

СТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ

А.М. Жукешов, А.Т. Габдуллина, С.П. Пак, А.У. Амренова

НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы

Методом рентгеноструктурного анализа исследован фазовый состав поверхности углеродистой стали, модифицированный плазменной обработкой в различных режимах. Используются режимы однократного и многократного воздействия потоками плазмы. Исследовано влияние размеров областей когерентного рассеяния, принадлежащих различным фазам, на микротвердость стали. Показано, что твердость обработанной стали повышается пропорционально уменьшению размеров кристаллитов феррита при однократном воздействии..

Обработка поверхности твердых тел с применением импульсных потоков плазмы является одним из перспективных способов для создания материалов с заданными свойствами, в том числе с наноразмерной структурой. Особенностью данного метода является высокая плотность мощности воздействия на поверхность материалов, что приводит к расплавлению приповерхностного слоя материала и скоростям остывания 10^6 - 10^8 К/с [1-3]. Очевидно, что технологические параметры обработки, приводящие к формированию структур заданного размера, могут быть достигнуты лишь при определенных режимах воздействия. Как показано в наших работах, импульсный плазменный ускоритель КПУ-30 имеет плотность мощности $0,5$ - 5 МВт/см², достаточно высокую для обработки поверхности как полупроводников, так металлических материалов с расплавлением [4,5]. Хорошо исследована работа этого ускорителя в импульсном режиме, когда рабочий газ впрыскивается в межэлектродное пространство перед подачей высокого напряжения [6]. В другом режиме, при постоянном начальном давлении газа в рабочей камере, параметры плазмы изменяются в более широких пределах. Кроме этого, недавно нами показано, что при разном давлении газа в канале ускорителя могут формироваться ступки с преимущественным содержанием электронной или ионной компоненты, что может играть важную роль в процессе обработки материала [7].

Для металлических сплавов типа углеродистых и легированных сталей, одним из важных результатов импульсного плазменного воздействия является упрочнение. Очевидно, упрочнение является структурно-чувствительным параметром. С другой стороны, как было отмечено, структурные изменения зависят от режимов обработки. Поэтому, в данной работе исследовано влияние режимов плазменной обработки на изменения в структуре и как следствие, на твердость сталей.

Сравним расчеты с экспериментальными результатами. Исследованы 13 образцов углеродистой стали, вырезанных в виде пластин $15 \times 10 \times 5$ мм. Обработка проводилась при разных плотностях энергии воздушной плазмы и при разном количестве импульсов с одинаковой энергией. Рабочее давление воздуха в камере ускорителя непосредственно перед разрядом составляло $0,04$ - $0,1$ мм.рт.ст. Рентгеноструктурный анализ обработанных образцов проведен на дифрактометре “D8 Advance”, микротвердость измерена на приборе “Metaval” методом Виккерса при нагрузке 20 г.

Параметры образцов стали, обработанных однократными импульсами с разной плотностью энергии приведены в таблице 1.

Основой исходного образца углеродистой стали является α -железо с параметром кристаллической решетки $a = 2.8684 \pm 0.0004$ Å. Характерной чертой обработки для всех образцов является монотонное уменьшение размеров кристаллитов (ОКР) феррита, что связано с перекристаллизацией поверхности. В то же время, результат воздействия параметра плотности энергии на размеры ОКР аустенитной фазы имеет нетривиальный характер. Как видно из таблицы 1, минимальный размер кристаллитов аустенита содержится

в образце №7, обработанном 44 Дж/см². Количество аустенитной фазы достигает максимума при плотности энергии 32 Дж/см², при этом наблюдается максимальный размер кристаллитов (№5).

Таблица 1 Параметры обработки и характерные размеры микроструктур в металлах

Образец	Плотность энергии Дж/см ²	H _v , МПа	Феррит L, Å	Аустенит L, Å
Исх.	0	1620	1160	-
№2	7	1812	-	-
№ 3	16	2044	730	175
№ 4	22	3446	610	160
№ 5	32	3904	460	240
№6	39	4072	-	-
№ 7	44	4168	115	110
№8	47	7255	-	-
№ 9	48	6932	145	140

Рентгенограмма исходного образца углеродистой стали приведена на рисунке 1.

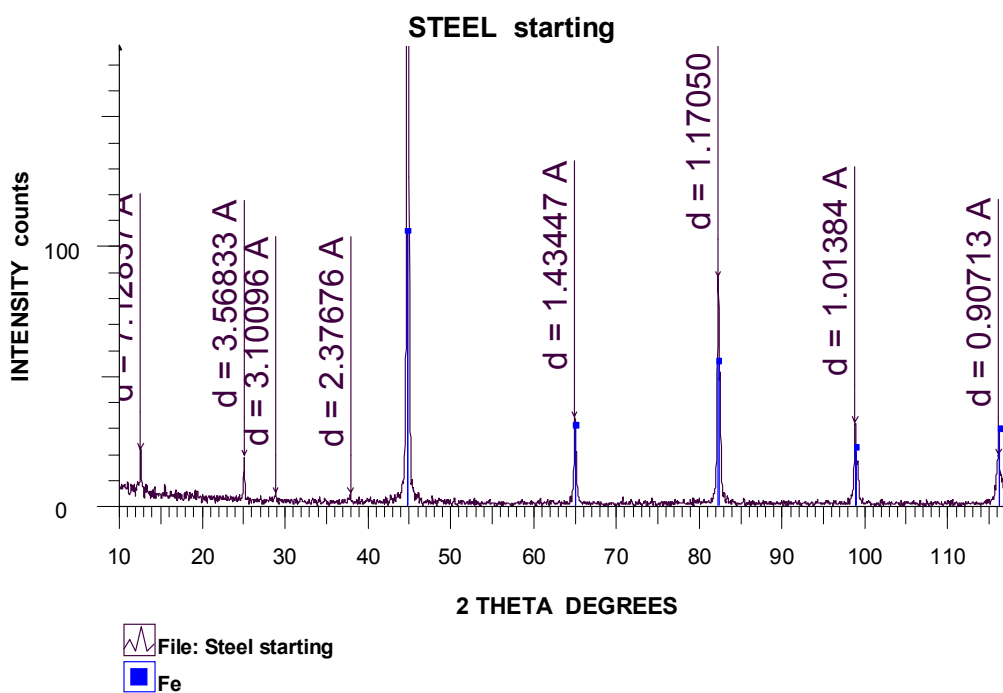


Рис. 1. Рентгенограмма исходного образца углеродистой стали

Рентгенограмма образца №7 углеродистой стали, обработанного при 44 Дж/см² одним импульсом, приведена на рисунке 2.

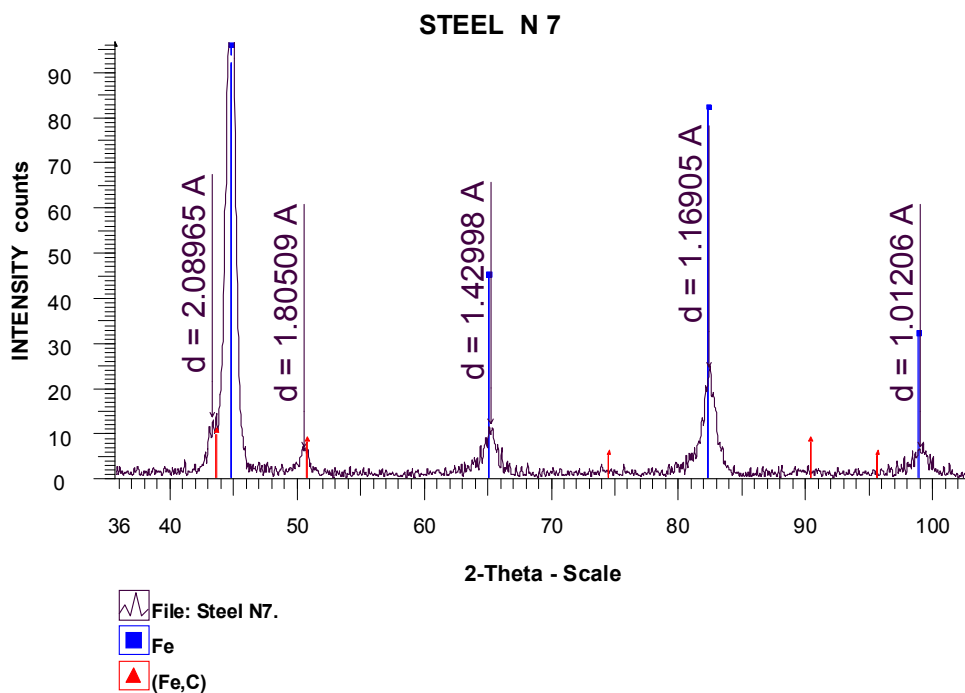


Рис.2. Рентгенограмма образца №7 углеродистой стали

Структурные параметры также отчетливо влияют на значение микротвердости материала, значения которых приведены на рисунке 3.

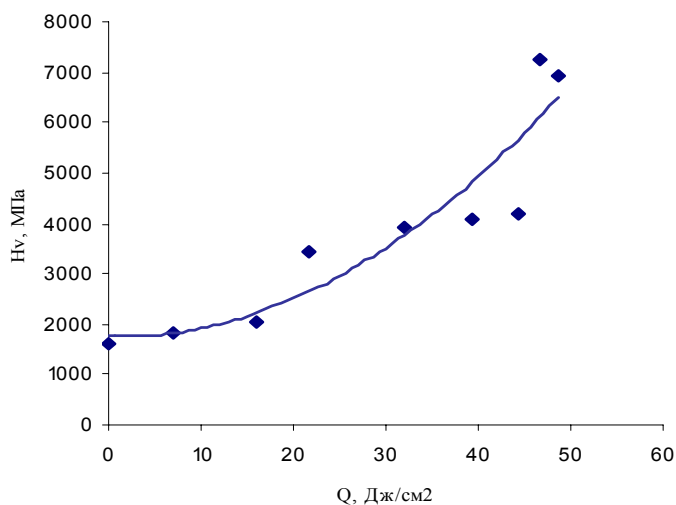


Рис.3. Зависимость микротвердости от плотности энергии

Микротвердость обработанных образцов изменяется пропорционально плотности энергии, однако наблюдается определенная закономерность. Как видно из рисунка 3, для первой группы образцов (образцы №2,3) значение микротвердости практически не меняется. Для второй группы (образцы № 4,5,6,7) микротвердость возрастает около двух раз, а для третьей группы (образцы №8,9) возрастает более чем в три раза. Тем не менее, наблюдается общая тенденция к увеличению микротвердости с ростом плотности энергии. Представляет интерес, каким образом микротвердость зависит от размеров формируемых в результате обработки ОКР. Эти данные приведены на рисунке 4.

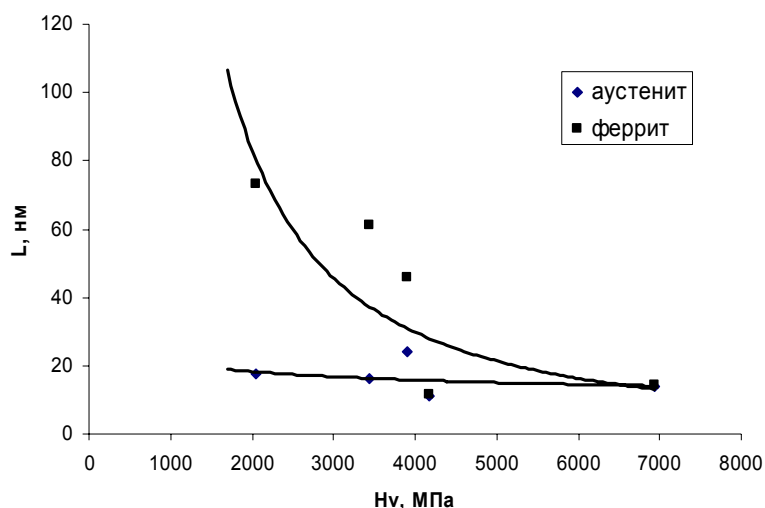


Рис.4. Зависимость микротвердости стали от размеров ОКР аустенита и феррита

Таким образом, в результате обработки при однократном воздействии происходит значительное уменьшение размеров ОКР и увеличение твердости. Максимальное увеличение микротвердости до 5 раз достигается при размерах ОКР аустенита и феррита около 15 нм. Причем, если размеры кристаллитов феррита уменьшаются на порядок пропорционально росту твердости, то размеры аустенита изменяются незначительно.

Рассмотрим далее данные по образцам углеродистой стали, обработанных многократно 5, 10, 20 и 30 импульсами плазмы при сравнимом значении плотности энергии 20-30 Дж/см². Результаты РФА образцов стали, обработанных многократно (рис. 5) показали, что гранцентрированная кубическая фаза, которая в предыдущих образцах была определена как аустенит, в данных образцах представлена уже четырьмя линиями, т.к. количество ГЦК фазы в образцах увеличилось. Параметр кристаллической решетки этой фазы также хорошо совпадает с параметром нитрида железа FeN_{0,076}, т.е. дифракционная картина анализируемых образцов характерна также и для нитрида железа. Таким образом, в данной ситуации дифрактометрическим методом затруднительна однозначная идентификация ГЦК фазы. Поэтому, был проведен анализ поверхности материалов методом электронной микроскопии. Однако, результаты не подтвердили наличия азота в приповерхностной области. Таким образом, вопрос об образовании нитридной фазы в данных образцах остается пока открытым.

Для многократной обработки также были определены размеры ОКР, показанные на рис. 6. Из рисунка видно, что размеры ОКР феррита незначительно уменьшаются с ростом количества импульсов, а размеры кристаллитов аустенита практически не изменяются.

Из таблицы видно, что содержание ГЦК фазы больше во второй серии образцов, в которой наибольшее содержание ГЦК приходится на образец № 2. Однако остается неясным вопрос, почему же в последующих образцах содержание ГЦК фазы уменьшается. Зависимость твердости от количества импульсов показана на рисунке 7.

Как видно, твердость образцов достигает некоторого значения в районе 4-5 ГПа при малом количестве импульсов, а затем с ростом импульсов начинает слабо падать. Таким образом, для данного материала нет смысла давать большое количество импульсов для достижения повышенной твердости.

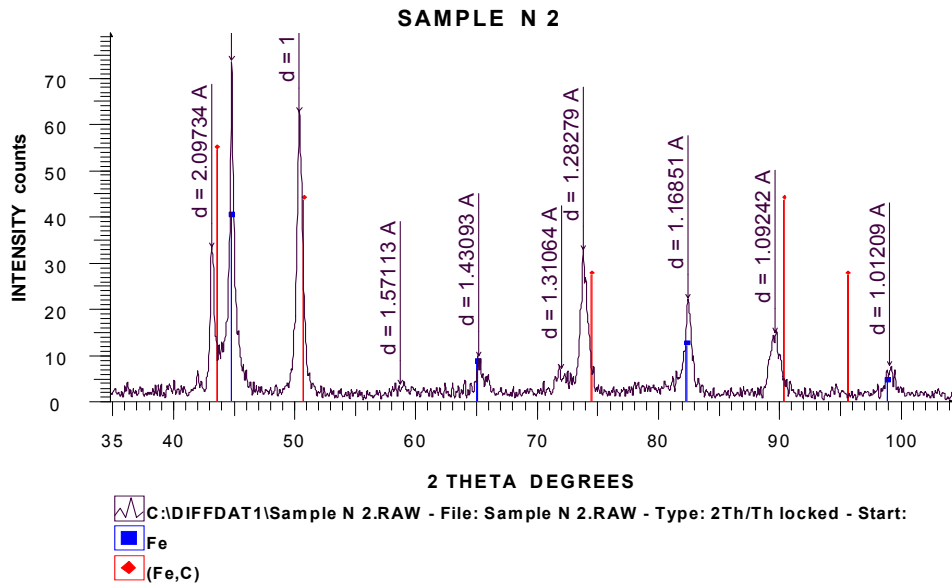


Рис.5. Рентгенограмма образца углеродистой стали, обработанного 10 импульсами

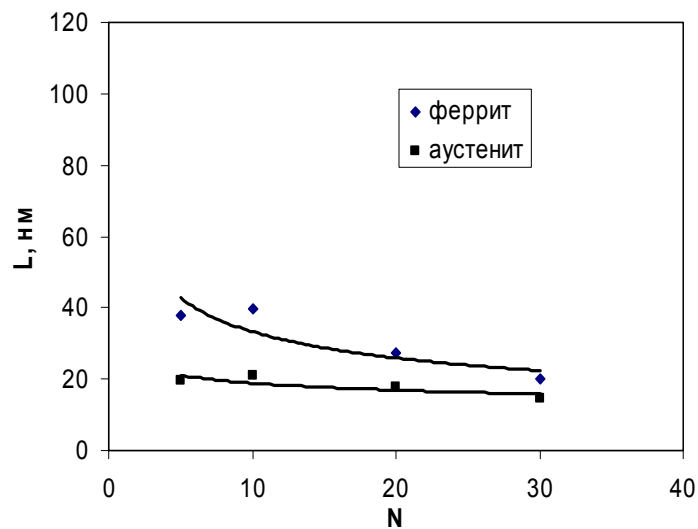


Рис.6. Зависимость размеров ОКР от количества импульсов

Таблица 2 Отношение интегральных интенсивностей

№ образцов	S (200) ГЦК / S (110) α-Fe
Однократно обработанные	
образец № 3	0,038
образец № 4	0,074
образец № 5	0,068
образец № 7	0,039
образец № 9	0,042
Множественно обработанные	
образец № 1 (5 импульсов)	0,527
Образец № 2 (10 импульсов)	1,02
Образец № 2 (20 импульсов)	0,764
Образец № 4 (30 импульсов)	0,268

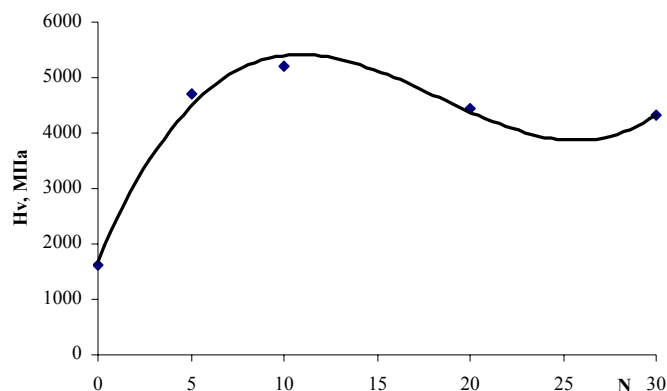


Рис.7. Зависимость микротвердости от количества импульсов

Таким образом, воздействие импульсных потоков плазмы в двух различных режимах однозначно приводит к упрочнению углеродистой стали. При этом, в обоих случаях в приповерхностной области формируются аустенитная (или нитридная) фаза с размерами ОКР 15-20 нм. Но эффект упрочнения, похоже, связан в основном с уменьшением размеров кристаллитов феррита, так как ярко выраженной зависимости твердости от размеров кристаллитов аустенита не наблюдается. С другой стороны, размеры ОКР аустенита слабо зависят как от плотности энергии, так и от количества импульсов. Скорее всего, эта фаза образуется в результате резкого остывания приповерхностного расплава во время обработки и далее ее содержание не изменяется. Очевидно, при многократной обработке увеличивается количество внедряемой дозы, и это должно приводить к формированию нитридной фазы, которая также является упрочняющей. Как известно, для формирования нитридной фазы в металлах требуются дозы 10^{16} - 10^{17} см⁻³. Импульсные пушки, в принципе, могут обеспечить такие дозы. Однако, в данном эксперименте использовалось достаточно низкое начальное давление газа 0,1 торр, при котором концентрация частиц в плазме составляет порядка 10^{12} см⁻³. В таком случае, для достижения требуемых доз необходимо делать сотни выстрелов, что достаточно сложно реализовать. Поэтому, можно сделать вывод, что в рассматриваемом эксперименте механизм упрочнения заключается в тепловом воздействии плазмы на приповерхностную область и формировании мелкодисперсной микрокристаллической структуры в результате остывания поверхности. Метод импульсной плазменной обработки представляет определенную перспективу для создания наноразмерных структур на поверхности металлов, при условии регулирования параметров плазмы.

Литература

1. Chebotarev V.V., Garkusha I.E., Langner J. etc. Surface structure changes induced by pulsed plasma streams processing // Problems of atomic science and technology. Series: Plasma physics. -1999. -№3(3).- V.4(4).- P.273-275.
2. Tereshin V.I., Bandura A.N., Bovda A.M. etc. Pulsed plasma accelerators of different gas ions for surface modification // Review of scientific instruments. -2002.-V. 73(2).- P.831-833.
3. Kazeev M.N.. High power ablative pulsed plasma flows for technology applications // Applied Physics. -2000.- №4.- P. 5-10.
4. Баимбетов Ф.Б., Ибраев Б.М., Жукешов А.М.. Обработка поверхности кремния импульсной азотной плазмой // Физика и техника полупроводников. -2002.- ч.36, №2.- С.137-138
5. Zhukeshov A.M., Gabdullina A. T., Amrenova A.U., Mukieva A.Z.. Changes of structure and surface properties of metal alloys after pulsed plasma processing // Изв. Вузов. Физика. -2006, №8, Приложение. -С. 361-362.

6. Ibraev B.M. Peculiarities of the generation of a plasmoid in a pulsed coaxial accelerator // J. of Engineering Thermophysics. -2005.-V. 12, N2. -P. 183-190.

7. Baimbetov F.B, Zhukeshov A.M., Amrenova A.U. Dynamics of Plasma Flow Formation in a Pulsed Accelerator Operating at a Constant Pressure // Technical Physics Letters. -2007.- V.33, №1, -P. 77–79.

ИМПУЛЬСТІК ПЛАЗМА АҒЫНДАРЫНЫҢ ӘСЕРІНЕН МЕТАЛЛ БЕТІНІҢ ҚҰРЫЛЫМДАНУЫ

Ә.М. Жүкешов, А.Т. Габдуллина, С.П. Пак, Ә.У. Әміренова

Жұмыста темір негізінде материалдарға жоғары температуралы импульсті плазма ағындардың әсерінен пайда болатын микроқұрылымдар эксперименталды нәтижелермен салыстырылған. Плазманың әсерінен модификациаланған қабатта пайда болған микроструктураның размері табылған. Оның микроқаттылыққа әсері зерттеліп, екі режимде өңдеу салыстырып сараптама жасалған.

THE STRUCTURIZATION OF METALS SURFACE UNDER INFLUENCE OF PULSE PLASMA FLOWS

A.M. Zhukeshov, A.T.Gabdullina, S.P.Pak, A.U.Amrenova

The phase structure of a carbon steel surface, modified by plasma processing in various modes, by the X-ray analysis method is investigated. The modes of unitary and repeated influence by pulse flows of plasma are used. The influence of the sizes of dispersion coherent areas belonging to various phases, on microhardness of steel is investigated. It is shown, that the hardness of the processed steel increases proportionally to decreasing of the ferrite crystallite sizes at unitary influence. At repeated influence the greatest ratio of the modified phase contains in a sample subjected 10 multiple processing. As a result of updating structure of metal are formed crystalline with the sizes 10-20 nm.