиваемости» в технологический процесс изготовления деталей, а также возможность совмещения

операций.

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, или понизить твердость поверхности, нанося на нее более мягкие материалы. Однако ЭЭЛ термообработанных деталей, подвергаемых в условиях эксплуатации высоким удельным нагрузкам, например, деталей штампов, валов прокатных станов 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 отпуса, 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 [1].

Согласно [2], «провал» твердости в зоне термического влияния можно устранить путем применения после ЭЭЛ дополнительной обработки для создания наклепа методом поверхностного пластического деформирования. Однако в данном случае общего повышения твердости в переходной зоне не наблюдается.

В соответствии с [3], проведе-

ние ионного азотирования (ИА) 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) [4], 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 объемного нагрева детали и связанных с этим поводков и короблений; простота применения технологии; гибкая привязка к имеющемуся оборудованию; процесс упрочнения не требует специальной подготовки и высокой квалифика-

ции рабочего. В данном способе используется энергия разряда 0,036 – 6,8 Дж и производительность 1,0–0,2 мин/см<sup>2</sup>.

При ЦЭА стальных деталей 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.

Известен также способ ЦЭА, который используют для снижения шероховатости поверхности деталей машин и, следовательно, для расширения области их применения. Данный способ состоит в том, что ЦЭА проводят поэтапно, снижая на каждом этапе энергию разряда [5].

Несмотря на очевидные достоинства, основным из которых является снижение шероховатости поверхности деталей машин с сохранением качества поверхностного слоя (отсутствие микротрещин, наличие слоя повышенной твердости, 100% сплошность и др.), данный способ также имеет недостатки. Прежде всего, это – снижение микротвердости поверхностного слоя в результате отпуска при повторной (поэтапной) обработке поверхности графитовым электродом с меньшей энергией разряда. Кроме того, наряду со снижением микротвердости поверхности, снижается глубина слоя повышенной твердости.

Для устранения указанных выше недостатков предложен способ упрочнения поверхностей термообработанных стальных деталей, который включает операции ЭА и ИА, причем, ИА осуществляют до, или после ЭА в течение времени, достаточного для насыщения поверхностного слоя детали азотом на глубину зоны термического влияния. При этом операцию ЦЭА проводят, по крайней мере, в два этапа со снижением энергии разряда на каждом последующем этапе. В данном случае после ИА в течение времени, достаточного для насыщения поверхностного слоя детали азотом на глубину зоны термического влияния, провал твердости устраняется.

Аналогичные результаты можно получить, если ИА проводить до ЦЭА, но в течение времени, достаточного для насыщения поверхностного слоя детали азотом на глубину зоны термического влияния. Причем, с целью снижения шероховатости поверхности, ЦЭА следует проводить поэтапно, снижая на каждом этапе энергию разряда. В данном случае твердость в зоне термического влияния снижаться не бу-

дет, 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 твердость снижается.

Учитывая, вышесказанное, а также то, что при ЭА графитовым электродом величина шероховатости ниже, чем при легировании металлическим электродом, но с такой же энергией разряда, проведение металлографических и дюрметрических исследований стальных поверхностей после ЦЭА и ИА, выполняемых в различных последовательностях, представляет научный и практический интерес.

Кроме того, немаловажным является изучение процесса формирования на поверхностях стальных деталей, предварительно обработанных методом ИА, многослойных – комбинационных электроэрозионных покрытий (КЭП), состоящих из твердых износостойких и мягких антифрикционных металлов, которые неоднократно проявляли себя с положительной стороны при использовании для повышения износостойкости деталей в парах трения [6, 7].

#### **Формулирование целей статьи (постановка задачи)**

Таким образом, целью работы является повышение качества термообработанных стальных деталей интегрированной технологией электроэрозионного легирования и ионного азотирования, путем изучения процесса создания поверхностных слоев, сформированных комбинациями из методов ЦЭА, нанесения КЭП и ИА.

#### **Изложение основного материала исследования**

##### **Методика исследований**

Для ИА и ЦЭА использовали специальные образцы из стали 40Х, термообработанные на твердость 3000–3100 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 ЦЭА осуществляли в автоматическом режиме с помощью установки модели «ЭИА–8А». (рис. 1).



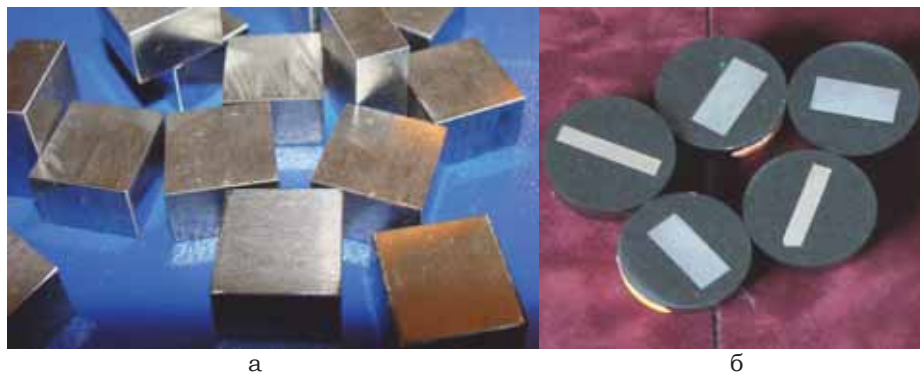
**Рис. 1. Схема упрочнения образцов в автоматизированном режиме**

Образцы закрепляли в патроне токарного станка, после чего производили поэтапную ЦЭА путем легирования графитовым электродом марки ЭГ-4 (ОСТ 229-83) с энергией разряда 0,42 Дж (1-й этап) и 0,1 Дж (2-й этап) и с производительностью, соответственно, 0,4 и 0,2 см<sup>2</sup>/мин.

ИА образцов проводили при температуре 520 °С в течение 12 ч на установке НГВ-6,6/6-И1. Упрочнение образцов выполняли в различной последовательности: ИА; ЦЭА; ЦЭА+ИА; ИА+ЦЭА.

Образцы из стали 38Х2МЮА, размером 10×8×8 мм (рис. 2, а), подвергали термообработке на твердость 270–280 НВ, после чего обрабатывали методом ИА при температуре 520° в течение 12 ч. Затем, на установке модели «ЭИА-8», наносили КЭП состава ВК8+Cu+ВК8.

Из упрочненных образцов вырезали сегменты, изготавливая шлифы (рис. 2, б), которые исследовали на оптическом микроскопе «Неофот-2», где проводили оценку качества слоя, его сплошности, толщины и строения зон подслоя – диффузионной зоны и зоны термиче-



**Рис. 2. Изготовление шлифов для металлографических и дюрметрических исследований:**  
а – плоские образцы, б – готовые шлифы

ского влияния. Одновременно проводили дюрометрический 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».

Затем шлиф подвергался химическому травлению для выявления структуры в реактиве. После изготовления шлифы исследовали на оптическом микроскопе «Неофот-2», где проводилась оценка качества слоя, его сплошности, толщины и строения зон подслоя – диффузионной зоны и зоны термического влияния. Одновременно проводился дюрометрический анализ на распределение микротвердости в поверхностном слое и по глубине шлифа от поверхности. Замер микротвердости проводили на микротвердомере ПМТ-3 вдавливанием алмазной пирамиды под нагрузкой 0,05 Н, согласно ГОСТ 9450-76.

На всех этапах обработки измерялась шероховатость поверхности на приборе профилографе-профилометре мод. 201 завода «Калибр» (рис. 3, а). При этом результаты через специальное устройство выдавались на монитор компьютера в виде графиков (рис. 3, б).

#### Результаты исследований

На рис. 4 приведены результаты металлографических исследований образцов из стали 40X и 38X2МЮА, подверженных ИА.

Изучение микроструктуры поверхностного слоя после ИА (рис. 1) показывает, что толщина упрочненного слоя достигает 250 и 500 мкм, а микротвердость на поверхности соответствует 8820 и 9950 МПа, соответственно, при ИА стали 40X и 38X2МЮА, которая плавно снижается, переходит к микротвердости основы.

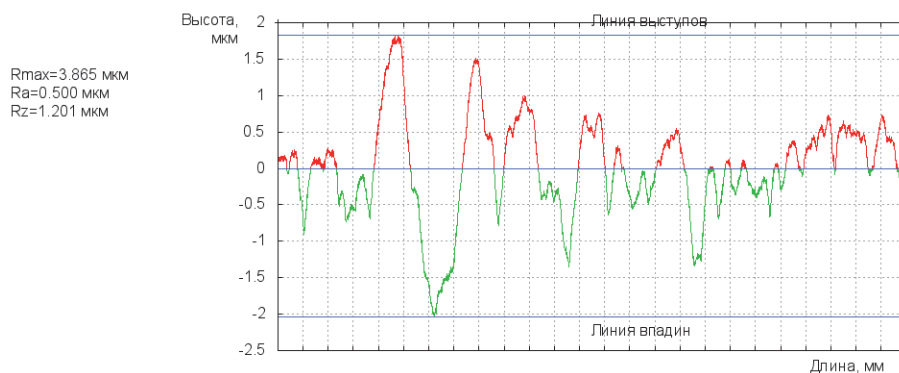
Следует отметить, что при ЦЭА стальной азотированной поверхности происходит процесс аналогичный нитроцементации, только в данном случае насыщение поверхности азотом и углеродом протекает поочередно, а при традиционной нитроцементации – одновременно.

Ниже на рис. 5 приведены результаты металлографических и дюрометрических исследований образцов из стали 40X после: ЦЭА, ЦЭА+ИА и ИА+ЦЭА, соответственно, а, б и в.

В табл. 1 представлено распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя и величины шероховатости поверхности при

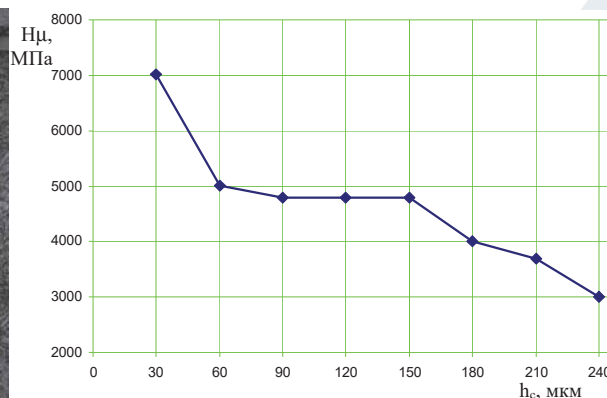


а

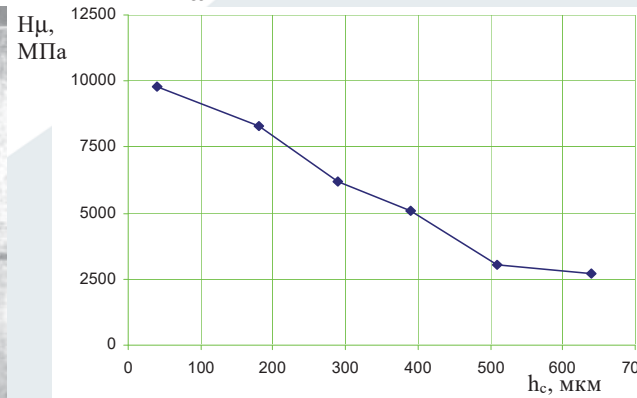
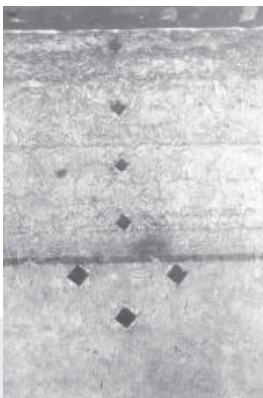


б

Рис. 3. Измерение шероховатости (а); профилограмма шероховатости исходного образца (б)

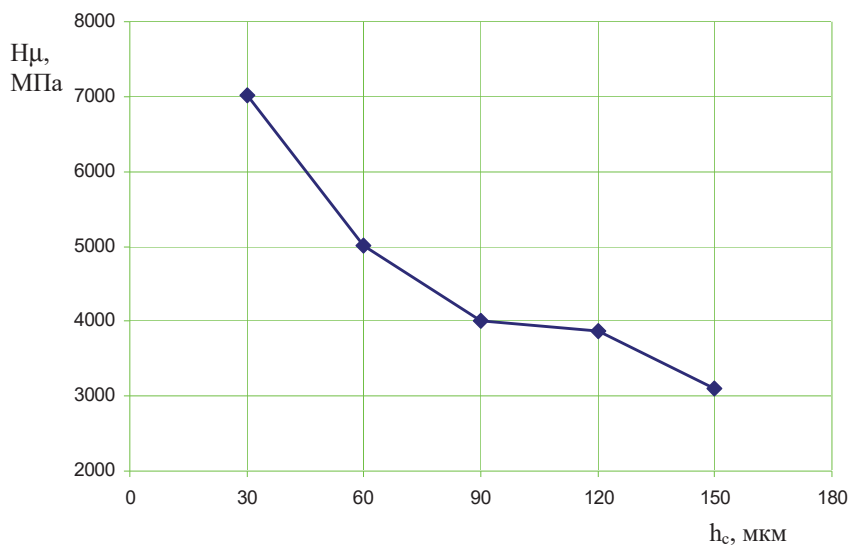


а

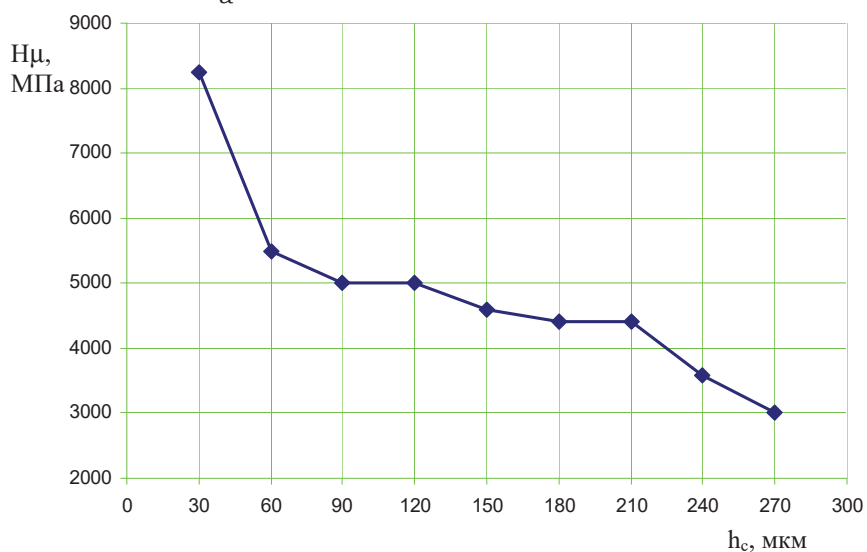


б

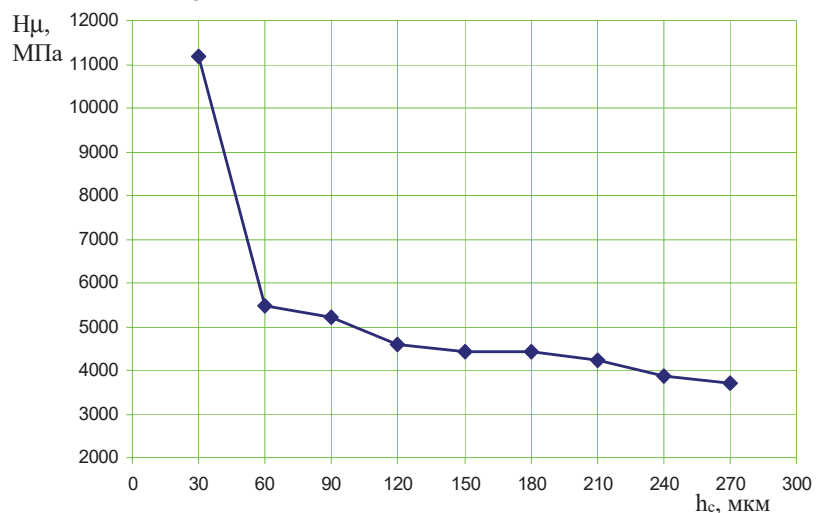
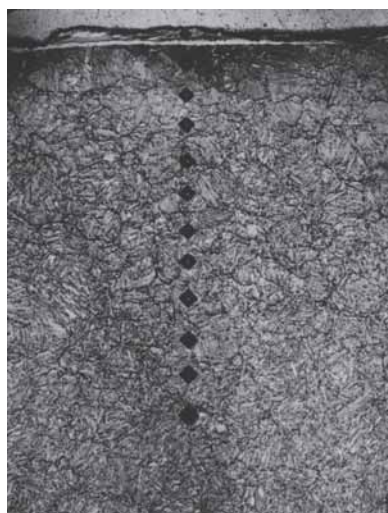
Рис. 4. Микроструктура и распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя при ИА стали 40X (а) и 38X2МЮА (б)



а



б



в

**Рис. 5. Микроструктура и распределение микротвердости поверхностного слоя образцов стали 40X после: ЦЭЭЛ (а), ЦЭЭЛ+ИА (б) и ИА+ЦЭЭЛ (в)**

различных вариантах ИА и ЦЭЭЛ образцов стали 40X.

На всех микрофотографиях четко просматривается «белый» слой, не поддающийся травлению обычными реактивами. Его микротвердость основы (3000...3100 МПа). Глубина зоны повышенной твердости составляет при ЦЭЭЛ, ИА, ЦЭЭЛ+ИА, ИА+ЦЭЭЛ, соответ-

ственно, 70, 190, 220 и 250 мкм. Как видно из таблицы и рис. 5 наибольшая толщина 250 мкм и микротвердость упрочненного слоя 11190 МПа принадлежат интегрированному способу упрочнения ИА+ЦЭЭЛ. При этом шероховатость поверхности Ra, составляет 0,8 мкм. Применение комбинированной

МПа при ИА+ЦЭЭЛ и ЦЭЭЛ+ИА, соответственно. Ниже располагается переходная, диффузионная зона, с плавно снижающейся микротвердостью, переходящей в микротвердость основы (3000...3100 МПа).

венно, 70, 190, 220 и 250 мкм. Как видно из таблицы и рис. 5 наибольшая толщина 250 мкм и микротвердость упрочненного слоя 11190 МПа принадлежат интегрированному способу упрочнения ИА+ЦЭЭЛ. При этом шероховатость поверхности Ra, составляет 0,8 мкм.

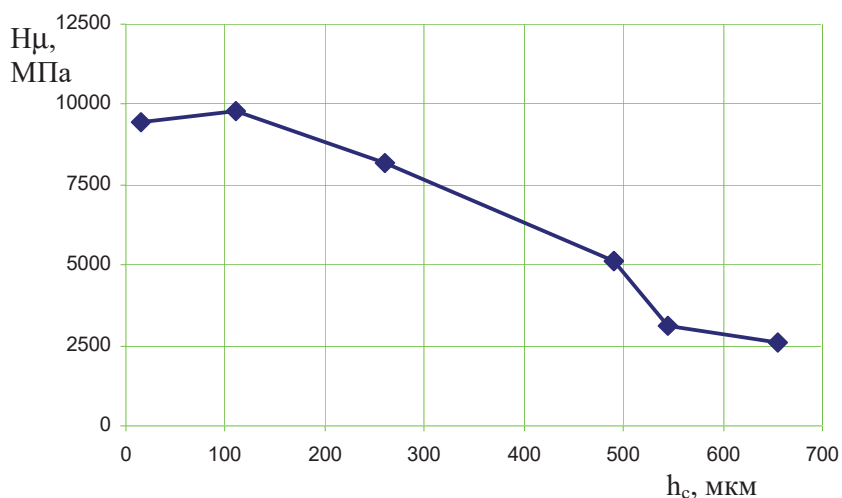
Применение комбинированной

Таблица 1. Шероховатость и распределение микротвердости в поверхностном слое стали 40Х после упрочнения различными способами

Способ упрочнения	Микротвердость, МПа (шаг измерения ~30 мкм)										Ra, мкм
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Микротвердость основы 3000-3100 МПа											
ИА	7010	5010	4800	4800	4800	4010	3700	3000			0,5
ЦЭЭЛ	7010	5010	4010	3860	3100						0,8
ЦЭЭЛ + ИА	8250	5490	5010	5010	4600	4410	4410	3580	3000		0,8
ИА + ЦЭЭЛ	11190	5490	5220	4600	4410	4410	4230	3860	3700	3100	0,8



а



б

Рис. 6. Микроструктура (а) и распределение микротвердости по глубине слоя (б) после ИА стали 38Х2МЮА и нанесения КЭП

технологии, заключающейся в ИА с последующим нанесением КЭП, позволяет сформировать на стали 38Х2МЮА поверхностный слой, состоящий как бы из двух зон – ИА и ЭЭЛ (рис. 6, а). Микротвердость в поверхностном слое, сформированном поочередным нанесением твердых износостойких (ВК8) и мягких антифрикционных (Сп) материалов неравномерная, твердые участки (8500 - 9000 МПа) чередуются с мягкими (4200 МПа). Толщина слоя ЭЭЛ колеблется от 20 до 40 мкм. Сплошность слоя составляет 100%. Ниже зоны ЭЭЛ расположена массивная зона ИА (до 450...500 мкм), микротвердость в которой плавно снижается с 8260 МПа до микротвердости основы (рис. 6, б).

Таким образом, как уже отмечалось, в качестве предварительного упрочнения колец ТИУ целесообразнее всего применять ИА, которое имеет ряд преимуществ перед другими способами, основным из которых является отсутствие разупрочненного слоя («провала микротвердости») в переходной зоне при последующем воздействии методом ЭЭЛ (нанесение КЭП или проведение ЦЭЭЛ).

#### Выводы

1. Резервом повышения качества поверхностных слоев стальных деталей могут служить интегриро-

ванные технологии, включающие ЭЭЛ и ИА, при этом обе составляющие не в коей мере не снижают достоинств каждой отдельно взятой, а в совокупности дополняют друг друга.

- Ионное азотирование, проведенное до, или после ЭЭЛ, в течение времени достаточного для насыщения поверхностного слоя детали азотом на глубину зоны термического влияния, устраняет зону пониженной микротвердости «провала твердости» в переходной зоне.
- При нитроцементации наибольшая толщина 250 мкм и микротвердость упрочненного слоя 11190 МПа принадлежат интегрированному способу упрочнения ИА+ЦЭЭЛ. При этом шероховатость поверхности Ra, составляет 0,8 мкм.
- Ионное азотирование, проведенное до нанесения КЭП значительно, до 500 мкм, увеличивает зону повышенной твердости.

#### Список литературы:

- Лазаренко Н.И. Электроискровое легирование металлических поверхностей. - М. Машиностроение, 1976. - 45 с.
- Андреев В.И. Повышение эксплуатационных характеристик рабочих поверхностей деталей // Вестник машиностроения. - 1978. -

№7. - С. 71-72.

3. 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. № 213.

4. Способ цементации стальных деталей электроэрозийным легированием. Пат. 2337796. Российская Федерация. МПК В 23Н 9/00 / Марцинковский В.С., Тарельник В.Б., Белоус А.В.; Заявл. 05.10.2006; Опубл. 10.04. 2008, Бюл. № 31. - 3с.

5. 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.

6. А. с. 1734968 СССР, В 23 Н 9/00. Способ электроэрозийного легирования / В.Б. Тарельник, Е.А. Коломыцев, Л.А. Иванов, А.Г. Марченко, В.И. Тарадонов, В.Ф. Руденко, Ю.А. Серобабин, Г.Н. Анисимов. - опубл. 23.05.92, Бюл. № 19.

7. Способ электроэрозийного легирования поверхностей стальных деталей: Пат. 2524471. Российская Федерация. МПК В23Н 9/00 / Марцинковский В.С., Тарельник В.Б.; Опубл. 27.07.14, Бюл. № 21. - 10 с.