

УДК 621.793.02

ИОННО-ПЛАЗМЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

**Овчинников Е.В., Эйсымонт Е.И., Кравченко В.И., Мажанская Н.С.,
Петропаловский И.А. (ГрГУ им. Я. Купалы, г. Гродно, Беларусь, ОАО «Белкард»,
г. Гродно, Беларусь, РХТУ им. Д.А. Менделеева, г. Москва, Россия)**

Аннотация: В настоящей работе было проведено комплексное исследование по структуре, физико-механическим характеристикам и оптимизации технологических режимов формирования защитных покрытий методом ионно-плазменного азотирования (IPN) на конической шестерни для снижения общей коррозии и механического износа. Проведение ионно-плазменного азотирования приводит к изменению структуры поверхности модифицированных образцов. Установлено, что микротвердость в зоне азотирования ≈ 2 раза превышает твердость в середине зуба. Использование технологии IPN увеличивает эксплуатационные характеристики конической шестерни поворота патрона в 1, 5-3 раза

Ключевые слова: микроструктура стали, ионно-плазменное азотирование, модификация, шлиф, микротвердость, износостойкость шестерни конической

Повышение физико-механические характеристики углеродистых сталей достигаются применением различных технологических процессов, основанных на фазовых превращениях в сплавах железо-углерод, протекающих, например, при термической или химико-термической обработке. Для придания стальям более высоких функциональных характеристик в промышленности нашли широкое применение такие методы модифицирования структуры, как цементация, нитроцементация, ТВЧ-закалка. Данные методы упрочнения оправдывают себя при изготовлении тяжелонагруженных деталей (зубчатые колеса, оси, валы и др.) низкой и средней точности, не требующих последующей шлифовки.

Указанные виды термообработки экономически нецелесообразны при изготовлении средне- и низконагруженных высокоточных деталей, т.к. при данной обработке наблюдается значительное коробление и требуется последующая шлифовка. Соответственно, при шлифовке необходимо снимать значительную толщину упрочненного слоя.

Метод ионно-плазменного азотирования (ИПА), в отличие от выше перечисленных, позволяет существенно снизить коробление и деформацию деталей при сохранении шероховатости поверхности Ra в пределах от 0,63 до 1,2 мкм, что позволяет в подавляющем большинстве случаев использовать ИПА как финишную обработку. ИПА наиболее эффективно при обработке крупносерийных однотипных деталей: шестерен, валов, осей, зубчатых валов, вал-зубчатых шестерен и др. Шестерни, подвергнутые плазменному азотированию, имеют лучшую стабильность размеров по сравнению с цементованными шестернями и могут использоваться без дополнительной обработки. При этом несущая способность боковой поверхности и прочность основания зуба, достигаемые с помощью плазменного азотирования, соответствуют цементованным шестерням.

Применение ИПА технологии возможно и при изготовлении элементов конструкции станочного оборудования, например токарных патронов. Токарные патроны используют для закрепления деталей в металлорежущих станках при скоростной обработке деталей различных конструкций. Развитие и совершенствование токарного патрона в настоящее время связано с созданием все более нового

оборудования, экономией времени обработки, для получения все более сложных конструкций деталей. Основным классом токарных патронов являются конструкции, которые с одной стороны навинчиваются на шпиндель станка, а с другой — удерживают заготовку. Одним из ответственных элементов конструкции токарного патрона является коническая шестерня, которая воспринимает и передает высокие контактные нагрузки и вследствие этого достаточно быстро изнашивается. Повышение эксплуатационного ресурса токарного патрона определяется сроком эксплуатации конической шестерни. Применение ИПА позволит повысить гарантированный ресурс эксплуатации конической шестерни и токарного патрона в целом.

Таким образом, целью данной работы является изучение структуры, морфологии конструкционных сталей, модифицированных ионно-плазменным азотированием во взаимосвязи с эксплуатационными характеристиками.

В качестве объекта исследований использовали образцы и натурные изделия конической шестерни, изготовленной из стали 40Х. Образцы подвергали традиционной технологической обработке, заключающейся в закалке и последующем отпуске для снятия внутренних напряжений. Модифицированный образец получали путем ионно-плазменного азотирования.

Анализ особенностей структуры металлических материалов, подвергнутых различным видам обработки, осуществляли на универсальном металлографическом микроскопе ММВ 2200. Микрошлифы, полученные по общеизвестной технологии, подвергали травлению в специальных водных составах, содержащих 30 мас.% концентрированной HNO_3 (состав 1), 150 г Cr_2O_3 и 4 см³ концентрированной H_2SO_4 (состав 2). Исследование морфологии стальных образцов проводили методом атомной силовой микроскопии на комплексе «NT 206». Для оценки эффективности применения композиционных материалов в виде комплектующих изделий применяли специальные стенды, имитирующие условия реальных конструкций токарных патронов.

Обработку экспериментальных данных осуществляли общепринятыми методами математической статистики, определяя значения среднеквадратичного отклонения и границы доверительных интервалов по критерию Стьюдента при уровне надежности не менее 0,95. Число параллельных испытаний образцов в экспериментах составляло не менее 5-10. При оценке физико-механических показателей использовали данные испытаний не менее чем 8-10 образцов. Обработку экспериментальных данных осуществляли с применением пакета стандартных программ в ОС «Windows XP».

Согласно диаграмме состояния сплавы, содержащие до 0,01% углерода, являются однофазными сплавами и имеют структуру чистого феррита. При содержании углерода от 0,01% до 0,02% структура сплавов состоит из феррита и третичного цементита, выделяющегося из феррита по линии РQ. Ввиду очень малого количества третичного цементита в структуре он обычно не наблюдается. Структура дозвтектоидной стали, содержащей углерода более 0,02 %, состоит из феррита и перлита. С увеличением содержания углерода количество перлита увеличивается, а количество феррита уменьшается.

На рис. 1 представлены образцы стали 40Х, подготовленные согласно стандартных методик для металлографического анализа. Структура стали 40Х представляет собой чередование ферритных и перлитных областей. Проведение термической обработки по стандартной технологии, используемой при изготовлении конических шестерен токарных патронов, приводит к образованию в структуре стали 40Х следующих фаз: сорбит легированный, сохранивший ориентировку мартенсита, и остаточный аустенит. Термическая обработка (закалка и отпуск) приводит к

уменьшению износостойкости вследствие формирования структуры приповерхностного слоя с большим уровнем остаточных напряжений (рис. 2).

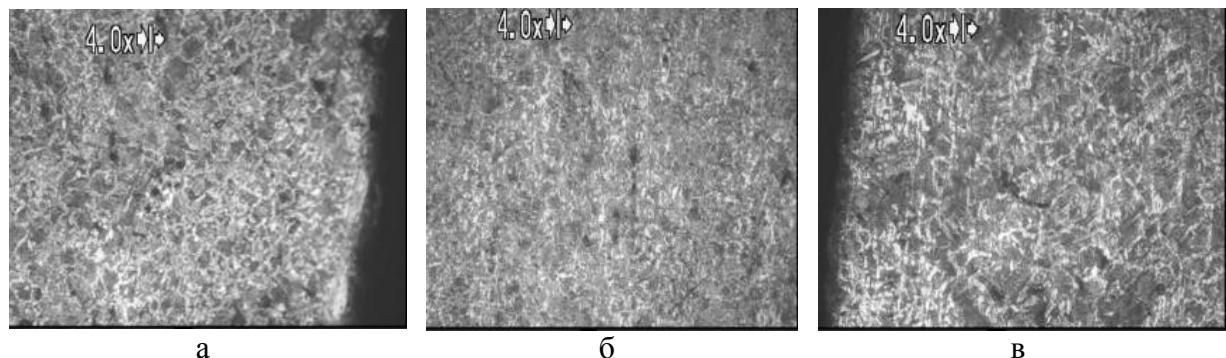


Рис. 1. Микроструктура стали 40Х после пластического деформирования, образец 1: а) внешний край, б) середина образца, в) край образца. $\times 220$

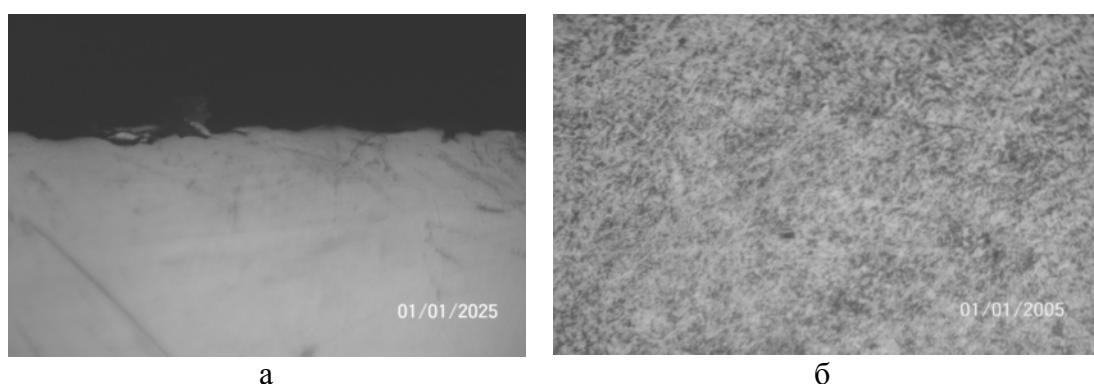


Рис. 2. Микроструктура Стали 40Х, после нормализации: а) шлиф, б) шлиф протравленный. $\times 220$

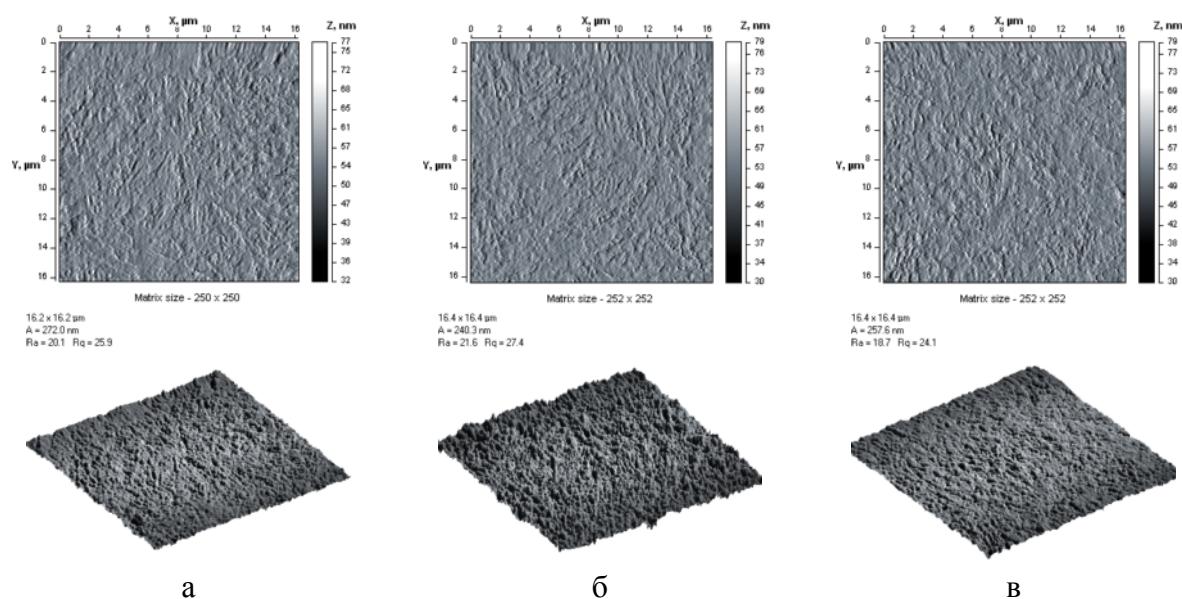


Рис. 3. ACM – изображение поверхности протравленного шлифа стали 40Х в зависимости от расстояния от края образца: а) край образца, б) середина зуба, в) в объеме конической шестерни

Исследования, проведенные методом атомно-силовой микроскопии, образцов стали 40Х, термообработанных по стандартной технологии, показали, что морфология поверхности шлифа существенно изменяется от края образца к его середине. Значения шероховатости поверхности, определяемые параметром Ra (среднее арифметическое отклонения профиля), находятся в пределах 18-21 мкм. Латеральный размер зерен фактически остается неизменным при сканировании вдоль поверхности шлифа (рис. 3).

Определение поверхностной энергии стали 40Х, термообработанного по стандартной технологии, показало существенное различие в значениях E_p от места смачивания (табл. 1).

Таблица 1. Значения поверхностной энергии стали 40Х, термообработанной по стандартной технологии, в зависимости от расстояния от края образца

Параметры	край образца	середина зуба	середина образца
угол смачивания вазелиновым маслом, град	14	20	30
угол смачивания водой, град	60	70	60
работа адгезии вазелинового масла, мДж	59,11	58,19	55,98
работа адгезии воды, мДж	107,94	96,57	107,94
дисперсионный компонент поверхностной энергии	11,70	4,34	15,96
полярный компонент поверхностной энергии	95,94	66,01	103,45
поверхностная энергия, мДж/м ²	107,64	70,35	119,42

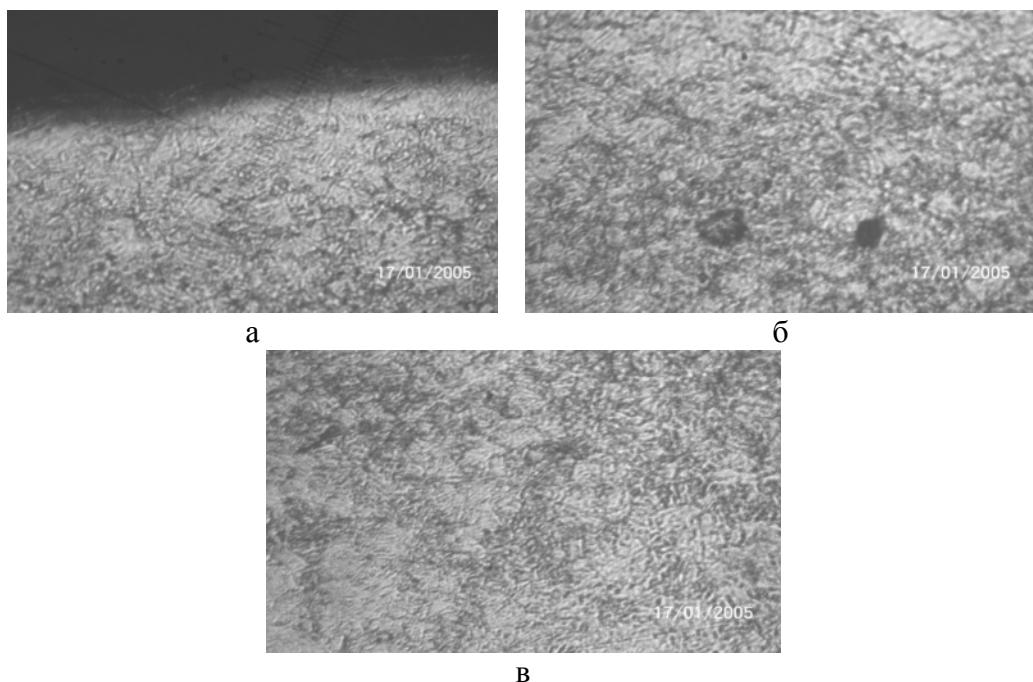


Рис. 4. Микроструктура стали 40Х, модифицированной ионно-плазменным азотированием: а) внешний край образца; б) середина зуба; в) середина образца

Микротвердость образца также зависит от места определения значений микротвердости. Так, значения микротвердости, определенные на краю образца шлифа, примерно равны $H \approx 463$ кг/мм², в середине зуба конической шестерни – 402,1 кг/мм², в середине образца – 431 кг/мм². Таким образом, видно, что при стандартной технологии, получения шестерни возникают большие остаточные напряжения, что выражается в

неоднородном распределении значений поверхностной энергии, прочностных характеристик вдоль поверхности исследуемых граничных слоев образца. Данная структурно-механическая неоднородность существенно снижает износостойкость конических шестерен токарного патрона в процессе эксплуатации.

Проведение ионно-плазменного азотирования приводит к изменению поверхностной структуры модифицированных образцов (рис. 4).

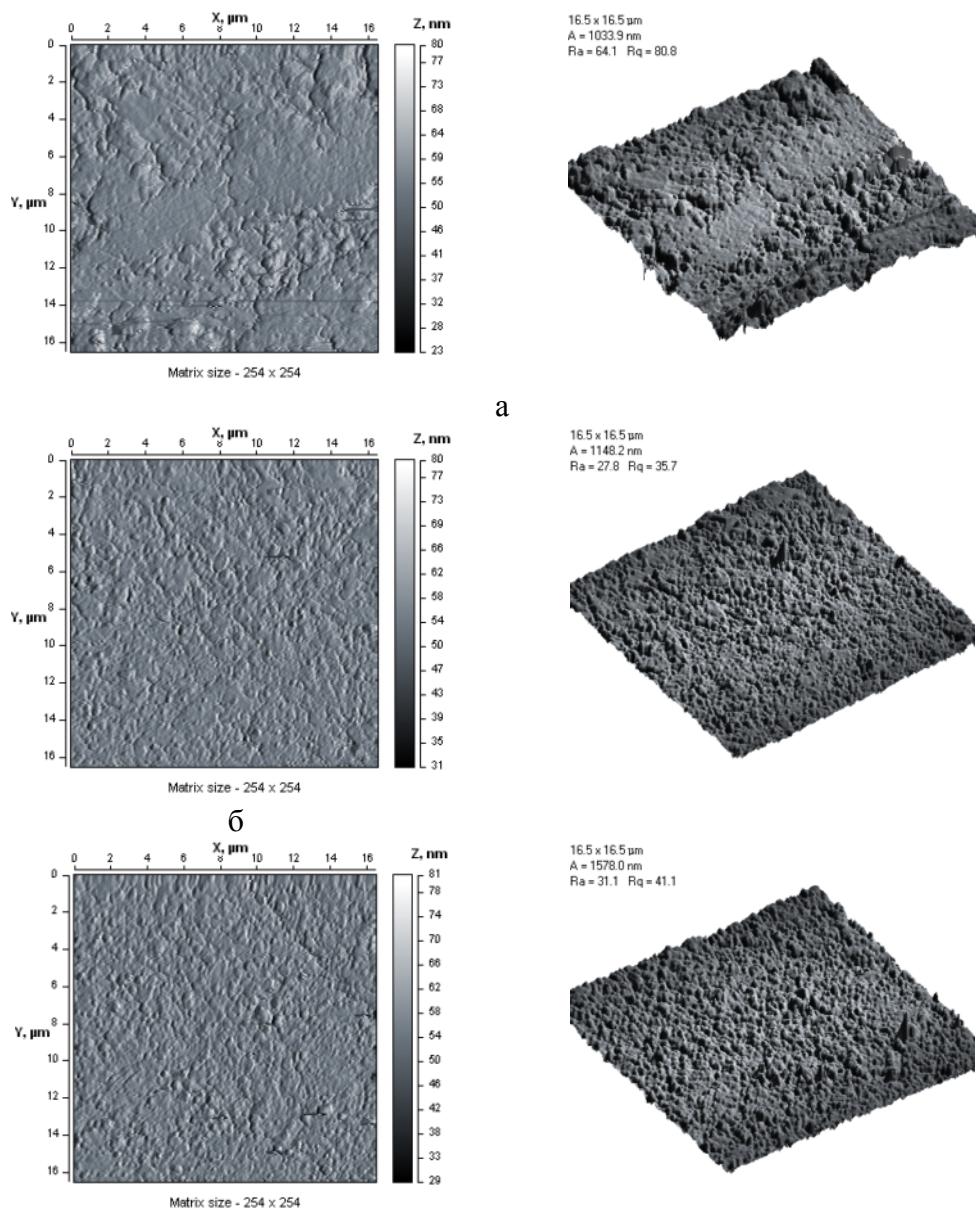


Рис. 5. ACM – изображение поверхности протравленного шлифа стали 40Х, модифицированного ионно-плазменным азотированием, в зависимости от расстояния от края образца: а) край образца; б) середина зуба конической шестерни токарного патрона; в) середина конической шестерни токарного патрона. (16×16 мкм)

Вдоль края зуба шестерни наблюдается светлый непротравленный слой шириной 0,5-0,8 мкм, который, скорее всего, соответствует азотированному слою, появляющемуся в результате процесса ионно-плазменного азотирования.

В ряде случаев установлено появление глобулярных мелкодисперсных частиц, относящихся к химическим соединениям типа нитрида металла.

Морфология образца, подвергнутого ИПА, существенно отличается от структуры контрольного образца. Светлая граничная область имеет значения $Ra \approx 64,1$ мкм, что примерно в 3 раза выше, чем у контрольного образца, причем имеются в структуре данной области протяженные участки со значениями $Ra \approx 10-15$ мкм. Наблюдается наличие глобулярных частиц латеральным размером $\approx 0,3-0,5$ мкм. Область образца, относящаяся к середине зуба, характеризуется параметром шероховатости $Ra \approx 27,8$ мкм и мелкодисперсной структурой. Область, относящаяся к середине образца шестерни конической токарного патрона, характеризуется параметром шероховатости $Ra = 31,1$ мкм.

Измерение значений поверхностной энергии модифицированного образца показало, что после ИПА обработки получается более равновесная структура, т.к. разброс значений для края и середины зуба конической шестерни лежат в пределах абсолютной ошибки эксперимента (таблица 2). Проведенные исследования по определению прочностных характеристик показали, что микротвердость в зоне азотирования в ≈ 2 раза превышает твердость в середине зуба и середины шестерни конической токарного патрона и составляет ≈ 282 кг/мм².

Таблица 2. Значения поверхностной энергии стали 40Х, модифицированной методом ИПА, в зависимости от расстояния от края образца

Параметры	ИПА, край образца	ИПА, середина образца	ИПА, вершина образца
угол смачивания вазелиновым маслом, град	11,00	10,00	15,00
угол смачивания водой, град	47,00	50,00	30,00
работка адгезии вазелинового масла, мДж	59,45	59,54	58,98
работка адгезии воды, мДж	121,04	118,21	134,28
дисперсионный компонент поверхностной энергии	25,93	22,10	48,05
полярный компонент поверхностной энергии	139,36	128,86	194,21
поверхностная энергия, мДж/м ²	165,29	150,96	242,26

Ионно-плазменное азотирование конической шестерни токарного патрона увеличивает прочностные характеристики, выравнивает значения поверхностной энергии в среднем по объему образца.

Результаты исследования эксплуатационных характеристик конической шестерни контрольной и модифицированной методом ИПА приведены в таблице 3.

Применение технологии ИПА позволило увеличить эксплуатационные характеристики конической шестерни токарного патрона в 1,5-3 раза.

Таблица 3. Результаты испытаний на износостойкость шестерни конической

Радиальн. нагрузка, Н	Число оборотов шестерни	Крутящий момент на шестерне, Нм			
		опорная поверхн. с покрытием (без смазки). ИПА	опорная поверхн. без покрытия (без смазки). Контрольный образец	опорная поверхн.с покрытием (со смазкой). ИПА	опорная поверхн. без покрытия (со смазкой). Контрольный образец
3725	0	6,9	10,6	6,8	9,1
3725	480	6,8	22,8*	6,8	8,3
3725	1000	6,8		6,7	8,2
3725	2000	6,8		6,8	8,2
3725	3000	6,7		6,7	8,4
3725	4000	6,7		6,7	8,4
3725	5000	6,7		6,6	8,5
3725	6000	6,8		6,6	9,9
3725	6240	6,8		6,6	21,5*
3725	6920	19,7*		6,7	
3725	8000			6,7	
3725	9000			6,8	
3725	10000			6,9	
3725	11000			6,8	
3725	12000			6,9	
3725	13000			6,9	
3725	14000			7,0	
3725	15000			7,0	
3725	15770			28,4*	

Примечание: *задиры на опорной поверхности шестерни

В ходе выполненных работ проведены комплексные исследования по изучению структуры, физико-механических характеристик и оптимизации технологических режимов формирования защитных покрытий методом ИПА на конических шестернях с целью снижения совокупного коррозионно-механического износа путем разработанной ионно-плазменной технологии обработки шестерен конических токарного патрона из стали 40Х отечественного производства на специальном технологическом оборудовании, обеспечивающем заданный градиент прочности характеристик по сечению и длине зуба и оптимальное сочетание показателей статической прочности и усталостной выносливости зуба в зоне контактирования с контроллером и в его основании вследствие формирования закалочных структур заданного состава и строения.

Список литературы: 1. Федюкин, В.К. Термоциклическая обработка сталей и чугунов. / В.К. Федюкин. – Л.: Машиностроение, 1977. – 384 с. 2. Федюкин, В.К. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин. / В.К. Федюкин, М.Е. Смагоринский. – Л.: Машиностроение. Ленинград. отд-ние. 1989. – 255 с. 3. Термоциклическая обработка сталей, сплавов и композиционных материалов / А.С. Тихонов [и др.]. – М.: Наука, 1984. – 186 с. 4. Баранов, А.А. Особенности фазовых и структурных превращений при ТЦО металлов / А.А. Баранов. // 11 Всесоюзная конф.:

Закономерности формирования структуры сплавов эвтектического типа. – Днепропетровск, 1982. – С. 5 – 6. **5.** Биронт, В.С. Роль фазовых взаимодействий в ТЦО сплавов. / В.С. Биронт, Б.С. Заиграйкина // 11 Всесоюзная конф.: Закономерности формирования структуры сплавов эвтектического типа. – Днепропетровск, 1982. – С. 10 – 11. **6.** Биронт, В.С. Термическая обработка доэвтектоидной стали / В.С. Биронт, Н.Г. Носовец, О.М. Комендровская // 11 Всесоюзная конф.: Закономерности формирования структуры сплавов эвтектического типа. – Днепропетровск, 1982. – С. 68 – 71. **7.** Рейнага, Мартинес Марселино. Разработка литой микролегированной быстрорежущей стали Р6М5 на основе структурных исследований: дисс. ... канд. техн. наук. / Мартинес Марселино Рейнага. – Минск. 1985. – 214 с. **8.** Левицкий, М.О. Влияние термоциклической обработки на коррозионно-механические свойства литой электрошлаковой стали 40Х. / М.О. Левицкий. // Физ.-хим. механика материалов. – 1984 – №14. – С 50 – 52. **9.** А. С. 1102815 СССР. МКИ С 21 Д 9/ 22, 1/78. Способ термической обработки заэвтектоидной стали. **10.** Тоффенец, Р.Л. Оптимизация режимов термоциклической обработки быстрорежущих сталей. / Р.Л. Тоффенец, С.Е. Бельский, И.И. Шиманский // Пути повышения эффективности использования материалов: тез. докл. НТК. – Минск, 1983. – С. 35 – 37.

ION-PLASMA MODIFICATION OF CARBON STALEY

Ovchinnikov EV, Eysymont EI, Kravchenko VI, Mazhanskaya NS, Petropalovsky IA
(GrGU them. Kupala, Grodno, Belarus, JSC "Belcard", Grodno, Belarus, RCTU them. D. Mendeleev, Moscow, Russia)

Abstract: In present work was carried out comprehensive studies on the structure, physical and mechanical characteristics and optimization of technological modes of formation of protective coatings by ion-plasma nitriding (IPN) to the bevel gear to reduce the general corrosion and mechanical wear. Carrying out the ion-plasma nitriding leads to a change in the surface structure of the modified samples. It is established that microhardness in the zone of nitriding ≈ 2 times exceed the hardness in the middle of the tooth and middle of the conical gears turning chuck. The use of IPN technology has increased the service characteristics of conical gears turning chuck in 1.5-3 times

Keywords: microstructure of steel, ion-plasma nitriding, modification, grinding, microhardness, wear conical gears

ІОННО-ПЛАЗМОВА МОДИФІКАЦІЯ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛЕЙ

Овчинников Е. В. , Ейсимонт Є. І. , Кравченко В. І. , Мажанская Н. С. ,
Петропаловський І. А. (ГрГУ ім. Я. Купали, м. Білорусь, ВАТ «Белкард», м.
Гродно, Білорусь, РХТУ ім. Д. А. Менделєєва, м. Москва, Росія)

Анотація: В даній роботі було проведено комплексне дослідження по структурі, фізико-механічними характеристиками та оптимізації технологічних режимів формування захисних покривів методом іонно-плазмового азотування (IPN) на конічної шестерні для зниження загальної корозії і механічного зносу. Проведення іонно-плазмового азотування призводить до зміни структури поверхні модифікованих зразків. Встановлено, що мікротвердість в зоні азотування ≈ 2 рази перевищує твердість у середині зуба. Використання технології IPN збільшує експлуатаційні характеристики конічної шестерні повороту патрона в 1, 5-3 раза

Ключові слова: мікроструктура стали, іонно-плазмове азотування, модифікація, шліф, мікротвердість, зносостійкість шестерні коніческої

Надійшла до редколегії 17.06.2011 р.