

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНО-ПЛАЗМЕННОЙ
ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И
СВОЙСТВА СТАЛИ 40Х**

**А. П. Чейлях, д. т. н., проф., Ю. Ю. Куцомеля, асп.,
В. И. Федун, ст. преп., М. А. Рябкина, к. т. н., доц.**

ГВУЗ «Приазовский государственный университет»

Разработка оптимальных режимов термического воздействия - наиболее эффективное направление улучшения служебных характеристик конструкционных материалов. Одним из наиболее перспективных методов поверхностного упрочнения является импульсно-плазменная обработка (ИПО) [1-3]. Актуально изучение возможности создания метастабильных фазово-структурных модификаций покрытий, полученных с помощью ИПО, для повышения функциональных свойств [4].

Целью работы является изучение структурообразования поверхностно упрочненных слоёв в стали 40Х с использованием Ni-Cr электрода при ИПО.

Для исследования были взяты образцы стали 40Х, обработанные с помощью импульсного электротермического аксиального плазменного ускорителя (ЭТПУ) [5, 6] 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.

Материал стержневого катода – нихром Х20Н80, был нанесен на образцы из стали 40Х размерами 10 x 10 x 55 мм в среде воздуха при атмосферном давлении посредством ИПО по разным режимам: напряжение накопителя от 2,0 до 4,0 кВ, количество импульсов варьировалось от 1 до 6.

Исследования микроструктуры образцов из стали 40Х после ИПО проводили на шлифах поперечного сечения с использованием металлографического микроскопа «Neophot 21» с приставкой анализа изображения с помощью персонального компьютера при увеличениях $\times 300$ и $\times 1000$ крат.

Фазовый состав покрытия исследовали на дифрактометре ДРОН - УМ1 в монохроматическом Cu-K α излучении. В качестве монохроматора использовали монокристалл графита, установленный на дифрагированном пучке. Съемку проводили в угловом интервале $2\theta = 28 - 98^\circ$ с шагом сканирования $0,05^\circ$ и временем экспозиции в точке 3 с. Обработку данных дифрактометрического эксперимента проводили с использованием программы для полнопрофильного анализа рентгеновских спектров от смеси поликристаллических фазовых составляющих PowderCell 2.4. При полнопрофильном анализе дифракционных картин проводили учет текстуры по текстурной модели March - Dollase [7].

В результате ИПО получен модифицированный слой на стали 40Х с близким содержанием никеля и хрома, различающийся толщиной и его качеством (однородность, пористость) в зависимости от выбранного режима обработки. На рис. 1 показана его микроструктура после ИПО при напряжении 4,0 кВ с различным количеством импульсов.

Модифицированный слой различной толщины имеет характерный свет

ло-серый цвет, хорошо заметный на фоне феррито-перлитной структуры основного металла – стали 40Х. Внутри слоя наблюдаются отдельные элементы структуры основы (полиэдрические ферритные зерна). На границе с подложкой не наблюдаются зоны взаимного перемешивания (переходной зоны) или измененной структуры.

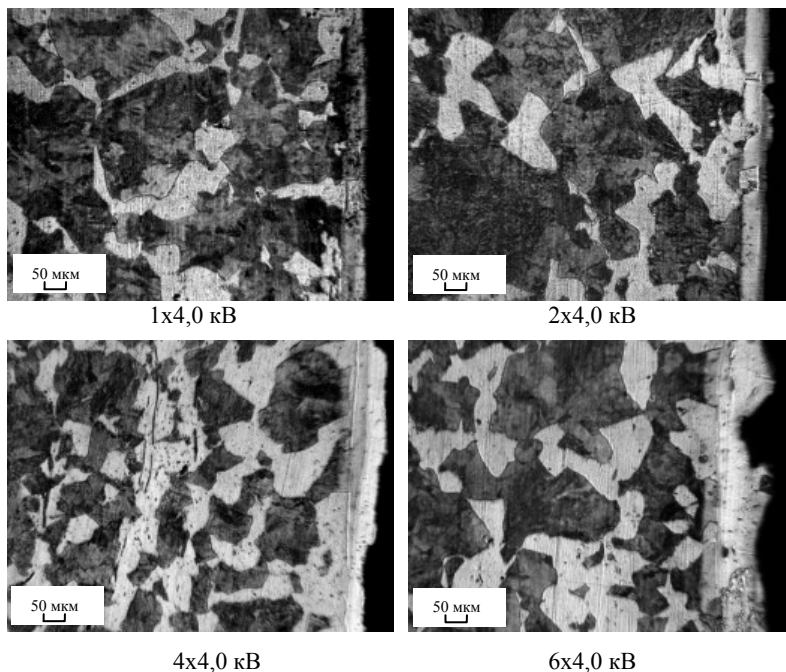


Рис. 1. Микроструктура образцов из стали 40Х после ИПО с напряжением 4,0 кВ при разном количестве импульсов; материал покрытия – Ni-Cr.

Внутри некоторых слоев видны отдельные мелкие темные точечные участки, которые могут быть включениями карбидных частиц. Минимальная толщина модифицированного слоя составляет 0,01 мм (при 2 импульсах и напряжении 3,5 кВ), а в результате более мощного импульсно-плазменного воздействия (при 6 импульсах и $U = 4$ кВ) на поверхности стали 40Х образуется слой толщиной до 0,15 мм. В большинстве случаев, при одинаковом напряжении батареи толщина слоя растет с увеличением количества импульсов, что можно объяснить возрастанием объема перенесенного электрода.

Модифицированный слой, полученный при малом количестве импульсов (1-2), предположительно представляет собой твердый раствор никеля и хрома в γ -Fe. При этом ферритные зерна основы (сталь 40Х) остаются без изменения.

Появление участков пересыщенного γ -твердого раствора может быть следствием воздействия плазменной струи (температура плазмы ~ 10 тыс. К [5]), когда в приповерхностных слоях имеют место большие градиенты температур, приводящие к мгновенной закалке сильнолегированного атомами и частицами никеля и хрома поверхностного слоя стального образца. Тонкий слой легированного никелем и хромом γ -твердого раствора образуется при режимах ИПО $2 \times 2,0$ кВ и $2 \times 2,5$ кВ, $1 \times 4,0$ кВ, $2 \times 4,0$ кВ (количество импульсов $\times U$) (см. рис. 1). Под такими слоями находится феррито-перлитная структура основного металла. С увеличением количества импульсов увеличивается толщина слоя, за счет появления пористости. А сам процесс формирования слоя состоит из двух этапов: формирование нижнего слоя серого цвета (ранее, при малом количестве импульсов) и верхнего светло-серого. Предположительно, верхний слой формируется в результате разогрева и насыщения атомами и частицами никеля и хрома уже сформировавшейся решетки γ -твердого раствора и имеет ГЦК решетку на основе никеля. Данный слой, характеризующийся пористостью и микротрещинами, при дальнейшей обработке становится более однородным. При этом, в некоторых случаях, толщина светлого слоя уменьшается (например, при режиме трехкратной и шестикратной ИПО и $U = 3,5$ кВ по сравнению с толщиной, полученной при режиме $2 \times 3,5$ кВ). Происходит проникновение внутрь образца γ -твердого раствора. В результате, ближе к переходной зоне (границе) его количество увеличивается, далее располагается феррито-перлитная структура основного металла.

Результаты измерения микротвёрдости по сечению покрытия показали, что у поверхности покрытия (расстояние $0,02$ мм) микротвёрдость составляет 2800 - 6200 МПа, в зависимости от режима. В целом, наблюдается повышение микротвёрдости у поверхности покрытия с увеличением числа импульсов или с увеличением мощности батареи, примерно в $\sim 2,5$ раза выше, чем в подложке (микротвёрдость основного металла в пределах $1300 - 2000$ МПа). Следует обратить внимание на то, что с увеличением количества импульсов наблюдается некоторое ее повышение по глубине металла (рис. 2). Это свидетельствует о том, что атомы и частицы никеля и хрома находятся не только у поверхности, но и проникают вглубь подложки на некоторую глубину ($0,3 - 0,4$ мм).

Рентгеноструктурный анализ фазового состава показал, что в результате ИПО на стали получены слои, состоящие из двух твердых растворов с ГЦК решеткой и близкими периодами, но различающимися периодами, которые имеют текстуру в кристаллографическом направлении $[200]$ (рисунок 3). В то время, как подложка состоит из твердого раствора α -железа (ОЦК решетка).

Известно, что никель имеет ГЦК решетку с периодом $a = 3,5238$ нм, а хром – ОЦК, $a = 2,885$ нм. Стоит также учесть, что γ -Fe имеет ГЦК решетку с периодом $a \cong 3,571$ нм, а при 1370 К $a \cong 3,637$ нм. По данным о периоде решетки γ -фазы твердого раствора диаграммы состояния железо-никель-хром [8] он, в зависимости от состава, изменяется в пределах от $0,3576$ до $0,3585$ нм. При анализе диаграмм видно, что со стороны двойной системы железо – никель наблюдается широкая область γ -твердых растворов; со стороны железо – хром – область твердых растворов с ОЦК кристаллической решеткой.

При ИПО с напряжением 4,0 кВ в 4 импульса в насыщенном слое получены ГЦК твердые растворы с периодом решетки $a = 3,5915$ нм (28,76 масс %) и $a = 3,5627$ нм (71,24 масс %) (см. рисунок 3). С увеличением количества импульсов ИПО до 6 получены ГЦК твердые растворы, которые незначительно изменяются: период решетки $a = 3,5902$ нм (27,29 масс%) и $a = 3,5624$ нм (72,71 масс%). Это свидетельствует о том, что при использовании в ИПО указанных выше режимов, получены γ -твердые растворы, предположительно, на основе железа и никеля. В пользу этого заключения свидетельствуют данные о периоде ГЦК решетки γ -твердого раствора ($a = 3,5911$ нм) в хромоникелевой аустенитной нержавеющей стали, в которой формула γ -фазы соответствует $FeCr_{0,29}Ni_{0,16}C_{0,06}$ [9].

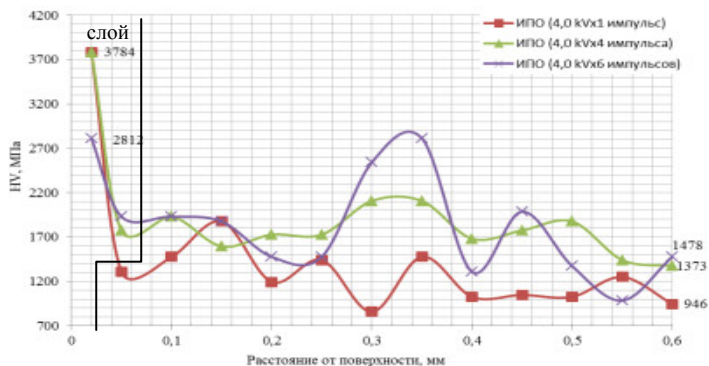


Рис. 2. Распределение микротвёрдости в стали 40Х после ИПО с напряжением 4,0 кВ при 1, 4 и 6 импульсах.

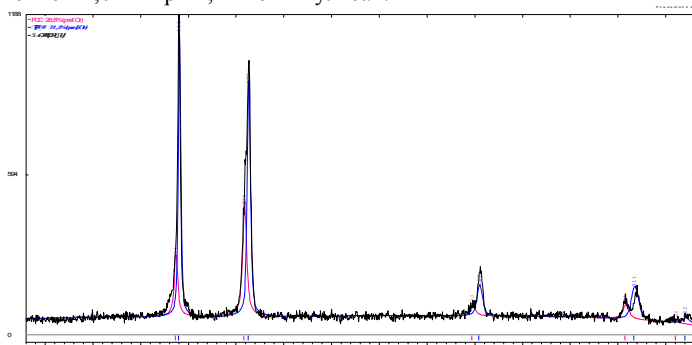


Рис. 3. Дифрактограммы стали 40Х после ИПО с напряжением 4,0 кВ при 4 импульсах (монохроматическое Cu-Kα излучение).

Никель – металл с ГЦК решеткой, его электронная концентрация равна 10 эл./ат., и, потому, он способствует увеличению в сплаве количества фазы, на основе твердого раствора с ГЦК решеткой (известно, что при средней концентрации больше 8,2 эл./ат. образуются твердые растворы с ГЦК структурой).

Следовательно, из полученных данных, увеличение количества импульсов с использованием нихрома Х20Н80, в качестве электрода, ведет к увеличению концентрации никеля и хрома и незначительному изменению периода решетчатого ГЦК в твердых растворах.

Достоинством ИПО является возможность использования различных электродов, относительная простота разработанного способа. Исследования образовавшихся структурно измененных слоев в конструкционных сталях позволяет установить зависимость их размеров и структуры от режимов ИПО и материала подложки, что служит основой для создания новых покрытий.

Выводы

1. Предложены режимы ИПО по которым в конструкционных сталях можно получать модифицированные слои различной толщины (0,01-0,15 мм) и твердости (2800-6200 МПа). Повышение микротвердости по глубине металла свидетельствует о том, что атомы и частицы никеля и хрома находятся не только у поверхности, но и проникают вглубь подложки.
2. Установлено, что в результате импульсно-плазменной обработки на стали 40Х получены слои, состоящие из двух твердых растворов с ГЦК структурой и близкими периодами на основе железа и никеля, которые имеют текстуру в кристаллографическом направлении [200].

Список использованных источников

- 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., Илющенко А.Ф., Асташинский В.М. // Вестник БНТУ – 2009. - №5. – С. 39-43.
- 3 В.И. Бойко, А.Н. Валяев, А.Д. Погребняк. Модификация металлических материалов импульсными мощными пучками частиц // УФН. 1999, т.169, №11, с.1243-1271.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 W.A. Dollase Correction of intensities for preferred orientation of the March model / J. Appl. Cryst. - vol. 19, p. 267–272.
- 8 <http://www.markmet.ru/diagrammy-splavov/diagrammy-sostoyaniya-sistemy-zhelezo-nikel-khrom-fe-ni-cr>
- 9 <http://www.icdd.com/products/pdf2.htm>