

Существенно изменяется и нагрузочная способность колец пары трения от концентрации абразива. Так, если контактная пара трения работает в воде с содержанием абразива до 1%, то ее нагрузочная способность достигает $p_{уд}=1,2$ МПа (рисунок 7). С повышением концентрации абразива нагрузочная способность пары трения снижается. Наличие абразива в жидкости до 10% снижает допустимую нагрузку на контакт почти в два раза. Диапазон допустимой нагрузки определяется относительной стабильностью наименьшей величины коэффициента трения. Скачкообразное увеличение коэффициента трения сопровождается схватыванием материала контактных поверхностей и интенсивным износом колец пар трения.

УДК 621.785.5

КОМПЛЕКСНАЯ ОБРАБОТКА КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ

В. С. Капленко, С. И. Багаев, И. Л. Поболь

Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Введение.

В медицинской отрасли используется большая номенклатура инструментов, изделий и приспособлений, для изготовления которых применяются высоколегированные стали аустенитного класса (AISI 347, AISI 316L, AISI 304, 12X18H10T и др.). Эти стали хорошо ведут себя в среде биологических жидкостей и тканей [1].

В зависимости от назначения к инструментам и изделиям, имплантируемым в биологическую ткань, предъявляются различные прочностные требования. Например, использование спицы Киршнера, изготавливаемой из проволоки, затруднено при ее введении в биологическую ткань ввиду высокой пластичности и низкой упругости материала импланта. Режущая кромка спицы при вводе быстро тупится из-за низкой твердости материала. Решение этой проблемы возможно с применением методов инженерии поверхности.

Возрастающие требования к качеству инструментов и изделий делают необходимым применение современных технологий обработки, направленных на повышение качества поверхности и прочностных свойств материалов. Ионно-плазменное азотирование (ИПА) является современным высокоэффективным технологическим процессом упрочнения поверхности различных сталей, включая высокохромистые материалы [2]. В соответствии с исследованиями авторов [3], низкотемпературное ИПА (350–400 °С) позволяет формировать плотные упрочнённые слои на поверхности стали AISI 304.

Известно, что ИПА может снизить коррозионную стойкость поверхности стали аустенитного класса [3]. Причина этого заключается в распылении тлеющим разрядом частиц со стен камеры, оснастки и других азотируемых элементов и осаждении их на обрабатываемую поверхность. ИПА, особенно при вы-

соких температурах, имеет тенденцию отрицательно влиять на антикоррозионные свойства нержавеющей стали из-за образования нитрида хрома CrN, который выводит хром из твердого раствора или из-за образования на поверхности нитридов железа.

В работе выполнено исследование возможности очистки поверхности и восстановления антикоррозионных свойств материала с использованием метода электролитно-плазменной полировки (ЭПП).

Материалы, оборудование, методики исследований

Объектом исследования является заготовка спицы Киршнера длиной 300 мм и диаметром 2 мм из стали AISI 347 (таблица 1). Они широко используются в ортопедии и других видах медицинской и ветеринарной хирургии.

Таблица 1 – Химический состав в стали AISI 347, мас. %

C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S	Fe
< 0,08	17,0–19,0	9,0–13,0	< 2,0	< 1,0	< 0,045	< 0,03	остальное

Спицы относятся к погружным металлоконструкциям в травматологии. К качеству их поверхности предъявляют жесткие требования. Параметр шероховатости таких изделий не должен превышать Ra 0,63 мкм [4].

В качестве образцов-свидетелей использовались фрагменты спицы длиной 30 мм для изучения всех этапов комплексной обработки.

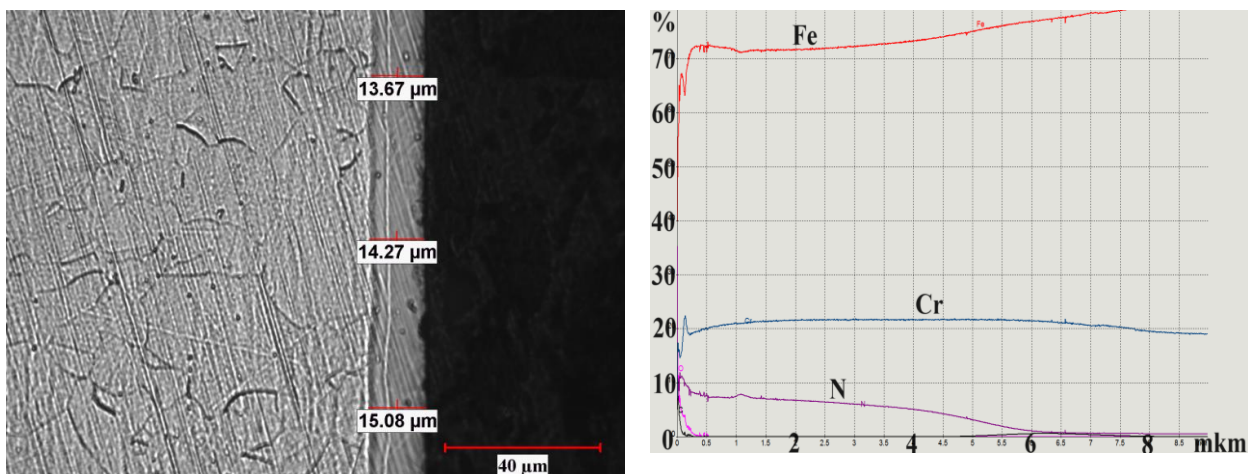
Элементный анализ проводили на оптическом эмиссионном спектрометре тлеющего разряда Horiba Profiler 2 (Франция). Шероховатость поверхности определяли с помощью профилометра Mitutoyo SurfTest SV-2100 (Япония). Исследования электрохимических свойств поверхности проводили на потенциостате/гальваностате Multi Autolab/M204 (Нидерланды) методом линейной поляризации в 10 %-ном растворе NaCl комнатной температуры в трёхэлектродной ячейке с электродом сравнения Ag/AgCl/KCl и вспомогательным платиновым электродом.

Из обработанных образцов-свидетелей изготовлены поперечные шлифы. Металлографические исследования микроструктуры выполняли на оптическом микроскопе МИ-1, микродюрOMETрические – на микротвердомере AFFRI-MVDM8 с нагрузкой на индентор 100 г. Процесс ЭПП образцов проводили на установке ЭИП-100 производства ФТИ НАН Беларуси при постоянном напряжении 320 В и температуре электролита 85 °С в течение 30, 45 и 60 с. В качестве электролита использовали 5 %-ный раствор сульфата аммония.

Травление поверхности шлифов проводили реактивом Марбле – сульфат меди CuSO₄ (20 г), соляная кислота HCl (100 мл), дистиллированная вода (100 мл).

Экспериментальные исследования

ИПА проводили в установке колпакового типа с «холодными стенками» производства ФТИ НАН Беларуси. Учитывая имеющийся опыт азотирования высокохромистых сталей, был выбран оптимальный режим обработки [2]. Температура азотирования образцов-свидетелей из стали AISI 347 составляла 400 °С, время выдержки 16 ч. В качестве рабочей среды использована смесь газов N₂+H₂+Ar.



№ 1

Рисунок 1 – Микроструктура и результаты элементного анализа по глубине образца-свидетеля № 1 из стали AISI 347 после ИПА

Поверхностный слой образцов после проведения ИПА состоит из нитридного слоя, состоящего из смеси нитридов $Fe_{2-4}N$ и $Cr_{1-2}N$ (рисунок 1). Под нитридным слоем располагается тонкая гетерофазная зона, состоящая из азотистого аустенита (γ -фаза) с включениями нитрида $Cr_{1-2}N$. В аустените выделения частиц нитридов практически отсутствуют, что способствует сохранению достаточного запаса пластичности слоя.

После ИПА образцов-свидетелей поверхность теряет яркий металлический блеск и приобретает серый цвет. Шероховатость повышается с $Ra\ 0,05\ \mu m$ до $Ra\ 0,15\ \mu m$ (таблица 2).

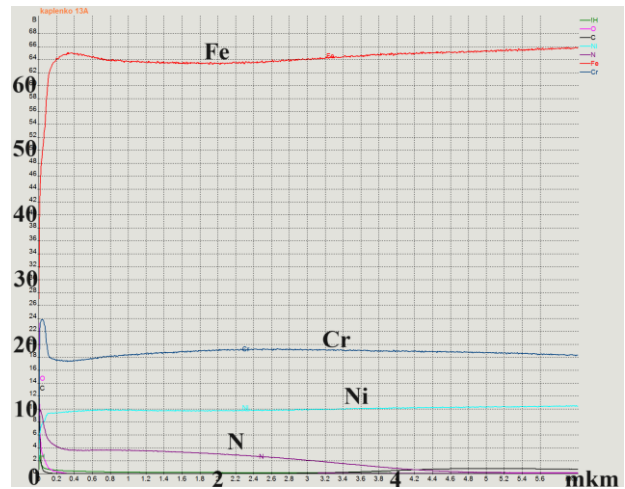
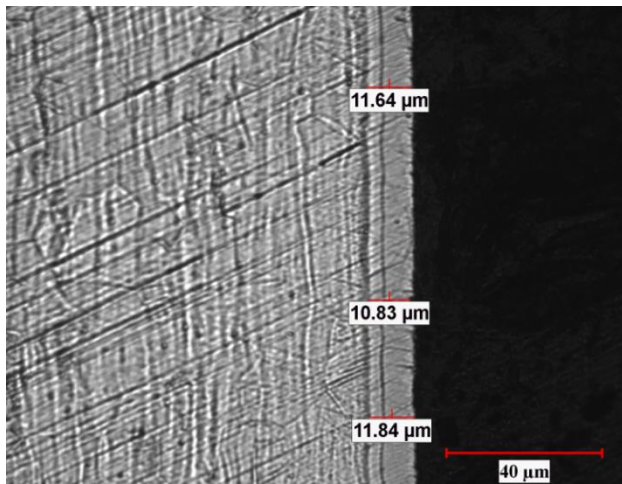
Таблица 2 – Характеристики азотированного слоя образцов из стали AISI 347

Состояние поверхности	№ образца	Средняя микротвёрдость поверхности HV	Средняя глубина слоя, мкм	Глубина проникновения азота, мкм	Годовая коррозия, мм/год	Средняя шероховатость поверхности Ra, мкм
После ИПА	1	950	14,3	~ 7,0	0,002	0,15
После ИПА+ЭПП	2	810	11,4	~ 4,3	0,0015	0,10
	3	770	11,1	~ 5,2	0,0009	0,07
	4	680	9,6	~ 4,1	0,0006	0,05
Исходное	5	320	–	–	0,0006	0,05

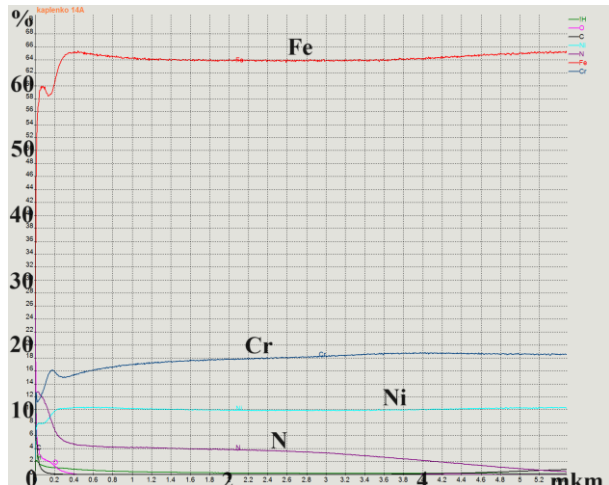
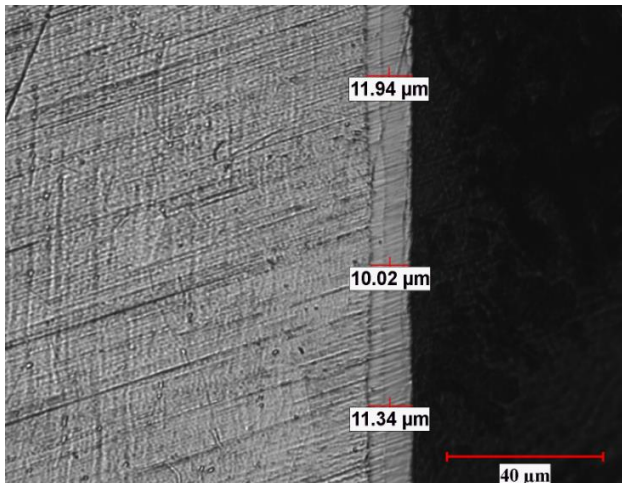
При ИПА происходит распыление поверхности, интенсивность которого зависит от величины плотности тока и катодного падения потенциала. Детали являются катодом, а стенки камеры – анодом. Между катодом и анодом возбуждается тлеющий разряд, и ионы газа, бомбардируя поверхность катода, нагревают её до температуры азотирования. В процессе ИПА на обрабатываемую поверхность осаждаются слой частиц, распыленных тлеющим разрядом со стен камеры, оснастки и других азотируемых деталей.

Следующий этап комплексной обработки заключался в проведении ЭПП, который является высокопроизводительным методом снижения шероховатости поверхности металлов и сплавов. Поверхностный слой образцов после прове-

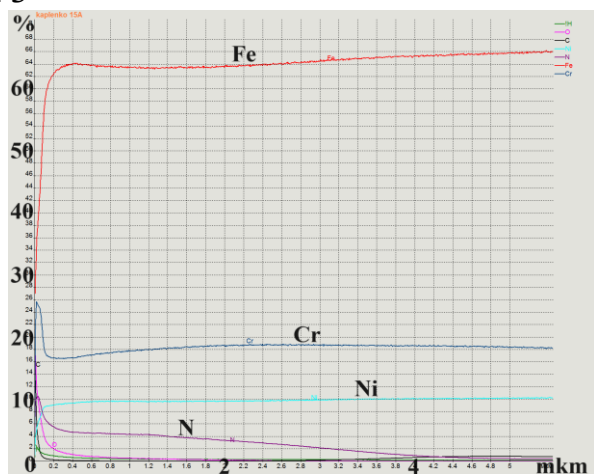
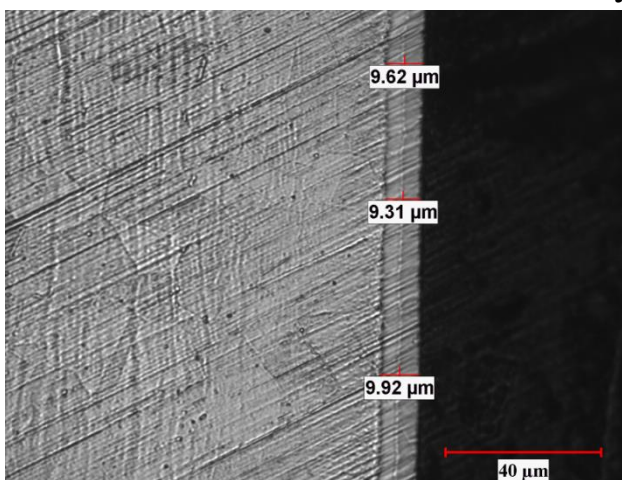
дения двух процессов обработки состоит из нитридного слоя, состоящего из смеси нитридов $Fe_{2-4}N$ и $Cr_{1-2}N$ (рисунок 2). Под нитридным слоем располагается тонкая гетерофазная зона, состоящая из азотистого аустенита (γ -фаза) с включениями нитрида $Cr_{1-2}N$.



№ 2



№ 3



№ 4

Рисунок 2 – Микроструктура и результаты элементного анализа по глубине азотированных образцов-свидетелей № 2–4 из стали AISI 347 после ЭПП

При увеличении времени ЭПП средние значения глубины и микротвёрдости материала поверхностного слоя уменьшаются, глубина проникновения азота слоя снижается (таблица 2). Установлено, что скорость съема материала составила около 5 мкм/мин. Спицам и образцам-свидетелям после ЭПП возвращается яркий металлический блеск.

Коррозионные испытания проводили методом линейной поляризации (рисунок 3). Значения годовой коррозии поверхности образцов № 1–5 определяли с помощью программы Nova. При исследовании образцов снимали катодные и анодные кривые. ЭПП позволяет восстанавливать коррозионную стойкость поверхности после ИПА до уровня исходного состояния поверхности (рисунок 3 и таблица 2). Микротвёрдость и глубина упрочнённого слоя снижается, но остается в пределах, необходимых для эксплуатации спиц. Шероховатость поверхности азотированных образцов после процесса ЭПП в течение 60 с снижается до состояния исходного значения поверхности. Происходит удаление микровыступов, что влечет за собой сглаживание и повышение зеркальности поверхности. Вместе с микровыступами удаляются инородные включения и различные загрязнения, происходит обезжиривание поверхности [4].

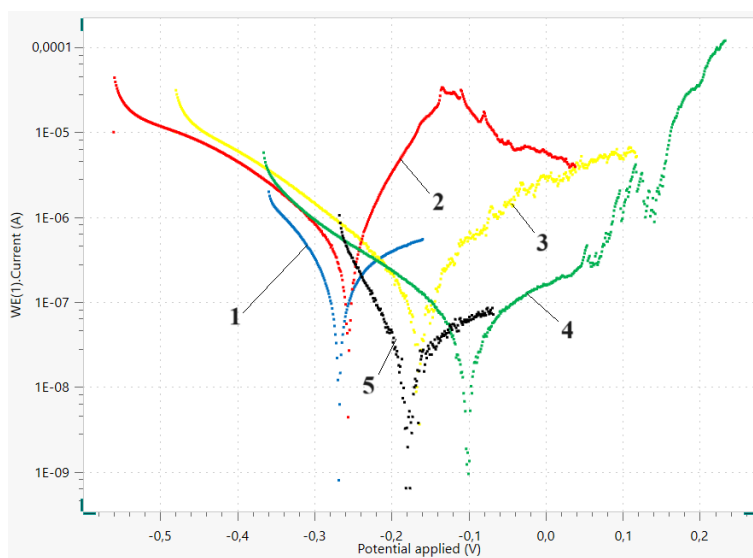


Рисунок 3 – Зависимость силы тока от потенциала коррозии образцов из стали AISI 304, подвергнутых ИПА (1); ИПА+ЭПП в течение 30 с (2), 45 с (3) и 60 с (4); в исходном состоянии (кривая 5)

Заключение

Проведены комплексные исследования комбинированной обработки по упрочнению поверхности и сохранению коррозионной стойкости стали AISI 304.

Метод ионно-плазменного азотирования позволяет формировать равномерные плотные упрочнённые слои на поверхности стали с образованием нитридов хрома.

Применение метода электролитно-плазменной полировки упрощает процесс финишной обработки поверхности спиц, сохраняет азотированный слой с микротвёрдостью HV 680, приводит к удалению дефектного слоя с поверхности и восстановлению коррозионной стойкости материала.

Проведенные исследования позволяют разработать комбинированный метод упрочнения медицинских изделий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Новые технологии обработки материала на восстановление опорно-двигательных функций человека / Ю. Г. Алексеев [и др.] / Литье и металлургия. 2008. – Том 2, № 38. – С. 196–197.
2. Effect of ion-plasma nitriding and electrolyte-plasma polishing on the hardness and corrosion resistance of high-chrome steels/ V.S. Kaplenko [at al.] // Plasma physics and plasma technology : X International conference, Minsk, 12–16 Sept. 2022 : contributed papers. – Minsk, 2022. – P. 342–345.
3. Ogorek, M. Ion nitriding using the active screen method. / M. Ogorek, M., T. Freчек. // Metallurgy. – 2019. – Vol. 3–4, P. 243–246.
4. Алексеев, Ю. Г. Комплексная технология изготовления изделий медицинской техники, основанная на пластическом деформировании и физико-технических методах / Ю. Г. Алексеев, В. Н. Страх, А. Ю. Королев / Литье и металлургия. 2005. – Том 4. № 36. – С. 180–187.

УДК 621.793:66.088

МОРФОЛОГИЯ ПОКРЫТИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ БЕСКОНТАКТНЫМ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО РАЗРЯДА ИЗ ТУГОПЛАВКИХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Костюкович Г.А.¹, Хвисевич В.М.², Овчинников Е.В.¹, Михайлов В.В.³, Веремейчик А.И.², Эйсымонт Е.И.¹, Пинчук Т.И.⁴

- 1) Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь
- 2) Брестский государственный технический университет, г. Брест, Республика Беларусь
- 3) Институт прикладной физики Академии наук Молдовы, г. Кишинев, Молдова
- 4) Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа, г. Минск, Республика Беларусь

Увеличение эксплуатационного ресурса деталей машин и механизмов достигается путем совершенствования структуры материала, а также модифицированием поверхностных слоев изделий различных конструкций. Одним из широко применяемых методов модифицирования поверхности различных проводящих материалов является метод электроискрового легирования металлов [1–5]. Электроискровое легирование (ЭИЛ) твердых проводящих поверхностей заключается в том, что в результате прохождения между электродами происходит направленный выброс материала электродов. В процессе электроискрового разряда разрушается преимущественно анод. Так как ЭИЛ проводится в газовой среде, то это приводит к тому, что при заданных условиях материал анода,