

## СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ В СТАЛИ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

Е. И. Литвиненко, В. А. Тутык, М. П. Бугаец, Д. В. Маслеников,  
А. Д. Рожков, А. С. Баскевич, А. И. Салиньш

*Национальная металлургическая академия Украины*

### 1. Постановка проблемы и ее связь с важнейшими научными и техническими задачами

В современной промышленности используются различные виды технологических процессов модифицирования поверхностей металлических материалов и изготовленных из них деталей, поскольку именно характеристики поверхности определяют уровень свойств изделия в целом. Кроме того, модифицирование поверхности более экономично по сравнению со способами изменения объемных характеристик материалов.

Электролитно-плазменная обработка (ЭПО) занимает особое место среди эффективных способов воздействия электрического поля на поверхностные и объемные свойства металлов и активно внедряется в промышленность. Ее эффективность достигается благодаря высокотемпературному воздействию искровых разрядов, формируемых в межэлектродном пространстве электролит – поверхность обрабатываемого изделия [1-10]. Преобразование электрической энергии в тепло идет в образовавшемся тонком слое плазмы между электролитом и изделием. Экспериментально установлено, что 85% подводимой энергии расходуется на нагрев поверхности изделия и образование плазменного слоя [8]. В электролите напряженность электрического поля низкая (80-200 В/м), в то время как в приграничной плазме высокая и достигает значений  $10^4$ - $10^6$  В/м. При этом в слое электролита толщиной 300 мкм, как установлено экспериментально, падение электрического напряжения менее 25 В, в то время как в плазменном приповерхностном слое толщиной 0.1-3 мм падение напряжения достигает 300 В [2].

В ЭПО используются экологически безопасные нейтральные слабые водные растворы солей, например, аммония (3-6%). Данная технология не требует специальных очистных сооружений для того, чтобы утилизировать отработанный электролит, поэтому является экологически чистой.

Преимущества поверхностного упрочнения обусловили интенсивное развитие научных исследований, направленных на совершенствование существующих и создание новых методов воздействия на поверхность детали с целью придания ей повышенных эксплуатационных характеристик. Разработка новых экологически чистых технологий модифицирования поверхности является сегодня одной из самых актуальных задач науки и техники, в связи с тем, что условия эксплуатации ужесточаются и повышаются общие требования к конструкционным материалам. Поэтому тема исследования является актуальной.

## **2. Анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы, определение нерешенных частей общей проблемы**

Впервые явление электролитного нагрева металлов исследовал и осуществил в промышленных масштабах И.З. Ясногородский [1]. Он установил основные режимы прохождения тока через электролитную ячейку, когда деталь-электрод является катодом.

Электролитно-плазменная обработка металлов и сплавов в водных электролитах (в англоязычной литературе эти процессы объединяются названием «plasma electrolysis for surface engineering») привлекает широкое внимание исследователей новыми технологическими возможностями. Исследователями США, Великобритании, Китая, Японии, Ирана, России, Украины и других стран установлены режимы и составы электролитов для проведения катодных и анодных процессов цементации, азотирования, нитроцементации, борирования, импульсной закалки и других технологий. Результаты исследований механизма электролитно-плазменного нагрева и технические решения, позволяющие разработать оборудование для их реализации, были описаны в последующих работах различных авторов [2-11]. Результаты исследований в данном направлении были обобщены в монографиях [3, 10].

Как показывает анализ литературы, центральное место в изучении электролитно-плазменного нагрева занимает пароплазменная оболочка, окружающая обрабатываемую деталь, и возможность применения электролитно-плазменного нагрева для термической обработки и модификации стальных деталей. Однако структурообразование в сталях при скоростном электролитно-плазменном нагреве применительно к различным сталям изучено недостаточно.

## **3. Постановка задачи**

Целью работы является: экспериментальное исследование электролитно-плазменной закалки стали с 0,6% С, обоснованный выбор электролита, изучение структуры и микротвердости стали с 0,6% С после электролитно-плазменной обработки.

## **4. Изложение основного материала исследований и обоснование полученных научных результатов**

Требования к электролиту можно охарактеризовать следующим образом: высокая электропроводность, доступность, нетоксичность, отсутствие коррозионного воздействия на стальную деталь.

Все электролиты можно разделить на 3 группы [1]:

1. Растворы солей щелочных металлов, кислот и щелочей, например –  $\text{NaCO}_3$ ,  $\text{NaCl}$ . Необходимая концентрация - более 4%. Нагрев достигается легко.
2. Растворы солей металлов, стоящих в ряду напряжений отрицательнее водорода. Нагрев возможен лишь при повышенных напряжениях. На катоде выделяется нерастворимый гидроксид. Пример – сульфат магния или нитрат кальция.

3. Растворы солей металлов, расположенных в ряду напряжений положительнее водорода. Нагрев достижим только при высоких плотностях тока и иных дополнительных условиях. – дихлорид меди

Исходя из приведенных выше данных, выбран 8% -ный раствор соли NaCl.

При ЭПО наблюдается пять режимов нагрева в зависимости от напряжения  $U$  между анодом и катодом [7].

Первый режим наблюдается при  $U=60-120$  В. Температура поверхности электрода  $T$  меньше температуры кипения электролита  $T < T_K$ . Подводимая электрическая энергия затрачивается в основном на нагрев электролита. Во втором режиме ( $U=80-160$  В) температура поверхности электрода  $T > T_K$  и вблизи ее образуется парогазовый слой. Для третьего режима ( $U=120-200$  В;  $T > T_K$ ) характерно возникновение электрических микроарзрядов в парогазовом слое, нагревающих электрод, и колебание поверхности электролита вблизи электрода приводящее к его охлаждению. В четвертом режиме ( $U=180-260$  В;  $T \gg T_K$ ) в парогазовой оболочке через 2-10 с возникает плазменный слой переменного сечения. Для пятого режима ( $U \geq 240-320$  В;  $T \gg T_K$ ) характерно образование плазменного слоя практически мгновенно за 0.1-0.5 с и интенсивное свечение плазменного слоя. Скорость нагрева поверхности может достигать  $500^\circ\text{C}/\text{с}$  [2].

#### **Материал и методика исследования**

Материал исследования – образец размером 10x20x30 из стали, химический состав которой приведен в таблице 1.

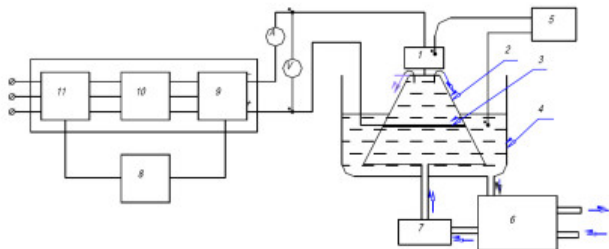
Таблица 1

*Химический состав исследуемой стали*

№п/п	Содержание элементов, % масс.			
1	Si	Mn	C	P
2	0,35-0,5	0,7-1,05	0,6-0,7	0,14-0,21

Методика исследования - световая микроскопия на НЕОФОТ -21, рентгеновско-дифракционный анализ, анализ химического состава и микроструктуры на растровом электронном микроскопе РЭММА -102.02.

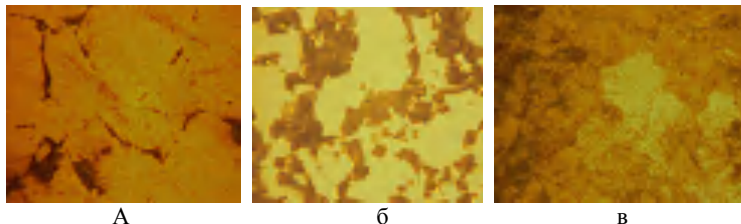
Электролитно-плазменный нагрев выполнили на экспериментальной установке на базе научно-исследовательской лаборатории «Электронно-лучевых технологических процессов и вакуумных покрытий» НМетАУ. Установка (рис.1) для ЭПО включает: 1- упрочняемую деталь (катод); 2 – конус для зонной обработки; 3 – сеточный анод; 4 – емкость; 5 – блок измерения температуры; 6 - теплообменник; 7 – насос; 8 – пульт управления; 9, 10, 11 - регулируемый трехфазный источник постоянного напряжения, в котором 11 – автотрансформатор; 10 – повышающий трансформатор; 9 – трехфазный выпрямитель. Стрелками показаны направления движения электролита и воды в теплообменнике. Электролит из теплообменника 6 насосом 7 подается в конус 2 и на обрабатываемую деталь 1. Исползованный электролит поступает в емкость 4 откуда сливается в теплообменник 6, где он охлаждается. Расход электролита составлял 3 л/мин, а охлаждающей воды – 5 л/мин. Температура электролита поддерживалась в области 40-50<sup>0</sup>С.



**Рис. 1.** Схема установки электролитно-плазменной обработки

У края образца наблюдали мелкозернистый мартенсит (рис.2,а), затем мелкозернистый переходный слой, постепенно переходящий в основной металл (рис.2,в). Размер мартенситной зоны - 1,5 мм. Закаленный слой имеет мелкое зерно 5-15 мкм.

Измерение микротвердости образца по глубине закаленного слоя выполнили на приборе ПМТ-3, при нагрузке 40 г по ГОСТ 9450-76. Данные измерения показаны на рисунке 3.



**Рис. 2.** Микроструктура стали после электролитно-плазменной обработки: а- зона I, б – зона II, в- зона III, ув. 1000

**Зависимость микротвердости образца из стали с 0,6% С от расстояния от края**



**Рис. 3.** График изменения микротвердости по сечению образца после электролитно-плазменной обработки

По данным [10], твердость закаленного слоя может достигать 800 HV.

Выполнили рентгеновско-дифракционный анализ закаленного слоя по сравнению с исходным металлом.

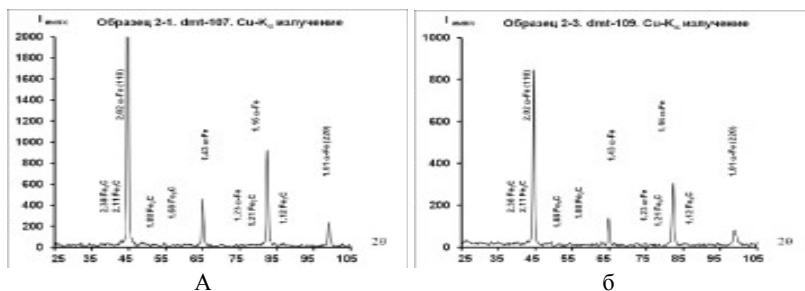


Рис. 4. Дифрактограммы исходного металла (а) и закаленного слоя (б)

Присутствуют линии максимумов  $\square$ -фазы и цементита. Значительное снижение интенсивности линий  $\square$ -фазы закаленного слоя может быть связано с измельчением блоков внутри зерна аустенита, внутренними напряжениями и неоднородным составе мартенсита.

Микроструктура трех зон, полученная с помощью растрового микроскопа РЭММА -102-02 приведена на рисунке 5.

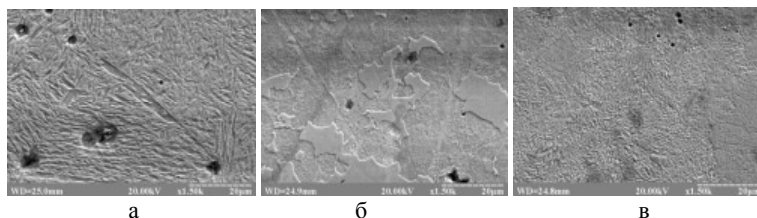


Рис. 5. Микроструктура образца по зонам: а- закаленная зона, б- переходная зона, в- исходный металл.

В закаленной зоне присутствуют фазы- мартенсит, остаточный аустенит + карбиды. Количество  $A_{ост}$  по визуальной оценке составляет 5-10%. Формирование такой структуры обусловлено малыми размерами аустенитных зерен, образовавшихся при скоростном электролитно-плазменном нагреве. Из-за крайне малой длительности пребывания металла при температуре нагрева и последующего резкого охлаждения рост зерна аустенита и его гомогенизация не происходят. Также задерживается и растворение карбидов. Переходная зона состоит из избыточного феррита и продуктов распада аустенита. Дисперсность этих фаз снижается в направлении от закаленной зоны к исходному металлу. Исходный металл – пластинчатый перлит.

Величину зерна оценили по фотографиям рис. 5. В закаленной зоне размер зерна 5-15 мкм, 20-30 мкм в переходной зоне, и основной металл имеет зерно 30 и более мкм.

### Выводы:

- 1) При обработке электролитно-плазменным разрядом образца стали с 0,6%С получен упрочненный поверхностный слой.
- 2) Микроструктура упрочненной части состоит из 3-х зон – I - мелкозернистая мартенситная зона, II – переходная зона, III – исходная структура пластинчатого перлита.
- 3) Микротвердость увеличивается от 200-300 V в исходной зоне до 700 V мартенситной зоне.
- 4) Интенсивность максимумов -фазы после обработки снижается более чем в 2 раза, что может быть связано с измельчением блоков внутри зерна аустенита, внутренних напряжениях и неоднородном составе мартенсита

### Список использованных источников

1. Ясногородский И.З. Автоматический нагрев в электролите.- М.: Оборонгиз, 1947. – 24 с.
2. Тюрин Ю.Н., Погребняк А.Д. Особенности электролитно-плазменной заковки (ЭПЗ). Журнал технической физики.-2002.-т.72.-в.11.- С.119-120.
3. Черненко В.И., Снежко Л.А., Папанова И.И., Литовченко К.И. Теория и технология анодных процессов при высоких напряжениях. Киев.- Наукова думка.- 1995.- 196 с.
4. Тутьк В.А. Балакин В.Ф., Сафьян П.П., Федорович О.А., Чигиринец Е.Э., Полозов Б.П. Модификация поверхности нержавеющей труб плазмохимическим травлением для энергетического машиностроения// Теория и практика металлургии. - 2009. - №4 - С.50-53.
5. Тутьк В.А., Сафьян П.П., Динник Ю.А. Очистка нержавеющей труб пароплазменным разрядом для энергетического машиностроения // Теория и практика металлургии.-2009.-№5-6.- С. 23-26.
6. Литвиненко Е.И., Тутьк В.А., Рубан А.И. Термическая обработка экономнолегированной среднеуглеродистой стали в электролитно-плазменном разряде. Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Материалы 13-го Международного научно-технического семинара, 18-22 февраля 2013 г., г. Свалява.- Киев: АТМ Украины, 2013.- С.101-104.
7. Словецкий Д.И. Механизм плазменно-электролитного нагрева//Д.И.Словецкий, С.Д.Герентьев, В.Г.Плеханов//Теплофизика высоких температур.-1986.- т.24.- №2.- С.353-363.
8. Остроумов Г.А. Взаимодействие электрических и гидравлических полей. М. Наука.1979.- 310 с.
9. Дурадзи В.Н., Брянцев И.В., Пасинковский Е.А.. Цементация и нитроцементация стали при нагреве в электролитной плазме//Электронная обработка материалов. – 1978.- №2. – С.15-18.с
10. Белкин П.Н.Электрохимико-термическая обработка металлов и сплавов. М: Мир,-2005. – 336 с.
11. Иосинори Т. Электролитическая заковка//Кикай гидзюцу.- 1977.- Т.25.- №8.- С.116-117 (яп).