

УДК 621.658.012.531

© Чабак Ю.Г.¹, Федун В.И.², Ефременко Б.В.³,
Зурнаджи В.И.⁴, Джеренова А.В.⁵, Волосенко И.А.⁶**ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА КАТОДА И РЕЖИМОВ ИМПУЛЬСНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ВЫСОКОХРОМИСТОГО ЧУГУНА**

В статье представлен анализ влияния режимов импульсно-плазменной обработки на особенности формирования микроструктуры и твердость поверхности чугуна с высоким содержанием хрома. Рассмотрена возможность применения различных материалов в качестве катода, систематизированы полученные экспериментальные данные, показана перспективность использования данной технологии, указаны ее недостатки.

Ключевые слова: плазма, катод, чугун, микротвердость покрытия.

Чабак Ю.Г., Федун В.И., Ефременко Б.В., Зурнаджи В.И., Джеренова А.В., Волосенко И.О. Вплив матеріалу катода і режимів імпульсно-плазмової обробки на микроструктуру і мікротвердість поверхні високохромистого чавуну. У статті проаналізовано вплив режимів імпульсно-плазмової обробки на особливості формування микроструктури та твердість поверхні чавуну з високим змістом хрому. Розглянуто можливість застосування різних матеріалів в якості катода, систематизовано отримані експериментальні дані, показана перспективність використання даної технології, вказані її недоліки.

Ключові слова: плазма, катод, чавун, мікротвердість, покриття.

Yu.G. Chabak, V.I. Fedun, B.V. Efremenko, V.I. Zurnadzhy, A.V. Dzherenova, I.O. Volosenko. Cathode material and pulsed plasma treatment influence on the microstructure and microhardness of high-chromium cast iron surface. The article presents an analysis of the cathode material and the pulse plasma treatment mode influence on the surface microstructure and microhardness of high chrome (15% Cr) cast iron. The methods of metallographic analysis and microhardness measurements were used. It has been shown that pulsed plasma treatment at 4 kV voltage with the use of the electro-axial thermal accelerator results in surface modification with high microhardness 950-1050 HV₅₀, and in the formation of the coating due to the transfer of the electrodes material. The specific features of using different cathode materials have been systematized. It has been found that graphite electrodes are not recommended to be used due to their low strength and fracture under plasma pulses. In case of using tungsten cathode a coating of small thickness (20-30 microns) and having cracks has been formed on the specimen surface. The most expedient is to apply the electrodes with low melting point (such as killed St.3), which provides a high-quality state of treated surface and formation the protective crack-free coating of 80-100 microns thick. It has been found that as a result of the plasma pulsed treatment the enrichment of coating with carbon is likely to occur that results in microhardness increase. The prospects of this technology as well as its shortcomings have been described.

Keywords: plasma, cathode, cast iron, microhardness, coating.

¹ канд. техн. наук, ст. преп., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, julia.chabak@yandex.ua

² ст. преп., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

³ аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

⁴ аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

⁵ ст. преп., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

⁶ студент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

Постановка проблемы и анализ последних исследований и публикаций. Импульсно-плазменная обработка сопровождается поверхностным упрочнением стальных поверхностей за счет модифицирующего воздействия и нанесения покрытия [1-3]. Модификация поверхности является следствием скоростной закалки при плазменном воздействии, упрочняющего воздействия плазменной струи, радиационно-стимулированной диффузии атомов поверхности вглубь основы [4, 5]. На модифицированном слое возникает покрытие, состоящее из атомов веществ, присутствующих в зоне действия высокоточного разряда, а именно: газов в составе воздуха (если обработка проводится в воздушной среде), электродов и внутренней поверхности камеры ускорителя. Импульсно-плазменную обработку проводят с применением различных плазмообразующих устройств, среди которых выделяется электротермический аксиальный плазменный ускоритель (ЭАПУ) [6-8]. При импульсной обработке с помощью ЭАПУ в формировании покрытия материал электродов играет важную роль. Особенно это относится к материалу катода. Катод находится внутри камеры ускорителя, а поэтому его поверхность разогревается до более высокой температуры по сравнению с анодом, который расположен с торца камеры и контактирует с внешней средой. Следовательно, катод испытывает больший нагрев, то есть испаряется и оплавляется в большей степени, чем анод.

Обычно в технологиях плазменной обработки в плазмотроне (плазменном ускорителе) используются катоды из материала с высокой температурой плавления – вольфрама ($t_{пл}=3422^{\circ}\text{C}$) или молибдена ($t_{пл}=2623^{\circ}\text{C}$) [9-11]. Известно также применение графитовых электродов ($t_{пл} \sim 3700^{\circ}\text{C}$) при поверхностной обработке электрической дугой [12]. Применение тугоплавких материалов вызвано необходимостью увеличить срок службы электродов, поскольку в процессе генерирования плазмы они нагреваются и подвергаются испарению (оплавлению), следовательно, теряют вещество (эродируют). В связи с этим в данной работе были использованы традиционные виды электродов - графитовый и вольфрамовый. Кроме того, опробовали стальной катод с более низкой температурой плавления (сталь СтЗсп – $t_{пл} \sim 1400^{\circ}\text{C}$). Предполагалось, что применение более легкоплавкого электрода сможет облегчить получение напыленного слоя повышенной толщины на обрабатываемой поверхности. С учетом этого представляло интерес оценить, как влияет материал катода на микроструктуру и свойства плазменного покрытия на высокохромистом чугуне.

Цель работы. Исследовать характер поверхностных слоев, полученных на высокохромистом чугуне импульсно-плазменной обработкой с применением различных материалов катода.

Изложение основного материала. В качестве материала исследований использовали чугун, содержащий 2,70% Cr; 1,32% Si; 3,96% Mn; 0,21% Ni; 0,04% V; 0,10% Ti. Чугун выплавляли в 160-кг индукционной печи и заливали в песчаные формы с получением дробебетных лопастей. Образцы для исследований были отрезаны от лопасти абразивным кругом и шлифованы в нужный размер – $10 \times 10 \times 25$ мм. После этого образцы подвергли отжигу при 650°C в течение 10 ч. В исходном (до импульсно-плазменной обработки) состоянии чугун имел микроструктуру, состоящую из карбидной эвтектики и металлической матрицы. Матрица в дендритах и внутри эвтектических колоний представлена мелкопластинчатым перлитом с микротвердостью 400-450 HV₅₀, микротвердость карбидной эвтектики составляет 540-660 HV₅₀.

Для плазменной обработки в данной работе был использован ЭАПУ, конструкция и принцип работы которого подробно описан в статьях [6-8]. Разрядная камера представляет собой бумажно-бакелитовую трубу, обжатую с двух сторон стальными оболочками. По оси трубы располагается канал диаметром 8 мм, в который вставляется катод – стержень диаметром 5 мм. Одна из внешних оболочек служит анодом. Источником питания ускорителя служит емкостной накопитель энергии емкостью 10 мкФ. На электроды ускорителя подается разность потенциалов в 2-5 кВ, что порождает сильноточный (до 10 кА) разряд внутри камеры ускорителя. Время действия разряда – около 1 мс. Во время горения разряда в камере резко повышается температура (до 10 тыс. К [6]). Это приводит к испарению (расплавлению) веществ, присутствующих внутри камеры (включая поверхность электродов и камеры), с последующей ионизацией атомов и образованием плазмы. Микрокапли, попадая в поток плазмы, переносятся на обрабатываемую поверхность. Импульсно-плазменную обработку проводили при следующих параметрах: накапливаемое напряжение – 4 кВ; расстояние между электродами – 50 мм; амплитуда тока – 10 кА. Катодом служили стержни из разного материала: графита, вольфрама, стали СтЗсп

(ГОСТ 27772-88). Обработку проводили в среде воздуха с выполнением от 3 до 18 импульсов; интервал между импульсами составлял 3 мин (время, необходимое для зарядки накопительного конденсатора). Микроструктуру исследовали на поперечных микрошлифах, подготовленных согласно стандартной процедуре и протравленных 4%-м раствором азотной кислоты в этиловом спирте. При исследованиях использовали оптический микроскоп Neophot при увеличении до 500 раз. Микротвердость измеряли на микротвердомере Novotest при нагрузке 50 г.

Обработка графитовым катодом. В проведенных ранее исследованиях [13, 14] было установлено, что эффективное упрочнение поверхности стальных изделий достигается при напряжении, подаваемом на электроды ЭАПУ, равном 4 кВ. Поэтому обработку чугуна с графитовым электродом первоначально проводили при 4 кВ. Однако при таком напряжении после графитовый электрод разрушался первого же импульса из-за того, что ввиду своей низкой прочности не выдерживал давления в камере ускорителя. В связи с этим пришлось понизить напряжение до 2 кВ, увеличив при этом количество импульсов. Применили два режима обработки с девятью и восемнадцатью импульсами. В результате девяти импульсов на поверхности возник слаботравящийся «белый» слой неоднородной толщины (не более 15 мкм), с разрывами (рис. 1). Предположительно, это модифицированный слой чугуна, в котором произошла скоростная закалка, и структура изменилась с перлитной на мартенситную. В пределах «белого» слоя хромистые карбиды не выявляются; это говорит о том, что в процессе нагрева произошло растворение части карбидов, что насытило матрицу хромом и повысило ее устойчивость к травлению. В связи с малой толщиной «белого» слоя измерить его микротвердость не удалось.

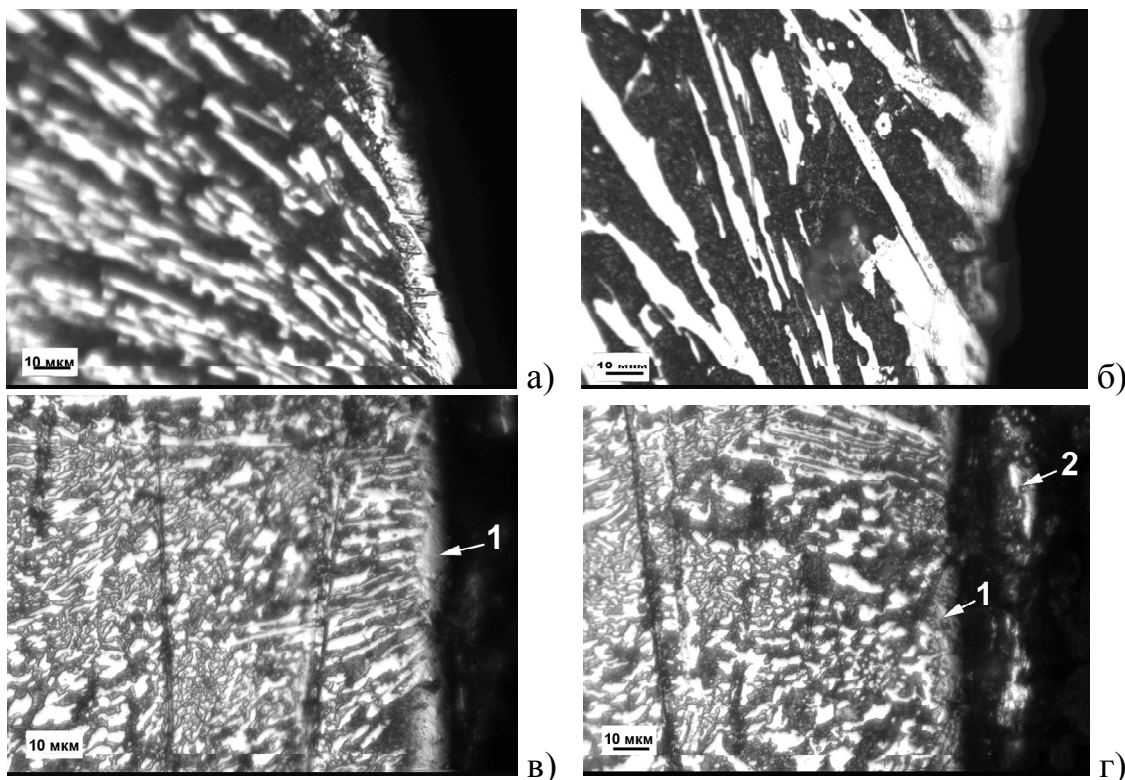


Рис. 1 – Микроструктура поверхности чугуна, обработанной при напряжении 2 кВ графитовым катодом: а, б – 9 импульсов; в, г – 18 импульсов

В результате применения 18-ти импульсов существенных изменений в толщине слоя не произошло, однако слой стал более равномерным с меньшим количеством разрывов (цифра 1 на рис. 1). В тех случаях, когда в слое наблюдались разрывы, вместо слоя на поверхности присутствовал слой бронзы (цифра 2). Появление бронзы в покрытии объясняется тем, что ввиду высокого электросопротивления графита дуга смещалась внутри ускорителя от поверхности катода к бронзовому креплению катода. Оплавление крепления способствовало переносу микрокапель на поверхность чугуна с формированием покрытия толщиной до 30 мкм.

Обработка вольфрамовым катодом. На рис. 2 представлены фотографии микроструктуры чугуна, сформированной в результате импульсно-плазменной обработки с применением вольфрамового катода. Обработку проводили при повышенном напряжении (4 кВ), используя три и шесть импульсов. Как видно, вольфрамовый катод обеспечил более эффективное модифицирование чугуна, чем графитовый катод. В результате обработки тремя импульсами (рис. 2, а) на поверхности сформировался «белый» слой различной толщины – от 10 до 20 мкм. Слой по-прежнему был несплошной, его границы с внешней стороны имели неровные края, которые отражали характер переноса и закрепления на поверхности микрокапель материала электродов. Кроме того, в слое наблюдались трещины, которые распространялись от модифицированного слоя вглубь образца. Увеличение количества импульсов до шести привело к некоторому увеличению толщины «белого» слоя и повышению однородности покрытия (с устранением разрывов) (рис. 2, б). На отдельных участках поверхности присутствовали крупные глобулы напыленного металла. Поскольку вольфрам обладает высокой температурой плавления, можно предположить, что глобулы представляют собой микрокапли, возникшие при оплавлении поверхности стальной оболочки (анода) в момент разряда внутри ускорителя. Эти капли были перенесены на поверхность чугуна плазменным потоком. Между «белым слоем» и основой отсутствует четкая граница, а в пределах слоя и глобулей покрытия не наблюдаются каких-либо элементы микроструктуры.

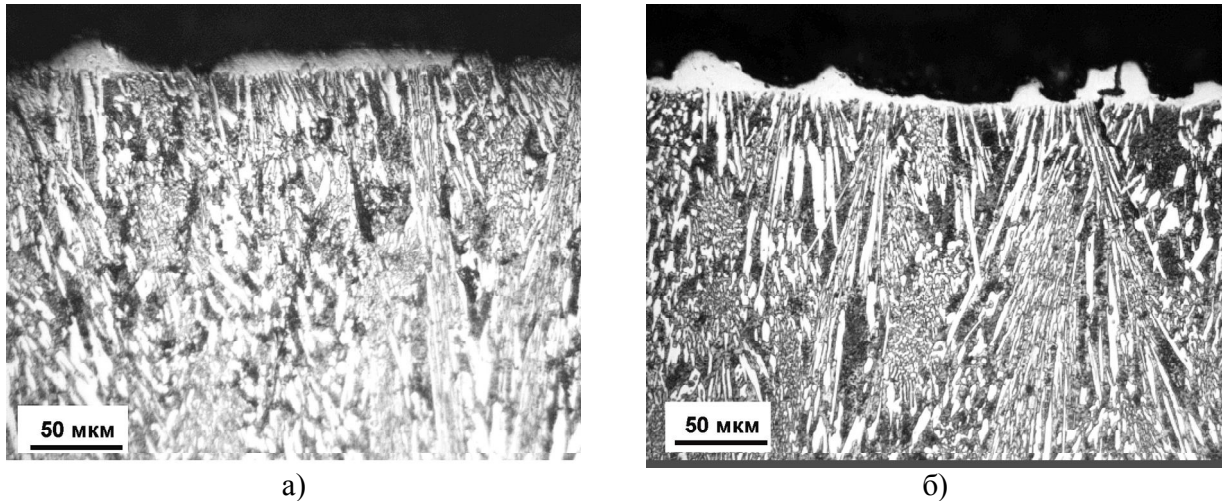


Рис. 2 – Микроструктура поверхности чугуна, обработанной вольфрамовым катодом при напряжении 4 кВ: а – 3 импульса; б – 6 импульсов

Обработка стальным катодом. Применение стального катода (СтЗсп) осуществляли в три и шесть импульсов при напряжении 4 кВ. Как следует из рис. 3, переход к стальному катоду существенно изменил характер поверхности чугуна в сторону резкого увеличения толщины «белого» слоя. Уже после трех импульсов на поверхности возник достаточно толстый (50-60 мкм) сплошной «белый» слой, который хорошо выявляется даже при минимальном увеличении (100 крат) (рис. 3, а). Граница между слоем и основой отсутствует, карбиды основы как бы «растворяются» в покрытии. Трещины в слое присутствуют лишь в отдельных местах. При большом увеличении видно, что внешний слой покрытия (примерно 2/3 толщины) травится более сильно, чем слой, прилегающий непосредственно к основе, то есть покрытие неоднородно по толщине.

Увеличение количества импульсов до шести привело к росту толщины «белого» слоя до 70-95 мкм (рис. 3, б), при этом слой выровнялся по толщине. Слой имеет неоднородную структуру с чередованием белых и темных участков (полос, сегментов), ориентированных вдоль поверхности. В некоторых местах в темных полосах видна структура, напоминающая игольчатый мартенсит на фоне остаточного аустенита. Следует отметить, что в покрытии отсутствуют трещины и четкая граница между напыленным слоем и чугуном, что указывает на прочную металлургическую связь между покрытием и основой.

Микротвердність покриття. На рис. 4 представлено розподілення микротвердості по сеченню образцов, оброблених шістьма плазменними імпульсами. Из цього рисунка следует, в случае применения вольфрамового катода микротвердність «білого» слоя у самій поверхності (10-15 мкм) складає 580-670 HV₅₀. На глибині ~20 мкм микротвердність підвищується до 870-900 HV₅₀, після чого починає знижуватися вглубь образца. На глибині свйше 30 мкм микротвердність і стабілізується на рівні 550-645 HV₅₀. В случае использования сталльного катода микротвердність поверхностного слоя коливається в межах 620-914 HV₅₀ (со середнім значенням 800 HV₅₀). Найбільше твердий являється нетравлящая зона шириной до 10 мкм в межах «білого» слоя, непосредственно прилегающая к границе с основой: здесь микротвердність підвищена до 942-1047 HV₅₀. За межами цієї зони в основі твердність складає 599 до 707 HV₅₀, что соответствует исходной микротвердності чугуна.

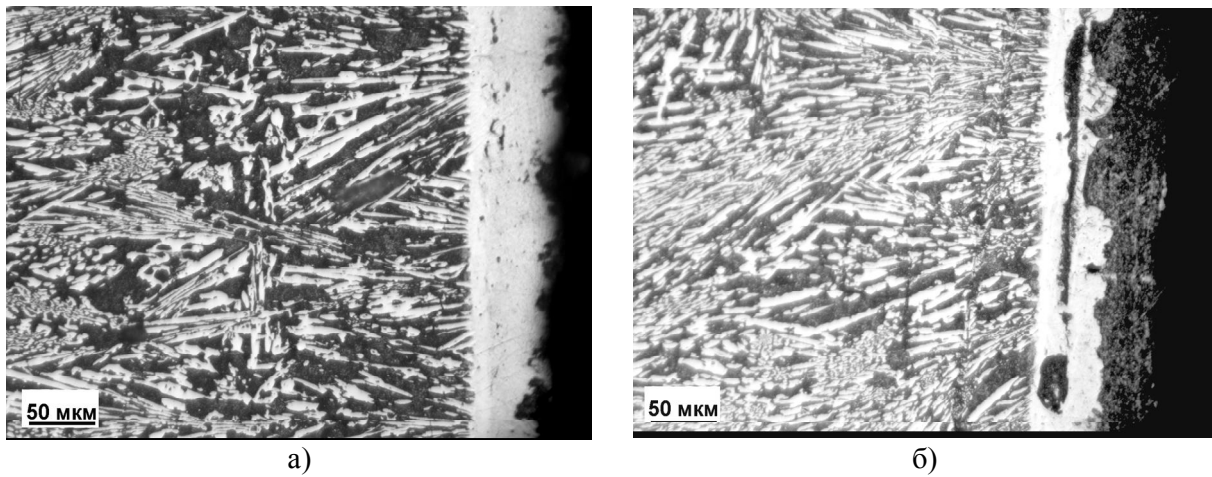


Рис. 3 – Микроструктура поверхності чугуна, обробленої сталльним (СтЗсп) катодом при напрузженні 4 кВ: а – 3 імпульсов; б – 6 імпульсов

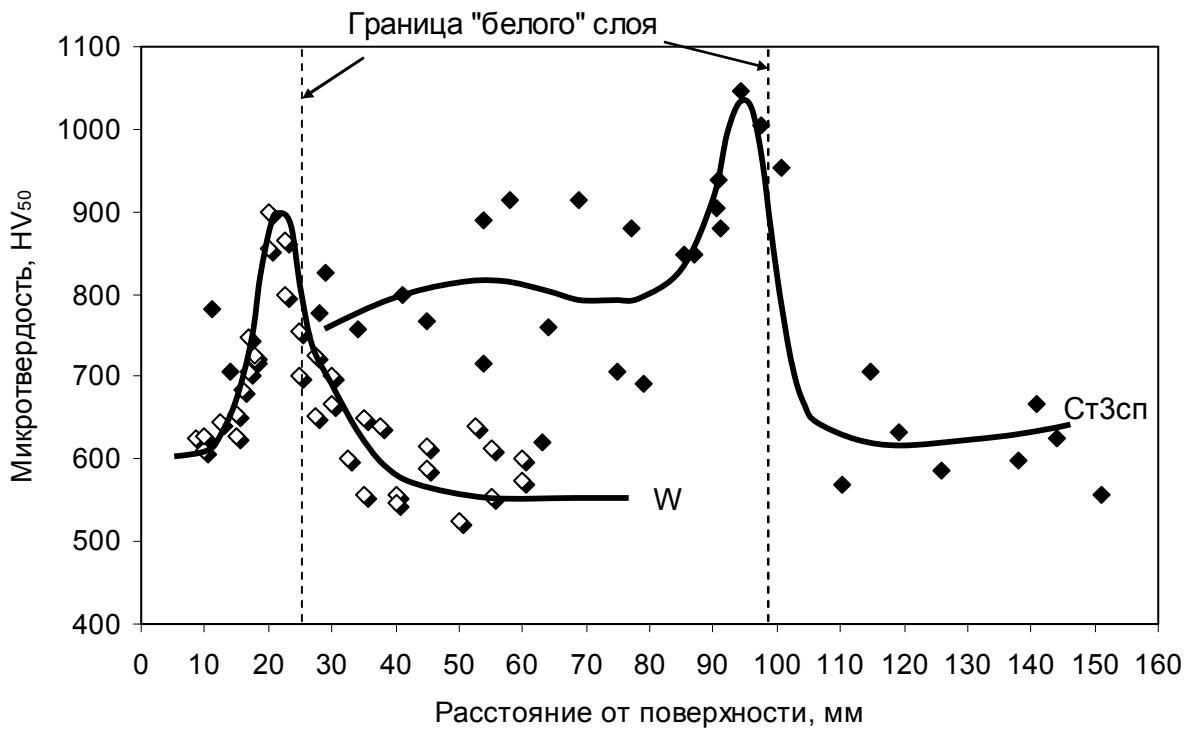


Рис. 4 – Розподілення микротвердності по сеченню чугуна, обробленого вольфрамовим і сталльним катодами (6 імпульсов)

Обращает на себя внимание неожиданно высокий уровень микротвердости покрытия, сформированного стальным электродом. Поскольку анод и катод (сталь СтЗсп) изготовлены из низкоуглеродистых сталей (содержащих не более 0,25% С), твердость покрытия в закаленном состоянии не должна превышать 420-430 HV. В действительности же она составила 700-900 HV₅₀, что соответствует в 2-3 раза более высокому содержанию углерода (0,50-0,80% С), чем в стали СтЗсп. Это позволяет предположить, что в процессе формирования плазмы произошло обогащение переносимого вещества элементами, образующими твердый раствор внедрения в решетке альфа-железа (С, N, О, Н). Источником этих атомов могут служить воздух внутри камеры плазменного ускорителя, а также композит «бумага-бакелит», из которого изготовлена сама камера. В момент действия электрического разряда происходит испарение поверхности бумаги, и атомы углерода (основного компонента целлюлозы) попадают в плазму, насыщая микрокапли стали. Таким образом, в результате плазменной обработки на поверхности сформировалось покрытие из стали с повышенным содержанием примесных атомов, в котором возникли сильные искажения кристаллической решетки в результате закалки из жидкого состояния.

Покрытие, полученное обработкой стальным катодом, имеет неоднородное строение: для него характерно более темная окраска наружных слоев и светлая окраска внутренних. Можно предположить, что внутренние слои покрытия сформировались при первых импульсах в условиях больших скоростей нагрева и охлаждения, в условиях высокой степени перегрева и высоких напряжений, что резко измельчило кристаллы, увеличило плотность дефектов и обеспечило получение состояния с сильно искаженной решеткой, близкое к аморфному. Это привело к низкой травимости этих слоев. При последующих импульсах покрытие формировалось в условиях меньших степеней перегрева (поскольку в покрытии сохранялось тепло от предыдущих импульсов); при охлаждении в нем формировался мартенсит, различимый в оптический микроскоп (с большей травимостью). Кроме того, в наружных слоях, очевидно, проходил отпуск с выделением дисперсных карбидов, что дополнительно усилило травимость наружных слоев. Несмотря на отпуск, эти слои сохранили достаточно высокую микротвердость.

Выводы

1. Импульсная плазменная обработка с применением электротермического аксиального ускорителя при напряжении 4 кВ обеспечивает модифицирование поверхности высокохромистого чугуна с достижением микротвердости 950-1050 HV₅₀, а также приводит к формированию покрытия за счет переноса вещества электродов плазменной струей.
2. При использовании импульсно-плазменной обработки не рекомендуется применять графитовые электроды ввиду их низкой прочности и разрушения при импульсах. В случае использования вольфрамового катода формируется покрытие небольшой толщины (20-30 мкм), имеющее трещины. Наиболее целесообразно использовать электроды с пониженной температурой плавления (например, из стали СтЗсп), что обеспечивает более качественное состояние обработанной поверхности и нанесение толстого защитного покрытия (80-100 мкм) без трещин.
3. В процессе обработки катодом из стали СтЗсп на чугуне формируется поверхностный слой с высокой микротвердостью (700-900 HV₅₀). Это указывает на повышение концентрации примесных атомов (углерода, азота и др.) в покрытии за счет насыщения плазмы атомами веществ, присутствующих в зоне электрического разряда.

Список использованных источников:

1. Pulsed plasma treatment of Ti-Al coatings produced by mechanical alloying method / S. Romankov [et al.] // *Materials Letters*. – 2007. – Vol. 26 № 30. – P. 5288-5291.
2. Espallargas N. Dry wear and tribocorrosion mechanisms of pulse plasma nitrided Ni-Cr alloy / N. Espallargas, S. Mischler // *Wear*. – Vol. 270 № 7-8. – 2011. – P. 464-471.
3. Deposition and characterization of Al₂O₃ coatings by multi-chamber gas-dynamic accelerator / M. Kovaleva [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 2013. – № 232. – P. 719-725.
4. The influence of plasma surface modification process on the structure and phase composition of cutting-tool hardmetals / S.S. Samotugin [et al.] // *Journal of Superhard Materials*. – 2011. – № 33. – P. 200-207.

5. Mohd Idris Shah Ismail. Surface hardening of tool steel by plasma arc with multiple passes / Idris Shah Ismail Mohd, Taha Zahari // *International Journal of Technology*. – 2014. – № 1. – P. 79-87.
6. Formation mechanism of the metallic nanostructures using pulsed axial electrothermal plasma accelerator / Yu.E. Kolyada [et al.] // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Plasma Electronics and New Acceleration Methods»*. – 2013. – № 4(86). – P. 297-300.
7. Kolyada Yu.E. Pulse electrothermal plasma accelerators and its application in scientific researches / Yu.E. Kolyada, V.I. Fedun // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Plasma Electronics and New Acceleration Methods»*. – 2015. – № 4. – P. 325-330.
8. Pulse electrothermal plasma accelerators and its application in the technologies / Yu.E. Kolyada [et al.] // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Plasma Electronics and New Acceleration Methods»*. – 2015. – № 4. – P. 319-324.
9. Properties, Peculiarities and Applications of Powder Coatings Formed by Multi-Chamber Detonation Sprayer / N.J. Vasilik [et al.] // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – № 67. – P. 179-184.
10. Özbek Y.Y. Surface behavior of AISI 4140 modified with pulsed-plasma technique / Y.Y. Özbek, M. Durman // *Materiali in tehnologije (Materials and technology)*. – 2015. – № 49(3). – P. 441-445.
11. Pierson H.O. Handbook of Refractory Carbides & Nitrides: Properties, Characteristics, Processing and Applications / H.O. Pierson. – Noyes Publications, 1996. – 340 p.
12. Алимов В.И. Влияние характеристик материала углеродистых электродов на процессы при упрочнении стальных изделий дуговым разрядом / В.И. Алимов, В.Н. Крымов // *Наукові праці ДонНТУ. Металургія*. – № 9(122). – 2007. – С. 212-217.
13. Влияние параметров импульсно-плазменной обработки на структурообразование и свойства стали 40Х / А.П. Чейлях [и др.] // *Строительство, материаловедение, машиностроение : Сб. науч. тр.* – 2014. – № 73. – С. 235-239.
14. Структура и свойства стали 40Х после импульсно-плазменной обработки с использованием титанового электрода / А.П. Чейлях [и др.] // *Science and Education a New Dimension : Natural and Technical Science*. – 2013. – № 8. – С. 79-84.

Bibliography:

1. Pulsed plasma treatment of Ti-Al coatings produced by mechanical alloying method / S. Romankov [et al.] // *Materials Letters*. – 2007. – Vol. 26 № 30. – P. 5288-5291.
2. Espallargas N. Dry wear and tribocorrosion mechanisms of pulse plasma nitrided Ni-Cr alloy / N. Espallargas, S. Mischler // *Wear*. – Vol. 270 № 7-8. – 2011. – P. 464-471.
3. Deposition and characterization of Al₂O₃ coatings by multi-chamber gas-dynamic accelerator / M. Kovaleva [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 2013. – № 232. – P. 719-725.
4. The influence of plasma surface modification process on the structure and phase composition of cutting-tool hardmetals / S.S. Samotugin [et al.] // *Journal of Superhard Materials*. – 2011. – № 33. – P. 200-207.
5. Mohd Idris Shah Ismail. Surface hardening of tool steel by plasma arc with multiple passes / Idris Shah Ismail Mohd, Taha Zahari // *International Journal of Technology*. – 2014. – № 1. – P. 79-87.
6. Formation mechanism of the metallic nanostructures using pulsed axial electrothermal plasma accelerator / Yu.E. Kolyada [et al.] // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Plasma Electronics and New Acceleration Methods»*. – 2013. – № 4(86). – P. 297-300.
7. Kolyada Yu.E. Pulse electrothermal plasma accelerators and its application in scientific researches / Yu.E. Kolyada, V.I. Fedun // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Plasma Electronics and New Acceleration Methods»*. – 2015. – № 4. – P. 325-330.
8. Pulse electrothermal plasma accelerators and its application in the technologies / Yu.E. Kolyada [et al.] // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Plasma Electronics and New Acceleration Methods»*. – 2015. – № 4. – P. 319-324.
9. Properties, Peculiarities and Applications of Powder Coatings Formed by Multi-Chamber Detonation Sprayer / N.J. Vasilik [et al.] // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – № 67. – P. 179-184.
10. Özbek Y.Y. Surface behavior of AISI 4140 modified with pulsed-plasma technique / Y.Y. Özbek, M. Durman // *Materiali in tehnologije (Materials and technology)*. – 2015. – № 49(3). – P. 441-445.
11. Pierson H.O. Handbook of Refractory Carbides & Nitrides: Properties, Characteristics, Processing and Applications / H.O. Pierson. – Noyes Publications, 1996. – 340 p.
12. Alimov V.I. Influence of the characteristics of graphitized carbon electrodes' material on the

- processes at hardening of steel products by the arc discharge / V.I. Alimov, V.N. Krymov // Scientific works of DonNTU. Metallurgy. – 2007. – № 9(122). – P. 212-217. (Rus.)
13. Effect of pulsed plasma treatment's parameters on the structure and properties of steel 40Cr / A.P. Cheyliah [et al.] // Construction, materials engineering, mechanical engineering : Collection of scientific works. – 2014. – № 73. – P. 235-239. (Rus.)
14. The structure and properties of steel 40Cr after pulsed plasma treatment using titanium electrode / A.P. Cheylyah [et al.] // Science and Education a New Dimension: Natural and Technical Science. – 2013. – № 8. – P. 79-84. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ЛГТУ»

Статья поступила 25.05.2016