

7. Игнатьков, Д.А. К образованию остаточных напряжений в электролитически осаждаемых металлах / Д.А. Игнатьков // Электронная обработка материалов. – 2001. – №. 6. – С. 16-34.

8. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов: в 2 т. / В.Е. Панин (отв. ред.) [и др.]. – Новосибирск: Наука, 1995. – 2 т.

#### Аннотация

#### Модель и механизм формирования остаточных напряжений в электролитических покрытиях

Излагаются модель и механизм формирования остаточных напряжений в электролитических покрытиях, а также некоторые представления на ряд явлений, происходящих при электролитическом осаждении и анодном растворении металлов.

#### Abstract

#### Model and the mechanism of formation of residual pressure in coverings

The model and the mechanism of formation of residual stresses in electrolytical coatings, and also some representations on a number of the phenomena occuring at electrolytical sedimentation and anode dissolution of metals are stated.

УДК 621.81

#### ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ И ПЛАЗМОХИМИКОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Игнатьков Д. А., д.т.н., с.н.с.

*Белорусский государственный аграрный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь*

Работа посвящена исследованию фазово-структурных превращений и остаточных напряжений (ОН) после плазмохимикотермической обработки (ПХТО) в условиях анодного плазменного электролитного нагрева (ЭН) поверхностных слоев, полученных методом электроискрового легирования (ЭИЛ). Эксперименты проводились на образцах из углеродистых сталей в исходном (Ст3) и предварительно нормализованном (сталь 35) состоянии. Образцы изготавливались из стали Ст3 в виде пластин (20×20×3 мм) и стержней из сталей Ст3 и 35 с диаметром 10 и длиной 100 мм. ЭИЛ осуществлялось электродами из Fe, Ni, Cr, Al и графита с удельным временем легирования 1 мин/см<sup>2</sup> на режимах установок с энергией разряда 0,1 Дж (МРД-103А, режим В2) и 3,14 Дж (ЭФИ-10М, режим 5). ПХТО в условиях плазменного электролитного нагрева проводилась на установке УХТО-5 в растворе электролита 10% NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>. Время нагрева составляло 30 с, после чего охлаждение проводилось на воздухе или выполнялась закалка в том же растворе электролита. Микроструктура образцов изучалась на микроскопе МИМ-8М, а рентгеноструктурные исследо-

вания проводились на дифрактометре ДРОН-3 (Co-K $\alpha$ - излучение). Остаточные напряжения определялись механическим методом путем удаления материала с полуцилиндрической поверхности образцов [1].

После электролитной закалки образцов, легированных: а) Fe как с энергией разряда 0,1 Дж, так и 3,14 Дж обе дифрактограммы практически одинаковы - сильные линии  $\alpha$ -Fe заметно уширены и размыты, имеются слабые линии  $\gamma$ -Fe, отмечено наличие большого количества окислов FeO, Fe $_3$ O $_4$  и  $\alpha$ -Fe $_2$ O $_3$ . Уширение и размытость линии  $\alpha$ -Fe свидетельствуют о наличии мартенситного превращения. Поскольку линии  $\alpha$ -Fe размыты, определить тетрагональность мартенсита не удалось; б) Ni с энергией разряда 0,1 Дж, на поверхности присутствуют фазы  $\alpha$ -Fe,  $\gamma$ -Fe и Ni, окислы FeO, Fe $_3$ O $_4$  и  $\alpha$ -Fe $_2$ O $_3$ , а также возможно аналогичные окислы Ni. В случае закалки образцов, легированных с энергией разряда 3,14 Дж, зарегистрированы сильные линии сплава (Ni, Fe), слабые линии  $\alpha$ -Fe, а также увеличение содержания NiO и уменьшение количества окислов железа; в) Cr как с энергией разряда 0,1 Дж, так и 3,14 Дж на дифрактограммах имеются интенсивные линии  $\alpha$ -Fe, отмечено уменьшение линии  $\gamma$ -Fe, а также появление окислов (Fe,Cr) $_3$ O $_4$ , FeO, (Fe,Cr) $_2$ O $_3$ ; г) Al с энергией разряда 0,1 Дж, на дифрактограмме отмечено усиление линий FeAl, появление слабых линий Al $_2$ O $_3$ , а также присутствие сильной линии  $\alpha$ -Fe. В случае закалки образцов, легированных с энергией разряда 3,14 Дж, зарегистрированы сильная линия  $\alpha$ -Fe, линия, возможно принадлежащая Al, слабые линии FeAl, Fe $_2$ Al $_5$ , Al $_2$ O $_3$ ; д) графитом с энергией разряда 3,14 Дж, линия  $\alpha$ -Fe на дифрактограмме размыта и уширилась почти в 2 раза вследствие мартенситного превращения, количество цементита Fe $_3$ C уменьшилось, появились окислы FeO и следы Fe $_3$ O $_4$ . Она также содержит спектр окислов железа FeO, Fe $_3$ O $_4$ ,  $\alpha$ -Fe $_2$ O $_3$  и слабую линию  $\alpha$ -Fe. После снятия с поверхности образцов окисного слоя толщиной 50 мкм на дифрактограмме выявился спектр  $\alpha$ -Fe, линии его уширены и размыты, что подтверждает наличие мартенситного превращения. Подобный эффект наблюдается после удаления окисных слоев с поверхности, легированной Fe, Ni, Cr, Al.

Металлографический анализ легированных образцов электродами из Ni и графита, а затем подвергнутых ПХТО при ЭН, показывает, что глубина проникновения элементов поверхностного слоя в основу составляет порядка 0,35-0,4 мм (рисунок 1, 2), что обусловлено аномальным переносом элементов вглубь основы.

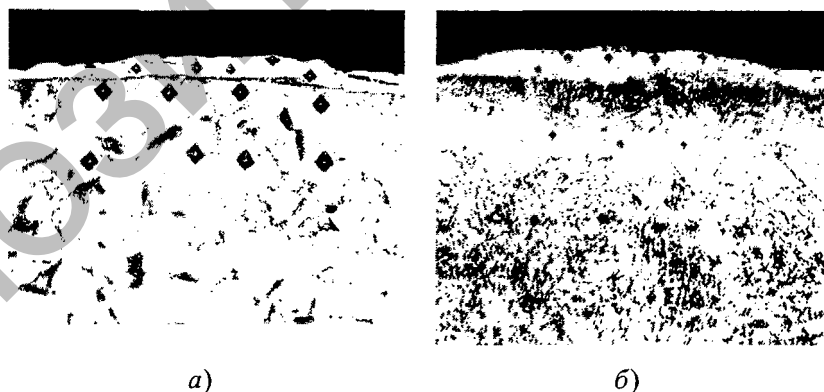


Рисунок 1 – Микроструктура легированного никелевым электродом образца из стали 3 (а) и после плазмохимикотермической обработки (б). Увеличение 500

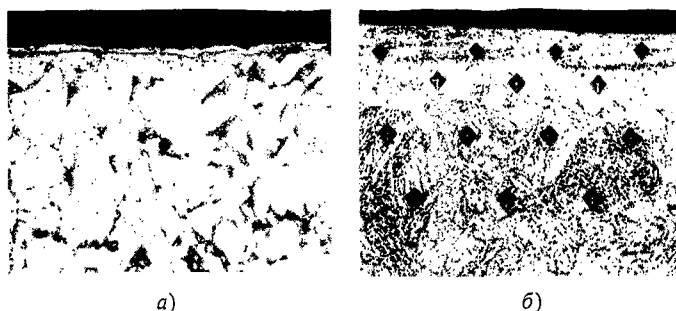


Рисунок 2 – Микроструктура легированного графитовым электродом образца из стали 3 (а) и после плазмохимикотермической обработки (б). Увеличение 500

Комбинированная обработка в обоих случаях привела к получению в приповерхностной области мартенситной структуры (рисунок 1.б, 2.б). Мартенситные иглы преимущественно направлены перпендикулярно к поверхности и их длина гораздо больше, чем в случае отсутствия предварительного электроискрового легирования. Глубина проникновения легирующих элементов составляет несколько сотен микрометров и на несколько порядков превышает значения, характерные для диффузионных процессов, обусловленных вакансиями и «дислокационными трубками». Такое явление, связанное с интенсивным переносом вещества на большие расстояния за короткие промежутки времени  $\sim 10^{-5}-10^{-3}$  с, наблюдается при ударном воздействии на материал [2]. Показано [3], что представления о сильновозбужденных состояниях (СВС) в кристаллах позволяют объяснить высокие скорости массопереноса в условиях «давление + сдвиг», при этом массоперенос на большую глубину происходит при развитии в ударной волне сдвиговых деформаций [4].

Ранее автором была высказана гипотеза [5-7], что в электрохимических процессах осаждения, растворения и нагрева металлов в движущемся поверхностном слое возникает СВС, подобное переохлажденной жидкости (квазижидкое состояние), вследствие сильных колебательных смещений и движений атомов, является диссипативным и обусловлено воздействиями внешних (ударно-волновое нагружение на атомно-кристаллическом структурных уровнях, вызываемое перестройкой электронных состояний в моменты импульсных разрядов ионов и ионизации атомов) и внутренних (связанных с действием в локальных объемах материала высоких давлений из-за вхождения ионов неметаллов в решетку, накопления водорода, наличия различного рода дефектов, структурно-фазовых переходов, концентрации напряжений и др. факторов) полей. Такое предположение согласуется с современными представлениями физики деформируемого твердого тела [8] и позволяет, в частности, объяснить ускоренный перенос легирующих элементов при ЭИЛ и ПХТО в условиях ЭН за счет наличия в поверхностном слое СВС и действия ударно-волновых нагрузок. В указанных процессах учет механизмов и построение математических моделей образования волн напряжений, переходящих в ходе нелинейной эволюции в ударные, представляется весьма привлекательным.

ПХТО легированных образцов электродами из Cr и Ni в условиях ЭН с последующим охлаждением на воздухе вызывает рост значений ОН растяжения соответственно на 42% и 88% (таблица 1). Подобная дополнительная обработка легированных образцов электродами из Al и графита, наоборот, способствует снижению уровня ОН растягивающих напряжений соответственно на 47% и 87%. ЭИЛ поверхности, предварительно подвергнутой ПХТО при ЭН, не обеспечивает снижения уровня ОН растяжения. ПХТО в условиях ЭН образцов из Ст3 и последующее их охлаждение на воздухе приводит к формированию в наружном поверхностном слое растягивающих ОН порядка 76 МПа. В таблице 2 приведены значения ОН в поверхностных слоях образцов из стали 35 после ЭИЛ поверхности электродами из Al, Cr, Ni, Al и графита и электролитной закалки. Если после ЭИЛ в по-

верхностных слоях действуют растягивающие ОН, то после закалки легированных образцов в условиях ЭН их знак, величина и характер распределения по глубине слоя меняются существенным образом. Характерным является то, что после закалки образцов, легированных Fe, Ni и графитом с энергиями разряда 0,1 и 3,14 Дж, а также Al с энергией разряда 0,1 Дж в окисных слоях толщиной 20-80 мкм отсутствуют ОН. По мере дальнейшего углубления в приповерхностную область наблюдается постепенный рост ОН сжатия, величина которых достигает наибольших значений в более глубоких слоях толщиной 0,18-0,2 мм, а затем - постепенный их спад.

Таблица 1 – Значения ОН в наружном поверхностном слое образцов из стали Ст3 после ЭИЛ различными электродными материалами с энергией разряда 0,1 Дж и разных вариантов ПХТО в условиях ЭН

Вид обработки	Величина остаточных напряжений, МПа			
	Cr	Ni	Al	C
ЭИЛ	603	559	636	469
ЭИЛ+ЭН	853	1048	334	59
ЭН+ЭИЛ	559	598	-	809

Таблица 2 – Знак и значения ОН в наружном поверхностном слое (числитель) и в глубине слоя (знаменатель) образцов после ЭИЛ и обработки в условиях ЭН

Вид обработки	Значения остаточных напряжений, МПа				
	Fe	Cr	Ni	Al	C
ЭИЛ с энергией разряда 0,1 Дж	93	511	530	341	245
То же + ПХТО	-15/-503	150/-892	-20/329	-63/-591	-83/-464
ЭИЛ с энергией разряда 3,14 Дж	183	890	653	350	481
То же + ПХТО	-85/-423	614/-526	-50/-493	11	-36/-233

Закалка легированных образцов Cr не приводит к образованию в наружном поверхностном слое сжимающих ОН, но способствует уменьшению уровня ОН растяжения, возникающих после ЭИЛ. Если после легирования с энергией разряда 0,1 Дж и закалки переход растягивающих ОН в сжимающие происходит на глубине ~30 мкм, то после легирования с энергией разряда 3,14 Дж и закалки глубина перехода составляет 90 мкм. ОН растяжения в образцах, легированных Al с энергией разряда 3,14 Дж и подвергнутых закалке, распределяются таким образом: на поверхности их величина составляет 11 МПа, по мере углубления в приповерхностную область происходит постепенное уменьшение их значений и в глубине слоя 0,2 мм они переходят в сжимающие остаточные напряжения.

Причиной возникновения ОН при ПХТО в условиях ЭН является неравномерная пластическая деформация материала поверхностного слоя при нагреве и охлаждении, а также фазово-структурные превращения в процессе охлаждения. Интенсивный электролитный нагрев вызывает появление в поверхностных слоях временных температурных напряжений. Поскольку менее нагретые нижележащие слои препятствуют расширению наружного слоя, то возникает градиент пластических деформаций. Поэтому возникшая при нагреве пластическая деформация сжатия после медленного охлаждения детали на воздухе приводит к формированию ОН растяжения. При закалке в результате образования мартенсита с большим удельным объемом решетки поверхностные слои стремятся увеличить свой объем, чему препятствуют нижележащие слои материала. Это приводит к возникновению в наружных слоях напряжений сжатия. В процессе охлаждения мартенситные превращения распространяются в более глубоко расположенные слои при постоянном объеме уже охлажденного поверхностного слоя. Поэтому слои с образующимся мартенситом рас-

тягивают наружные слои, вызывая тем самым снижение в них временных напряжений сжатия вплоть до перехода их в растягивающие и сдвиг максимума сжимающих напряжений вглубь приповерхностной области.

Таким образом, если после ПХТО охлаждение образцов производится на воздухе, то в поверхностных слоях действуют ОН растяжения. ПХТО с последующей электролитной закалкой приводит к формированию в них ОН сжатия с максимальными значениями в глубине слоя.

Автор выражает благодарность сотрудникам ИПФ АН Молдовы д.т.н. В.В. Михайлову и д.т.н. Е.А. Пасинковскому за подготовку образцов и участие в проведении микроструктурных и рентгеноструктурных исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Игнатьков, Д.А. Остаточные напряжения в неоднородных деталях /Д.А. Игнатьков. - Кишинев: Штиинца, 1992. - 302 с.
2. Герцрикен, Д.С. Импульсная обработка и массоперенос в металлах при низких температурах / Д.С. Герцрикен, В.Ф. Мазанко, В.М. Фальченко. - Киев: Наукова думка, 1991. - 360 с.
3. Хон, Ю.А. Об аномальном переносе в деформируемых материалах в условиях «давление + сдвиг» / Ю.А. Хон, В.Е. Панин // Физика твердого тела. - 1996. - Т. 38. - № 12. - С. 3614-3618.
4. Егоров, Б.В. Анализ природы массопереноса в металлических кристаллах при прохождении ударных волн / Б.В. Егоров, Л.О. Зворыкин // Металлофизика и новейшие технологии. - 1996. - Т. 18. - № 8. - С. 47-48.
5. Игнатьков, Д. А. Механизм образования остаточных напряжений в электролитических покрытиях / Д. А. Игнатьков // Письма в ЖТФ. - 1993. - Вып. 1. - С. 70-74.
6. Игнатьков, Д.А. К образованию остаточных напряжений в электролитически осаждаемых металлах /Д.А. Игнатьков// Электронная обработка материалов. - 2001. - № 5. - С. 21-31.
7. Игнатьков, Д.А. К образованию остаточных напряжений в электролитически осаждаемых металлах /Д.А. Игнатьков// Электронная обработка материалов. - 2001. - № 6. - С. 19-34.
8. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов: в 2 т. / В.Е.Панин (отв. ред.) [и др.]. - Новосибирск: Наука, 1995. - 2 т.

#### Аннотация

#### **Остаточные напряжения и структура поверхностных слоев после электроискрового легирования и плазмохимикотермической обработки**

Представлены результаты исследований фазово-структурных превращений и остаточных напряжений в легированных электроискровым методом поверхностных слоях после плазмохимикотермической обработки в условиях электролитного нагрева.

#### Abstract

#### **Residual stress and structure of surface layers after the electro-spark alloying and heat treatment**

Results of phase-structural transformation and residual stresses in surface layers after electrospark doping of carbon steels of various alloy composition and plasma-chemical-thermal treatment under condition electrolytic heating are presented.