

## TECHNICAL SCIENCE

Чейлях А.П.<sup>1</sup>, Куцомеля Ю.Ю.<sup>2</sup>, Федун В.И.<sup>3</sup>, Рябикина М.А.<sup>4</sup>

## Структура и свойства стали 40X после импульсно-плазменной обработки с использованием титанового электрода

<sup>1</sup> Чейлях А.П., доктор технических наук, профессор<sup>2</sup> Куцомеля Ю.Ю., аспирант<sup>3</sup> Федун В.И., старший преподаватель<sup>4</sup> Рябикина М.А., кандидат технических наук, доцент

Приазовский государственный технический университет, Мариуполь, Украина

**Аннотация:** В работе представлены результаты исследований структуры образцов из стали 40X после импульсно-плазменной обработки (ИПО) при разных режимах, с использованием титанового электрода. Рассмотрено их влияние на толщину и качество получаемых слоев, микротвердость. С помощью математического моделирования был проведен анализ характеристик изнашивания. При участии воздуха, как рабочего газа, и высоких температур плазмы происходит диффундирование частиц стержневого катода из титанового сплава вглубь подложки и ее легирование. Структура и свойства модифицированного слоя зависят от количества импульсов плазменной обработки и введенной в разряд энергии (в пределах от 3 до 12 кДж). Время разряда составляло ~1 мс. С увеличением количества импульсов ИПО толщина и плотность слоя возрастают. Результаты микроскопических исследований поперечных сечений покрытий свидетельствуют, что минимальная толщина слоя составляет 0,014 мм (при 2 импульсах и энергии 4,6 кДж). В результате более мощного импульсно-плазменного воздействия (при 4 импульсах и энергии 12 кДж) на поверхности стали 40X толщина слоя увеличивается до 0,076 мм. Обычно, для улучшения качества слоя и изменения структуры покрытий используют повторное воздействие плазменной струи. Четырех- и шестикратная ИПО оказывает существенное влияние на микроструктуру модифицированного слоя стали. Кроме того, увеличение кратности воздействия ИПО приводит к снижению пористости и уменьшению микротрещин. Содержание в основном металле углерода 0,37 % определяет формирование микроструктуры модифицированного слоя, предположительно, от мартенситной (твердого раствора Ti в  $\alpha$ -Fe) до мартенситно-нитридной, что позволяет повысить относительную износостойкость стали. Максимальные значения микротвердости после ИПО с применением электрода из титана – 10510 МПа достигнуты после режима: 6 импульсов и энергии 12 кДж. Применение рентгеноструктурного анализа с целью изучения характера структурно-физических процессов, происходящих в результате ИПО, показали: в модифицированном слое наблюдаются осборнит (TiN) и нитрид титана (TiN), а также мартенсит и бета-тиоксид (TiO<sub>2</sub>). Применение ИПО для нанесения покрытий из титана позволяет получать плотные многофазные покрытия, которые имеют хорошую адгезию с подложкой и высокие физико-механические свойства.

**Ключевые слова:** импульсно-плазменная обработка, конструкционная сталь, модифицированный слой, фазовый состав, свойства покрытий, износостойкость

Импульсно-плазменная обработка (ИПО) является одним из самых перспективных и изучаемых методов поверхностного упрочнения [1-3]. Между тем, ее возможности далеко не исчерпаны.

Целью работы является изучение возможности создания метастабильных фазово-структурных модификаций покрытий, полученных с помощью ИПО, для повышения функциональных свойств.

Для исследования были взяты образцы стали 40X, обработанные с помощью импульсного электротермического аксиального плазменного ускорителя (ЭТПУ) [4, 5] с целью получения модифицированного слоя на металлической подложке. Источником питания ускорителя служил емкостной накопитель энергии (С=1,5 мФ). Длительность электрического разряда составляла 1 мс. Внутренний диаметр диэлектрической разрядной камеры ускорителя ~ 1 см. Внутренний

диаметр наружного кольцевого электрода (анода) ~ 4 см.

Материал стержневого катода – титан, был нанесен на подложку из стали 40X размером 10 x 10 x 55 мм в среде воздуха при атмосферном давлении. ИПО проводилась по разным режимам: напряжение накопителя 2,5 кВ, 3,0 кВ, 3,5 кВ и 4,0 кВ; количество импульсов варьировалось от 1 до 6.

Исследования микроструктуры образцов из стали 40X после ИПО проводили на шлифах поперечного сечения с помощью металлографического микроскопа «Neophot 21» при увеличениях  $\times 300$  и  $\times 1000$  крат.

При изучении влияния физико-химических процессов ИПО на микроструктуру стали 40X использовался рентгеноструктурный анализ, который проводился на дифрактометре «Дрон-3» с излучением  $K\alpha$  меди. Съемка велась с шагом 0,02 град, идентифицирование рентгеновских линий производилось по таблице ASTM для ин-

тервала углов ( $20 \text{ град} < 2\theta < 90 \text{ град}$ ). В результате ИПО получен модифицированный слой на стали 40X с близким содержанием титана, различающийся толщиной полученного слоя и его качеством (однородность, пористость) в зависи-

мости от выбранного режима обработки. На рисунке 1. показана микроструктура поверхностного модифицированного слоя образцов, подвергнутых ИПО при напряжении 4,0 кВ с различным количеством импульсов.

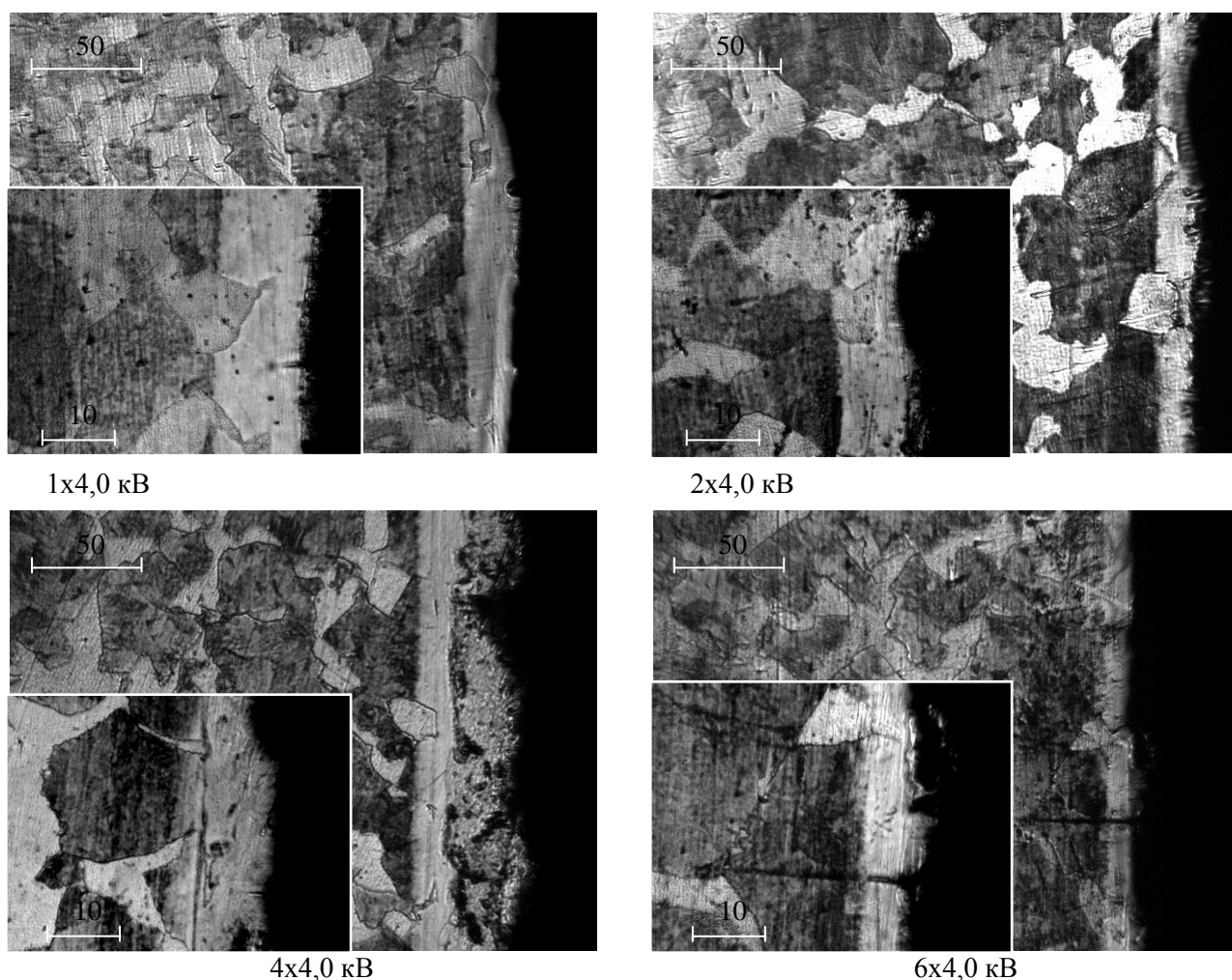


Рис. 1. Микроструктура образцов из стали 40X после ИПО с напряжением 4,0 кВ при разном количестве импульсов; материал покрытия - титан

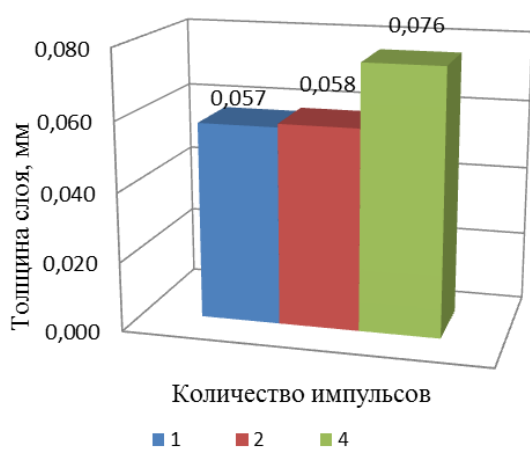


Рис. 2. Влияние количества импульсов при напряжении 4,0 кВ на толщину модифицированного слоя

Модифицированный слой различной толщины имеет светло-серый цвет, хорошо заметный

на фоне феррито-перлитной структуры основного металла – стали 40X.

При увеличении  $\times 1000$  крат внутри слоя наблюдаются отдельные элементы структуры основы (полиэдрические ферритные зерна). На границе с подложкой не наблюдается зоны взаимного перемешивания (переходной зоны) или измененной структуры. Внутри некоторых слоев видны отдельные мелкие темные точечные участки, которые могут быть включениями карбидных и нитридных частиц.

Результаты микроскопических исследований поперечных сечений покрытий свидетельствуют, что минимальная толщина слоя составляет 0,014 мм (при 2 импульсах и напряжении 2,5 кВ). В результате более мощного импульсно-плазменного воздействия (при 4 импульсах и  $U = 4 \text{ кВ}$ ) на поверхности стали 40X образуется слой толщиной до 0,076 мм. Влияние количества

импульсов на толщину слоя представлено на рисунке 2.

В большинстве случаев при одинаковом напряжении батареи толщина слоя растет с увеличением количества импульсов, что можно объяснить особенностями микроструктуры. Верхний модифицированный слой, полученный при малом количестве импульсов (1-2), предположительно представляет собой твердый раствор титана в  $\alpha$ -Fe. Можно также предположить, что на поверхности в модифицированном слое происходит мартенситное превращение, при этом ферритные зерна основы (сталь 40X) остаются без изменения.

Появление отдельных участков пересыщенного  $\alpha$ -твердого раствора (мартенсита) может быть следствием воздействия плазменной струи



а)



б)

Рис. 3. Вид плазменных струй при напряжениях на емкостном накопителе равных: а) 2,0 кВ, б) 4,0 кВ

Как видно из этого рисунка, при малом значении вводимой в разряд энергии струя плазмы имеет форму сужающегося конуса (рисунок 3а), а при большой энергии разряда наблюдается расширяющийся плазменный поток (рисунок 3б). С увеличением количества импульсов увеличивается толщина слоя, за счет появления пористости, микротвердость также незначительно растет. Вышерасположенный слой, характеризующийся пористостью и микротрещинами, при дальнейшей обработке становится более однородным (например, после 6 кратной обработки), а мартенсит (твердый раствор титана в  $\alpha$ -Fe) постепенно исчезает, или присутствует в незначительном количестве, по сравнению с обработкой 2-мя и 4-мя импульсами, т. к. возникают напряжения 3 рода; титан диффундирует внутрь образца. В результате, ближе к «переходной» зоне (границе) количество мартенсита увеличивается, далее располагается феррито-перлитная структура основного металла (см. рисунок 1).

Результаты измерения микротвердости по сечению покрытия показали, что у поверхности покрытия - расстояние 0,02 мм - микротвердость составляет 2540-10510 МПа, в зависимости от режима. Это примерно в ~2,5 раза выше, чем в подложке. С увеличением числа импульсов в це-

(температура плазмы ~10 тыс. К [5]), когда в приповерхностных слоях имеют место большие градиенты температур, приводящие к мгновенной закалке сильнолегированного титаном поверхностного слоя стального образца. Тонкий слой легированного титаном мартенсита образуется также при режимах ИПО 2 x 3,0 кВ и 2 x 3,5 кВ (количество импульсов x U).

Под такими слоями находится феррито-перлитная структура основного металла. При режиме двукратной ИПО и U = 4,0 кВ толщина светлого слоя (области мартенситного превращения) уменьшается. Наиболее вероятной причиной этого уменьшения может являться увеличение диаметра плазменной струи. Такое предположение базируется на фотографиях интегрального свечения струи (см. рисунок 3).

лом микротвердость у поверхности покрытия возрастает (рисунок 4). Максимальные значения микротвердости после ИПО по режиму 6 импульсов x U = 4,0 кВ – 10510 МПа, а микротвердость основного металла в пределах 1300 – 2000 МПа.

С целью изучения влияния микротвердости стали 40X на ее триботехнические свойства после ИПО титаном с помощью математических уравнений рассчитывали относительную абразивную износостойкость и коэффициент повышения относительной абразивной износостойкости.

Хрущов М.Н. и Бабичев М.А. экспериментально исследовали абразивный износ в нетермообработанных сталях и установили линейную зависимость износостойкость – твердость для металлов и сплавов [6]:

$$\varepsilon = b \times H \quad (1)$$

где b – постоянный коэффициент; H – микротвердость поверхностного слоя.

В работе [7] опытным путем для сталей без термической обработки получена зависимость относительной абразивной износостойкости от микротвердости:

$$\varepsilon = 6 \times 10^{-4} \times H \quad (2)$$

При этом, испытания на изнашивание проводились с использованием абразива из корунда  $Al_2O_3$ , размер частиц составлял от 50 до 180 мкм.

Для коэффициента повышения относительной износостойкости  $k$  после ИПО нами предложена формула:

$$k = \frac{\varepsilon_{сл.}}{\varepsilon_{осн.}} \quad (3)$$

где  $\varepsilon_{сл.}$  и  $\varepsilon_{осн.}$  – соответственно расчетная относительная износостойкость модифицированного слоя после ИПО и основы.

Расчет  $\varepsilon_{сл.}$ ,  $\varepsilon_{осн.}$  и  $k$  проведен с помощью электронных таблиц Excel. Изменение микротвердости поверхностного слоя в зависимости от режима ИПО представлена на рисунке 6, а основы – принята усредненная ее величина 2000 МПа. Результаты расчета представлены на рисунках 7 и 8.

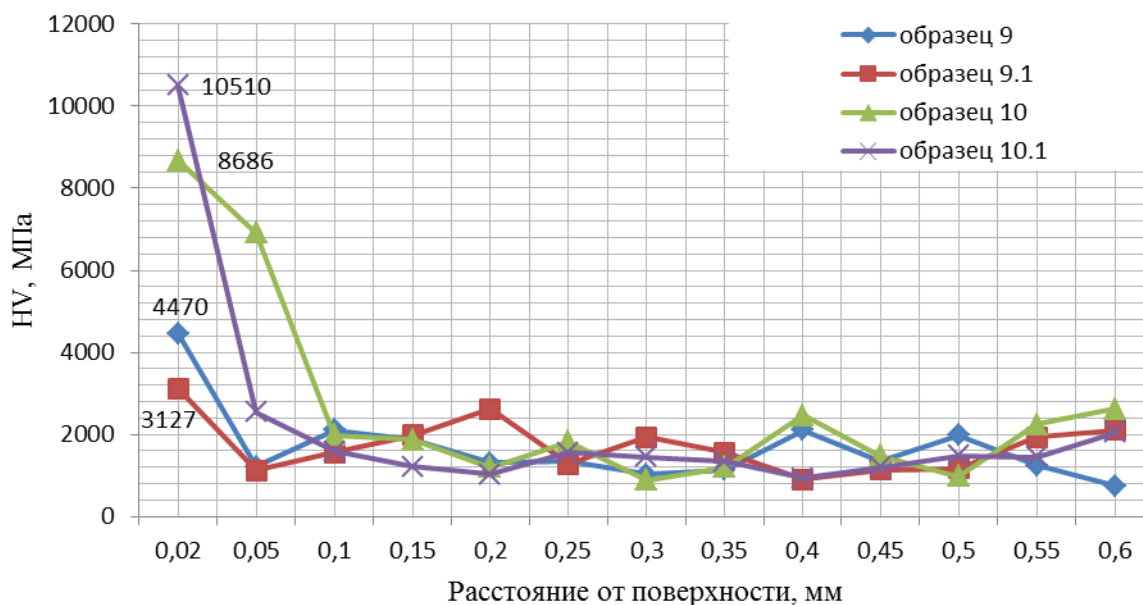


Рис. 4. Изменение микротвердости по глубине образцов стали 40Х после импульсно-плазменной обработки по различным режимам (количество импульсов x U, кВ): 9 – 1 x 4,0; 9.1 – 2 x 4,0; 10 – 4 x 4,0; 10.1 – 6 x 4,0

Анализ дифрактограмм показал, что в результате ИПО титаном стали 40Х в модифицированном слое наблюдаются следующие фазы: осбор-

нит (TiN) и нитрид титана (TiN), отличающиеся параметром кристаллической решетки, а также мартенсит и бета-тиоксид ( $TiO_2$ ) (рисунок 5).

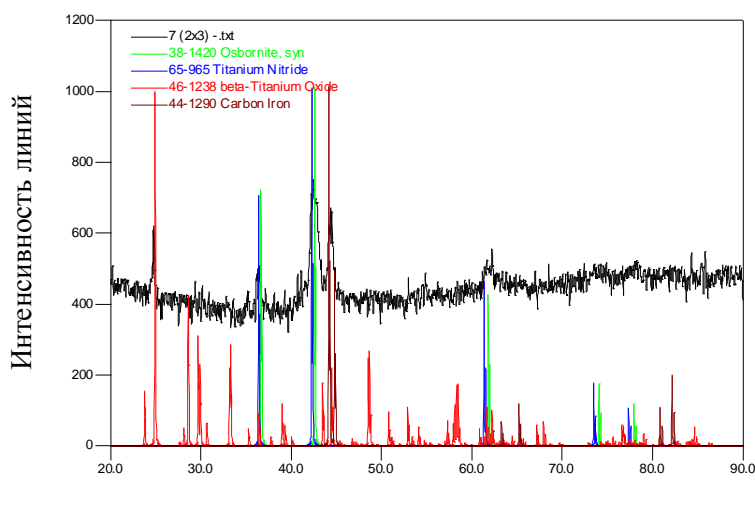


Рис. 5. Дифрактограммы стали 40Х после ИПО (2 импульса, U = 3,0 кВ)

Анализ полученных данных показал, что наибольшей износостойкостью обладают образцы, обработанные в диапазоне режимов ИПО

2...6 импульсов при режимах 2x3,0 кВ, 4x4,0 кВ и 6x4,0 кВ (количество импульсов x U).

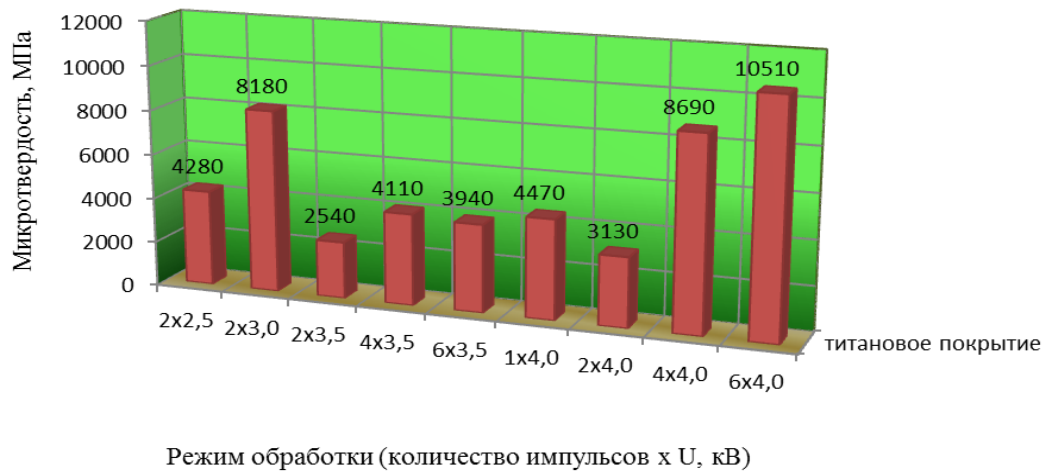


Рис. 6. Влияние параметров ИПО на микротвердость поверхностного слоя стали 40X

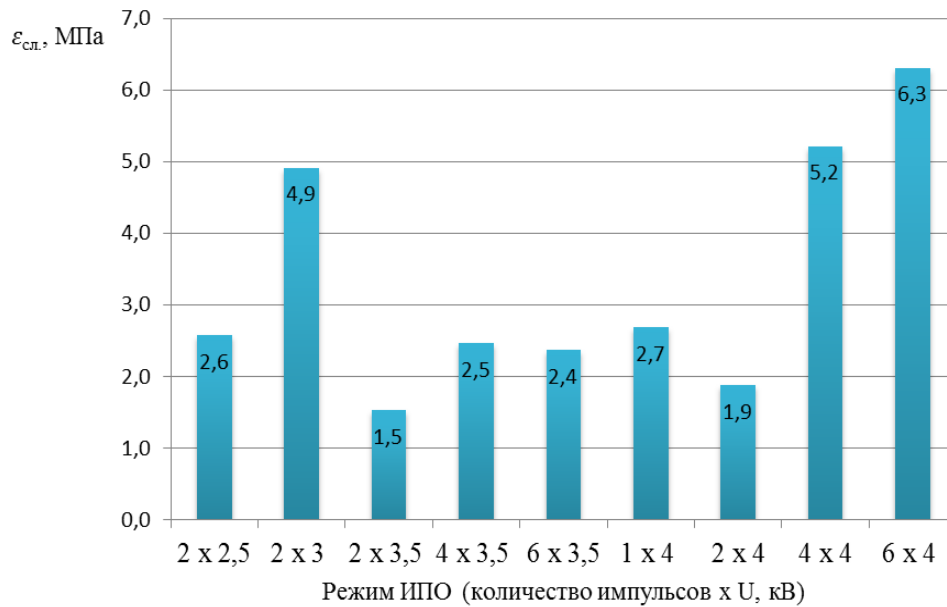


Рис. 7. Влияние режимов ИПО на относительную износостойкость стали 40X

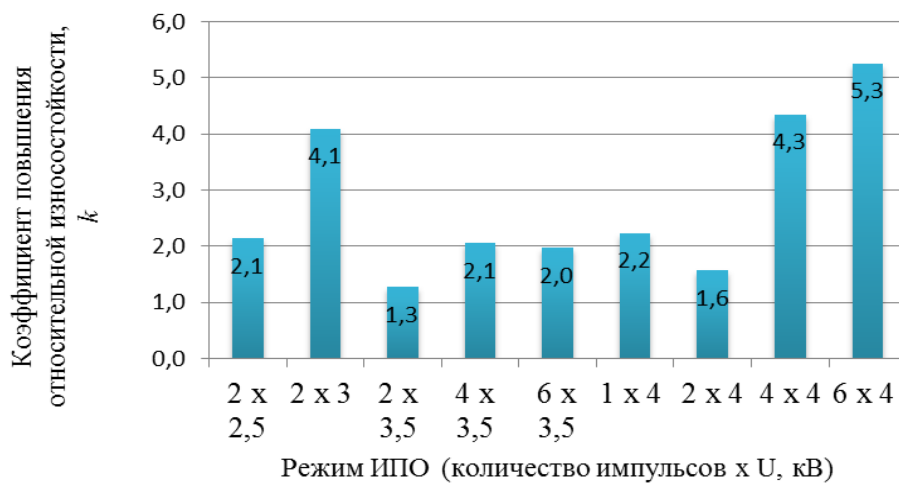


Рис. 8. Влияние режимов ИПО на коэффициент повышения относительной износостойкости стали 40X

Высоким  $\varepsilon_{\text{сл.}}$ , как правило, соответствуют более сплошные и беспористые модифицированные слои, обладающие максимальной микротвердостью. Максимальная относительная износостойкость  $\varepsilon_{\text{слоя}} = 6,3$  МПа и  $k = 5,3$  были получены при ИПО по режиму: 6 импульсов,  $U = 4$  кВ. Более пористые и рыхлые слои характеризуются большей скоростью изнашивания. Следует отметить также, что в среднем относительная абразивная износостойкость стали 40X после ИПО увеличилась в  $\sim 2,7$  раза по сравнению с исходным состоянием. Применение ИПО для нанесения покрытий из титана позволяет полу-

чать плотные многофазные покрытия, которые имеют хорошую адгезию с подложкой и высокие физико-механические свойства.

В результате применения ИПО обнаружен положительный эффект, последующие исследования позволяют выявить и реализовать широкие возможности данного метода. Разработанные режимы ИПО с использованием титана, позволяющие получать модифицированные слои с высокими физико-механическими характеристиками, могут быть рекомендованы для упрочнения деталей оборудования, работающего в условиях изнашивания.

### Литература

1. Зенин Б.С. Современные технологии поверхностного упрочнения и нанесения покрытий: уч. пособие / Зенин Б.С., Слосман А.И. // Томский политехнический университет. – 2-е изд. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2012. – С. 120.
2. Оковитый В.А. Исследование процессов модификации износостойких плазменных покрытий импульсно-плазменной обработкой / Оковитый В.А., Пантелеенко Ф.И., Пантелеенко А.Ф., Оковитый В.В., Шевцов А.И., Ильющенко А.Ф., Асташинский В.М. // Вестник БНТУ – 2009. – №5. – С. 39-43.
3. Погребняк А.Д., Тюрин Ю.Н. Модификация свойств материалов и осаждение покрытий с помощью плазменных струй // Успехи физических наук. – 2005. – Том 175. – № 5. – С. 515-544.
4. Коляда Ю.Е. Использование магнитного ключа для коммутации силовых импульсных схем / Коляда Ю.Е., Федун В.И., Онищенко И.Н., Корнилов Е.А. // ПТЭ. – 2001. – № 2. – С. 89 – 91.
5. Федун В.И., Коляда Ю.Е., Буланчук О.Н., Гаркуша В.В. Электрические характеристики импульсного плазменного гидроакустического излучателя // Вісник Донецького університету. Серія А: Природничі науки.–2000.– Вип.1. – С.89-92.
6. Khrushov M.M., Babichev M.A. Resistance to Abrasive Wear of Structurally Inhomogenous Materials // Engineers. – 1960. – P. 5-24.
7. Ibrahim Sevim Effect of Abrasive Particle Size on Abrasive Wear Resistance in Otomotive Steels // Tribology in Engineering. – Chapter 3 - 2013. - P. 29-46. // <http://www.intechopen.com/books/tribology-in-engineering>.

**Cheiliakh A.P., Kutsomelya Yu.Yu., Fedun V.I., Ryabikina M.A.**

#### The structure and properties of steel 40 Kh after pulsed plasma processing using titanium electrodes

**Abstract:** The results of studies on the structure of samples of steel 40Kh (40Cr) after pulse-plasma treatment (PPT) under different conditions, with the use of a titanium electrode are presented in this work. Influence of plasma processing parameters on the thickness, quality and resulting microhardness of the layers are considered. With the help of mathematical modeling analysis the characteristics of wear resistance was carried. In an environment of air and high temperature of plasma is a diffusion cathode titanium alloy particles deep into the substrate and its alloying. The structure and properties of the modified layer is dependent on the number of pulses of plasma treatment and inputted into the discharge energy (within the limits of 3 to 12 kJ). The discharge time was  $\sim 1$  ms. With increasing number of pulses of the PPT density and the layer thickness increases. The results of microscopic examination of cross-sections of coatings indicate that the minimum thickness is 0.014 mm (with 2 pulses and energy of 4.6 kJ). Under the influence of a powerful pulsed plasma exposure (4 pulses and energy of 12 kJ) on the surface of 40Kh (40Cr) steel, a layer depth of 0.076 mm formed. Usually, to improve the quality of the layer and change the structure of coatings the second pass the plasma is used. PPT with 4 and 6 pulses has a significant influence on the microstructure of the steel of the modified layer. Furthermore, a layer with pores and microcracks in the further processing becomes more uniform (at 6 times the processing). Carbon in an amount of 0.37% in the base metal microstructure determines formation of the modified layer, presumably from martensite (solid solution Ti in the  $\alpha$ -Fe) to the martensite-nitride that can improve the wear resistance relative steel. The maximum values of microhardness after PPT with titanium electrode - 10510 MPa were after condition with 6 pulses and energy of 12 kJ. Using the X-ray diffraction analysis to study the nature of the structural and physical processes has shown that in the modified layer observed: Osbornite (TiN) and titanium nitride (TiN), martensite and beta Tioxide (TiO<sub>2</sub>). Application PPT coating of titanium produces multiphase coatings which have good adhesion to the substrate and high mechanical properties.

**Keywords:** pulse-plasma treatment, structural steel, the modified layer, phase composition, coating properties, wear resistance