

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПОСЛЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

Игнатъков Д. А., д.т.н., с.н.с.

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

Изучение фазово-структурного и остаточного напряженного состояний материалов поверхностных слоев, полученных методом электроискрового легирования, проводилось на образцах из стали Ст3 в исходном состоянии в виде пластин с размерами 20×20×3 мм и стержней из нормализованных сталей Ст3 и 35 с диаметром 10 и длиной 100 мм. Электроискровое легирование осуществлялось электродами из Fe, Ni, Cr, Al и графита с удельным временем легирования 1 мин/см² на установках с энергией разряда 0,1 Дж (МРД-103А, режим В2) и 3,14 Дж (ЭФИ-10М, режим 5). Рентгеноструктурные исследования проводились на дифрактометре ДРОН-3 (Co-K_α-излучение). Остаточные напряжения определялись механическим методом путем удаления материала с полуцилиндрической поверхности образцов [1].

Установлено, что дифрактограмма поверхности, легированной: а) Fe с энергией разряда 0,1 Дж, содержит сильную линию α-Fe, слабые линии γ-Fe и FeO. Легирование с энергией разряда 3,14 Дж дает сильные линии α-Fe и FeO, слабые линии γ-Fe и следы Fe-C. Перераспределение интенсивности дифракционных максимумов γ-Fe свидетельствует о текстуре фазы; б) Ni с энергией разряда 0,1 Дж, показала присутствие основной фазы α-Fe, есть линии γ-Fe и NiO, а также слабые линии Ni и FeO. Увеличение энергии разряда до 3,14 Дж приводит к резкому уменьшению линий α-Fe, увеличению содержания FeO и появлению сильных линий фазы сплава железо-никель (Ni, Fe) с параметром ГЦК-решетки $a=3,56 \text{ \AA}$, что соответствует составу ~70% Ni, ~30% Fe; в) Cr с энергией разряда 0,1 Дж, содержит спектр сильных линий α-Fe и γ-Fe. В поверхностном слое образуется Fe - Cr сплав. Легирование поверхности Cr с энергией разряда 3,14 Дж не приводит к изменению фазового состава, но на дифрактограмме линии менее интенсивны и несколько уширены, что возможно связано с меньшей упорядоченностью сплава; г) Al с энергией разряда 0,1 Дж, показала содержание двух фаз: линии α-Fe гораздо сильнее линий FeAl. В случае легирования с энергией разряда 3,14 Дж на дифрактограмме имеются сильная линия α-Fe, возможно, линия Al, а также слабые линии FeAl, FeAl₃, Al₂O₃, а графитом с энергией разряда 0,1 Дж, содержит сильную линию α-Fe, слабый спектр γ-Fe и Fe₃C. В случае легирования с энергией разряда 3,14 Дж, зарегистрированы сильные линии α-Fe и Fe₃C, слабая линия γ-Fe и следы C.

Электроискровое легирование поверхности цилиндрических образцов из Ст3 и стали 35 электродами из Fe, Cr, Ni, Al и графита приводит к формированию в поверхностных слоях остаточных напряжений растяжения (таблица 1): на поверхности они имеют наибольшие значения и по мере углубления в приповерхностную область уменьшаются, переходя в сжимающие на глубине 0,18-0,2 мм.

Механизм образования остаточных напряжений рассматривается на учете связи между внешними и внутренними термомеханическими воздействиями и изменением вследствие этого упругопластического и фазово-структурных состояний [2].

Таблица 1 – Значения остаточных напряжений в поверхностных слоях образцов после электроискрового легирования

Вид обработки	Значения остаточных напряжений, МПа				
	Fe	Cr	Ni	Al	C
Сталь Ст3, энергия разряда 0,1 Дж	-	603	559	636	469
Сталь 35, энергия разряда 0,1 Дж	93	511	530	341	245
Сталь 35 энергия разряда 3,14 Дж	183	890	653	350	481

Поскольку время тепловой релаксации существенно меньше длительности импульсного электрического разряда, то практически мгновенный нагрев материала катода вызывает в приповерхностной области образование импульса сжатия и генерирование напряжений, а затем плавление, испарение и выброс материала.

В начальные моменты расширение нагреваемого материала под действием высоко-го градиента температуры приводит к возникновению давления на его соседние холодные слои. Приближенная оценка величины давления в импульсе сжатия при действии на поверхность катода импульсного теплового потока с плотностью мощности 10^5 Вт/см² и длительностью 10^{-3} проводилась по известной формуле

$$p = \frac{\beta E C_T \tau}{1 - 2\nu},$$

в которой $\beta = 3\alpha$ и α - соответственно коэффициенты объемного и линейного температурного расширения; E - модуль Юнга; ν - коэффициент Пуассона; $G_T = I \alpha / k t$ - градиент температуры; I - плотность мощности теплового потока; k - коэффициент теплопроводности; a - коэффициент температуропроводности; t - толщина слоя; $\tau = T k / I a$ и T время и температура нагрева. Нагрев поверхностного слоя образца из Fe толщиной 10 мкм до 750 К ($E = 223$ ГПа; $\nu = 0,26$; $a = 16,7 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹; $k = 0,74$ Вт/см²°С; $a = 0,228$ см²/с [3]) происходит за время $1,6 \cdot 10^{-5}$ с, которое почти на полтора порядка меньше, чем длительность импульса нагрева. Градиент температуры составляет $3,1 \cdot 10^7$ К/с, а величина давления в импульсе сжатия достигает 11,1 ГПа. При нагреве до температуры 1023 К в течение $2,4 \cdot 10^{-5}$ с давление возрастает до 17,4 ГПа. Оценки свидетельствуют, что при электроискровом легировании в моменты прохождения электрического импульса локальный объем материала катода подвергается в короткие промежутки времени действию высокого давления, достаточного для образования в диапазоне температур от 296 до 750 К и изменении давления от $\sim 13,8$ (296 К) до $\sim 9,8$ (750 К) гексагональной ϵ -модификации Fe [4-6]. В системе Fe – C при высоком давлении также образуется ϵ -модификация твердого раствора [7]. Возникновение β -Fe модификации и целой гаммы ее превращений происходит в интервале температур 1200 – 2500 К при давлениях 38 и более ГПа [5,6].

Поскольку при тепловом ударе локальный объем материала быстро расширяется и оказывает давление на соседние холодные слои, то появляется ударная волна сжатия, формирование которой происходит при выполнении условия [8]

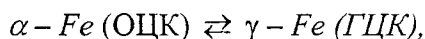
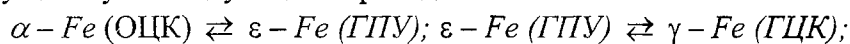
$$\frac{IS}{\tau} > C_e^4 \rho R,$$

где I и τ - плотность мощности и длительность действия потока ионов; S - площадь облучения; C_e - скорость звука; ρ - плотность; R - длина пробега ионов в материале. При облучении Fe потоком ионов при $IS/\tau \approx 10^{15}$ и $C_e^4 \rho R \approx 10^{12}$ ($I = 10^8$ Вт/см²; $\tau = 10^{-7}$ с; $C_e = 5 \cdot 10^5$ см/с; $\rho = 7,9$ г/см³; $R = 10^{-4}$ см) начальное давление во фронте ударной волны составляет от 2 до 10 ГПа [8]. Установлено [9], что при импульсном облучении поверхности электронными и ионными пучками нано- и микросекундной длительности с плотностями мощности $10^7 - 10^{12}$ Вт/см² происходит разогрев приповерхностной области с градиентом температу-

ры $10^{10} - 10^{12}$ К/с, влекущий за собой возникновение высоких давлений и мощных волн термомеханических напряжений, переходящих в ударные волны мега- и гигабарного диапазона давлений. При электроискровом легировании следствием воздействия на поверхность анода концентрированного импульсного потока электронов с большой плотностью мощности является тепловой взрыв, сопровождающийся выбросом в межэлектродное пространство струи ионизированного вещества, пара и мелкодисперсных капель материала анода. Последующий удар анодной струи о поверхность катода происходит со скоростями не ниже $\sim 1 - 10$ км/с [10], при этом величина давления, возникающего при ударе струи в преграду со скоростью 5 км/с, составляет ~ 100 ГПа [11]. Таким образом, в процессе прохождения электрического разряда интенсивный тепловой нагрев локальной зоны катода с высоким градиентом температуры и одновременное ее импульсное нагружение высоким давлением в результате высокоскоростного удара анодной струи приводят к образованию в локальном объеме материала катода неравновесного температурного поля, а также возбуждению волнового поля механических напряжений с высокими значениями амплитуд в ударной волне сжатия и создающихся волнах разгрузки и отражения. Поскольку закономерности протекания тепловых и термомеханических процессов при импульсных воздействиях потоков ионов и электронов на поверхность определяются плотностью мощности, длительностью импульса и пространственно-временной формой функции энерговыведения [8], то в зависимости от условий и технологических режимов электроискрового легирования в материале возбуждаются термомеханические возмущения, которым соответствуют волны напряжений различной степени интенсивности, включая ударные волны, приводящие к появлению пластических течений и деформаций, ударно-волновых явлений и фазово-структурных переходов. Таким образом, возникновение остаточных напряжений при электроискровом легировании обусловлено протеканием в моменты действия импульсных электрических разрядов взаимосвязанных процессов генерации и эволюции тепловых и термомеханических полей, которые порождают в локальных объемах материала катода упругопластическое и неравновесное фазово-структурное состояния, переход из которых после прекращения импульсного разряда в стабильное состояние в условиях сверхбыстрого охлаждения приводит к появлению при разгрузке упругих остаточных деформаций и соответственно остаточных напряжений. Их механизм образования представляется следующим образом. Мгновенный импульсный нагрев локального объема материала с высоким градиентом температуры вызывает его резкое расширение. Увеличению объема препятствуют холодные слои, окружающие локальную область нагрева, что приводит к большим временным сжимающим напряжениям и соответствующему градиенту пластических деформаций сжатия. Максимум величины напряжений находится в глубине приповерхностной области, которые по мере приближения к поверхности уменьшаются из-за высокотемпературного пластического течения материала и в зоне расплава, естественно, отсутствуют. По окончании импульсного нагрева происходит мгновенное охлаждение локального объема материала, сопровождающееся его сжатием. Этому препятствуют нижележащие холодные слои материала, результатом чего является развитие временных напряжений растяжения, которые после установления нормальной температуры становятся растягивающими остаточными напряжениями. В случае, когда при охлаждении в материале происходит фазовый переход с увеличением объема кристаллической фазы, то он приводит к появлению сжимающих остаточных напряжений. Наоборот, если происходит формирование структур, сопровождающееся уменьшением удельного объема, то это приводит к повышению уровня остаточных напряжений растяжения. Итоговый знак и величина остаточных напряжений зависят от преимущественной роли термомеханических напряжений и напряжений от фазовых переходов при формировании остаточного напряженного состояния после прекращения действия импульсного электрического разряда. Поскольку после электроискрового легирования практически всегда наблюдается высокий уровень растя-

гивающих остаточных напряжений в наружном слое белого слоя, обычно превосходящий предел текучести материала до обработки, то очевидно, что их образование связано не только с проявлением термомеханического фактора, но и с фазово-структурными переходами, при которых превращения при формировании белого слоя, по-видимому, происходят с уменьшением удельного объема фазовых структур.

Из фазовой диаграммы $T-P$ для Fe [4-6] следует, что в области тройной точки (750 К, ~9,8 ГПа) существуют следующие переходы:



при которых изменения удельных объемов решеток составляют [12]: $\Delta V (\text{ОЦК} \rightleftharpoons \text{ГПУ}) = \mp 0,34 \text{ см}^3/\text{моль}$;

$$\Delta V (\text{ГПУ} \rightleftharpoons \text{ГЦК}) = \pm 0,13 \text{ см}^3/\text{моль}; \Delta V (\text{ГЦК} \rightleftharpoons \text{ОЦК}) = \pm 0,21 \text{ см}^3/\text{моль}.$$

Отсюда следует, что повышению уровня остаточных напряжений растяжения может способствовать превращение $\alpha - Fe \rightarrow \gamma - Fe$ в случае отсутствия или незавершенности обратного перехода, сопровождающегося уменьшением удельного объема на величину $-0,21 \text{ см}^3/\text{моль}$. Подтверждением тому служат изложенные выше данные, свидетельствующие о присутствии на дифрактограммах слабых линий $\gamma - Fe$ после электроискрового легирования электродом из Fe. Поскольку переходы $\varepsilon - Fe \rightarrow \alpha - Fe$ и $\varepsilon - Fe \rightarrow \gamma - Fe \rightarrow \alpha - Fe$ после снятия давления сопровождаются увеличением удельного объема, то в случае их протекания по таким схемам должен был бы наблюдаться или низкий уровень остаточных напряжений растяжения, либо появление даже сжимающих остаточных напряжений. Поскольку экспериментальные данные говорят об обратном, то очевидно, что трансформация ε -фазы высокого давления и, возможно, β -фазы при формировании белой зоны при электроискровом легировании происходит в условиях ударно-волнового нагружения по более сложному механизму, обусловленному многоволновой структурой волн нагрузки и разгрузки. Согласно [13], в результате импульсных механических и баротермических воздействий в эвтектоидных и доэвтектоидных углеродистых и легированных сталях в ничтожные доли секунды возникает восемь каскадов мгновенных ступенчатых фазово-структурных превращений, приводящих к образованию белой зоны со структурой, названной эксмартенситом. Учитывая, что при прохождении биполярной волны напряжений в локальных областях мартенсита возникает сильное поле временных растягивающих напряжений [14], то можно предположить о существовании при образовании белого слоя на каких-то стадиях многоступенчатых фазово-структурных переходов объемных изменений, приводящих к созданию при электроискровом легировании больших по величине остаточных напряжений растяжения. Поскольку развитие объемных изменений промежуточных кристаллических структур в течение столь короткого времени весьма трудно исследовать экспериментальными средствами, то численное моделирование может дать более полную картину механизма образования остаточных напряжений с учетом ударно-волновых явлений при электроискровом легировании материалов.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Игнатков, Д.А. Остаточные напряжения в неоднородных деталях / Д.А. Игнатков. - Кишинев: Штиинца, 1992. - 302 с.
2. Игнатков, Д.А. К образованию остаточных напряжений при электроискровом легировании / Д.А. Игнатков // Электронная обработка материалов. - 2001. - № 4. - С. 9 - 14.
3. Свойства элементов: в 2 ч. / Г.В. Самсонов (гл. ред.) [и др.] - М.: Металлургия, 1976 - . Ч. 1: Физические свойства. - 1976. - 600 с.

4. Тонков, Е.Ю. Фазовые диаграммы элементов при высоком давлении / Е.Ю. Тонков.- М.: Наука, 1979. - 192 с.
5. Saxena, S.K. Synchrotron X-ray Study of Iron at High Pressure and Temperature / S.K. Saxena, L.S. Dubrovinsky, P. Haggkvist, Y. Cerenius, G. Shen, H.K. Mao // Science. - 1995. - V 269. - P. 1703 - 1704.
6. Yoo, C.S. Phase Diagram of Iron by in Situ X-ray Diffraction: Implications for Earth's Core / C.S. Yoo, J. Akella, A.J. Campbell, H.K. Mao, R.J. Hemle // Science. - 1995. - V 270. - P. 1473 - 1474.
7. Григорович, В.К. Периодический закон Менделеева и электронное строение атомов / В.К. Григорович. - М.: Наука, 1966. - 287 с.
8. Валяев, А.Н. Влияние градиента давления ударной волны в α -Fe, облученном мощным ионным пучком, на появление максимума микротвердости на больших глубинах / А.Н. Валяев, А.Д. Погребняк, В.И. Лаврентьев и др. // Письма в ЖТФ. - 1998. - Т. 24. - № 3. - С. 47 - 53.
9. Блейхер, Г.А. Диссипация энергии мощных импульсных пучков заряженных частиц в твердом теле. Тепловые процессы / Г.А. Блейхер, В.П., Кривобоков, О.В. Пашенко // Изв. вузов. Физика. - 1997. - №2. - С. 67 - 89.
10. Намитоков, К.К. Электроэрозионные явления / К.К. Намитоков. - М.: Энергия, 1978. - 456 с.
11. Кожушко, А.А. Гидродинамические модельные представления о проблеме динамической прочности материалов различной физико-химической природы / А.А. Кожушко, А.Л. Изотов, В.Б. Лазарев, А.С. Баланкин // Неорганические материалы. - 1993. - Т. 29. - Вып. 9. - С. 1171 - 1209.
12. Mao, H.K. Effect of Pressure on Crystal Structure and Lattice Parameters of Iron up to 300 kbar / H.K. Mao, W.A. Basset, T. Takahashi // J. Appl. Phys. - 1967. V. - 38. - N 1. - P. 272 - 276.
13. Палатник, Л.С. «Эксмартенсит» в эвтектоидных сталях / Л.С. Палатник // Докл. АН СССР. - 1987. - Т. 297. - № 2. - С. 358 - 360.
14. Иванов, Ю.Ф. Диссипация энергии волны напряжений и структурные изменения в сталях, облученных импульсным электронным пучком / Ю.Ф. Иванов, В.И. Итин, С.В. Лыков, Г.А. Месяц Г.А. и др. // Докл. АН СССР. - 1991. - Т. 321. - № 6. - С. 1192 - 1196.

Аннотация

Остаточные напряжения после формирования поверхностного слоя электроискровым легированием

Представлены результаты исследований остаточных напряжений и фазо-структурных превращений в поверхностных слоях, легированных различными материалами электроискровым методом.

Abstract

Residual stress after the formation of a surface layer of electro-spark alloying

Results of researches of residual stresses and phase-structural transformations in surface layers alloyed by various materials by an electro spark method are presented.