

Таблица 4 – Значения удельной поверхностной энергии для различного вида вакуумных покрытий рефракторных металлов, сформированных на подложках различных видов сталей

Параметры	Тип подложки		
	ZrCN (сталь 08кп)	ZrCN (сталь 08кп, обработанная в течение 60 минут в жидком азоте)	ZrCN (сталь 08кп, обработанная в течение 1440 минут в жидком азоте)
Угол смачивания вазелиновым маслом, град	19°	18,00	17,00
Угол смачивания водой, град	59°	62,00	70,00
Работа адгезии вазелинового масла, мДж	58,37	58,53	58,69
Работа адгезии воды, мДж	109,02	105,74	96,57
Дисперсионный компонент поверхностной энергии, мДж/м ²	13,69	10,47	3,97
Полярный компонент поверхностной энергии, мДж/м ²	101,08	90,63	65,04
Поверхностная энергия, мДж/см ²	114,77	101,10	69,01

Таблица 5 – Значения микротвердости покрытий карбонитрида циркония, сформированных на активированных стальных субстратах стали 08кп, подвергнутых воздействию криогенных температур

Вид обработки	Исходный материал +ZrCN	Выдержка субстрата в течение 60 минут в жидком азоте+ZrCN	Выдержка субстрата в течение 24 часов в жидком азоте+ZrCN
H, ГПа	12,1	14,4	16,8

Таблица 6

Вид обработки	Исходный материал +ZrCN	Выдержка субстрата в течение 60 минут в жидком азоте+ZrCN	Выдержка субстрата в течение 24 часов в жидком азоте+ZrCN
μ, коэффициент трения	0,58	0,5	0,45

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Технология криогенной обработки сталей пониженной прокаливаемости / Е. В. Овчинников, Г. А. Костюкович, И. И. Романчук, К. В. Кравченко // Инновационные технологии в машиностроении : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 29–30 окт. 2013 г. / Полоц. гос. ун-т; под общ. ред. А. И. Гордиенко, В. К. Шелега. – Новополоцк, 2013. – С. 90–93.
2. Актуальные области использования криогенных технологий в прокатном производстве / И. Ю. Приходько, П. В. Крот // Металлургические процессы и оборудование. – 2009. – №1. – С. 10–16.
3. Криогенная технология повышения прочностных характеристик сталей пониженной прокаливаемости / Е. В. Овчинников, В. А. Струк, Е. И. Эйсымонт, К. В. Кравченко, А. Г. Шагойка // Веснік ГрДУ. – Сер. 6. – 2012. – № 3 (137). – С. 49–58.
4. Металлополимерные нанокомпозиты: особенности структуры, технология, применение / А. А. Рыскулов, С. В. Авдейчик, М. В. Ищенко, Е. В. Овчинников; под научн. ред. В. А. Струка, В. А. Лиопо. – Гродно : ГГАУ, 2010. – 335 с.

05.11.2019

CHEKAN N. M., AUCHYNNIKAU Y. V., KHVISEVICH V. M., EISYMONT Y. I., VEREMEICHIK A. I., GORELCHIK A. N. Application of cryogenic technologies in the formation of vacuum coatings

Physicomechanical characteristics, specific surface energy of vacuum coatings formed on steels of 1008, HSS type subjected to processing at cryogenic temperatures are studied. The structural transformations occurring in vacuum coatings formed on steel substrates with subsequent processing at low temperatures were studied. A change in the tribotechnical characteristics of zirconium carbonitride coatings formed on steel substrates subjected to processing in a cryogenic liquid is shown.

621.785.532

Введение. Стали после азотирования поверхности характеризуются повышенными износо- и коррозионной стойкостью, усталостными характеристиками. Предотвращается холодная сварка сталей, особенно в узлах, подверженных трению в защитной атмосфере [1, 2]. Ионное азотирование (ИА) является наиболее технологичным процессом химико-термической обработки. Для протекания процесса ИА между анодом (корпусом камеры или защитными экранами) и деталями, размещенными на катоде, поддерживается аномальный тлеющий разряд. Рабочими газами в оборудовании производства ФТИ НАН Беларуси являются азот и аргон (из баллонов) и вырабатываемый электролизером водород. ИА позволяет избавиться от таких недостатков газового азотирования, как большая длительность и трудоемкость процесса, повышенная хрупкость слоя, недостаточ-

ная контактная выносливость упрочненного материала, нестабильность получаемых результатов.

Наряду с экологичностью и экономичностью процесса, ИА позволяет получать диффузионные слои заданного состава и структуры, как с нитридной зоной на поверхности, так и без нее. В первом случае обеспечиваются высокие коррозионная стойкость и прирабатываемость трущихся поверхностей (для деталей, работающих на износ), во втором – сопротивление знакопеременным нагрузкам в условиях изнашивания при высоких давлениях (для режущего и штампового инструмента).

Имеющиеся проблемы азотирования. Поверхностное упрочнение отверстий и углублений в деталях является достаточно сложной задачей практически для всех методов инженерии поверхности,

Поболь Игорь Леонидович, д. т. н., доцент, нач. отдела электронно-лучевых технологий и физики плазмы Физико-технического института НАН Беларуси; e-mail : robol@phti.by.
Беларусь, 220141, г. Минск, ул. Академика Купревича, 10/2.

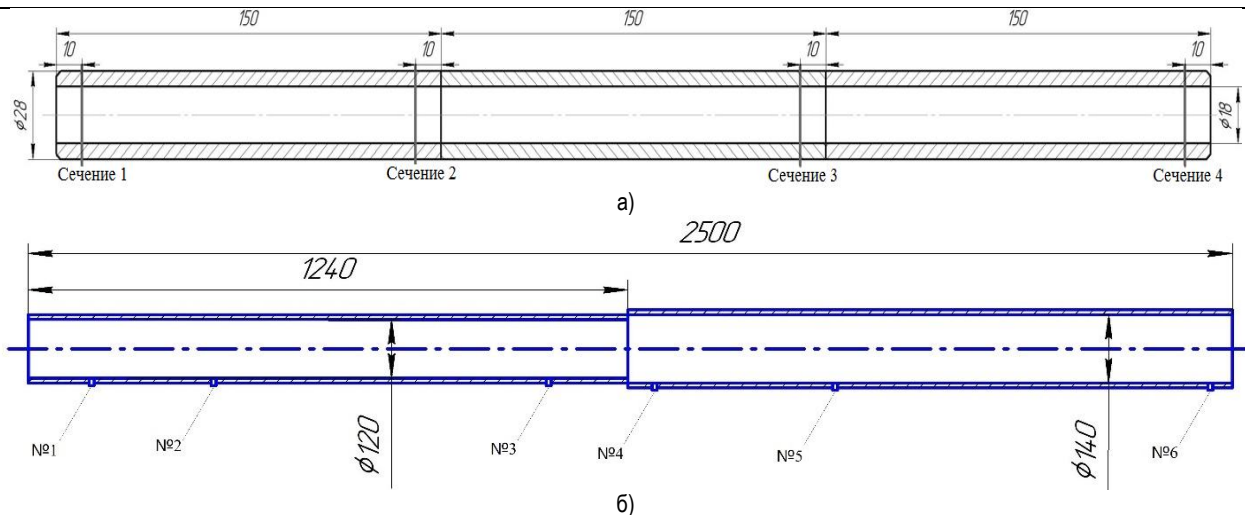


Рисунок 1 – Эскизы образца из стали 38Х2МЮА (а) и две соединенные трубы с размещенными в них образцами из стали 40Х (б)

в том числе с использованием потоков энергии электронов, ионов, плазмы, лазерного излучения. Проблема заключается в сложности организации проникновения таких потоков на «затененные» участки изделия. Делаются попытки решить задачу поверхностного упрочнения созданием малагабаритных источников (ионных, электронно-лучевых, магнетронных) либо использованием оптических и электромагнитных систем отклонения потоков фотонов или частиц с размещением их внутри отверстий. Эти приемы имеют реальный смысл при достаточно больших по линейным размерам углублениях и отверстиях в изделиях. Невозможность обрабатывать отверстия небольшого диаметра в деталях были до недавнего времени нерешенной проблемой и технологии азотирования.

Авторы [3] применяли газовое азотирование для обработки поверхности отверстий диаметром 5,56 мм в детали из стали 38НМЖ (аналог стали 30Х2МЮА). Использовалось несколько вариантов процесса, в обоих применялся аммиак NH_3 . По лучшему варианту газового азотирования на поверхности отверстий формировался упрочненный слой глубиной 250 мкм с максимальной микротвердостью HV 1120, при этом образовывался т. н. «белый слой» (ϵ -фаза, слой нитридных соединений толщиной 12–17 мкм), который обладает повышенной коррозионной стойкостью, но является очень хрупким.

В работе [4] утверждалось, что ионное азотирование не обеспечивает поверхностное упрочнение материала в отверстиях из-за возникновения эффекта полого катода. Однако в [5, 6] приведены результаты азотирования с полым катодом поверхности деталей небольшого размера из нержавеющей стали мартенситного класса AISI 420, в результате которой получен поверхностный слой толщиной 20 мкм с микротвердостью стали более HV 1000. После такой же обработки пластин из нержавеющей сталей AISI 304 и AISI 316 слой толщиной 80 мкм имел на поверхности микротвердость более HV 1400 [7]. В работе [8] выполнены исследования ИА по варианту полого катода образцов из сталей AISI 304 и AISI 316 длиной от 5,5 мм до 55,5 мм с наружным диаметром от 0,88 мм до 21,5 мм и, соответственно, внутренним – от 0,58 до 16,0 мм. Смесь азота и водорода пропусклась через обрабатываемые отверстия. Исследования с помощью зонда Ленгмюра процесса в цилиндрическом образце длиной 120 мм показали, что распределение плотности ионов вдоль оси трубы неоднородное и на длине 100 мм в разных точках плотность ионов отличается более чем на порядок. При азотировании внутренней поверхности трубы из стали AISI 316 длиной 160 мм микротвердость материала поверхностного слоя изменялась в пределах HV 500–1250, при этом со стороны подачи смеси газов в трубу она имела минимальное значение, повышаясь к выходу. При азотировании минисопла для протягивания нити из AISI 316 с диаметром отверстия 1,08 мм и длиной 25 мм максимальная микротвердость материала HV 820 была достигнута вблизи края изделия, а на расстоянии 2 мм от этого участка снижалась до HV 380. При этом толщина упрочненного слоя составила 125 мкм. Учитывая, что микротвердость исходной стали значительно ниже (HV 200), результаты ионного азотирования в режиме полого катода можно считать достаточно хорошими.

В [9] выполнено упрочнение небольших образцов из стали 38ХМЮА на экспериментальной установке ИА в режиме полого катода, для создания которого на расстоянии 3–5 мм от поверхности образцов располагали технологический экран-сетку. Это, по мнению авторов, повышает степень ионизации рабочего газа, градиент концентрации насыщающего элемента на поверхности образца, интенсифицирует процесс ИА. Ионное азотирование обеспечило твердость поверхности HV 987, ИА с эффектом полого катода – HV 978 с более глубоким упрочненным слоем (до 200–250 мкм).

Вариант ИА с эффектом полого катода приемлем для упрочнения небольших по размерам изделий. Однако он непригоден для обработки достаточно габаритных деталей с криволинейной поверхностью, поскольку сложно обеспечить эквидистантное взаимное расположение катода-изделия и анода и равномерный нагрев упрочняемой детали.

Авторы [10] проводили ионное азотирование образцов из стали 32CrMoV12-10 с диаметром отверстий 6 и 8 мм и длиной 500 мм. В образце с диаметром отверстия 6 мм воздействие плазмы с формированием в стали упрочняющих фаз распространялось на расстоянии 138 мм от торца образца, в образце диаметром 8 мм – на 234 мм. В поверхностном слое образца с отверстием 6 мм достигнута толщина азотированного слоя 120 мкм с микротвердостью HV 1100, в образце с отверстием 6 мм глубина слоя составила 100 мкм. Поверхностное упрочнение по всей длине отверстия не достигнуто.

Цель работы – исследование метода ионного азотирования поверхности отверстий в длинномерных изделиях из сталей с достижением слоя равномерной глубины и твердости материала по всей длине отверстия.

Материалы, оборудование и методы. Образцы из сталей 38ХМЮА и 40Х во время экспериментов по ионному азотированию размещались в вертикальном положении. Использована полая заготовка из стали 38ХМЮА длиной 450 мм и сквозным отверстием диаметром 18 мм (рисунок 1 а). Исходная термообработка заготовки – закалка от 940 °С, охлаждение в масле, отпуск при 640 °С. Распределение микротвердости по толщине вырезанных из этой заготовки образцов (выполнялось с охлаждением водой) изучалось в четырех сечениях. Сечение 1 находилось в нижней части заготовки, а сечение 4 – в верхней части.

Для обработки образцов из стали 40Х использованы две трубы из углеродистой нелегированной стали обычного качества с внутренним диаметром 120 и 140 мм и толщиной стенок 15 мм (рисунок 1 б), соединенные так, что их общая длина составила 2500 мм. В сквозные отверстия, выполненные в радиальном направлении по всей длине труб, вставлены образцы из стали 40Х вблизи обоих торцов и в центральных частях труб, как показано на рисунке 1 б. Исходная термообработка образцов из стали 40Х – закалка от 860 °С, охлаждение в масле, отпуск при 500 °С.

Ионное азотирование заготовки из стали 38ХМЮА и двух соединенных труб проводили в установке производства ФТИ НАН Беларуси, на которой может выполняться упрочняющая обработка изделий длиной до 3 200 мм (рисунок 2) [11]. Для проведения процесса азотирования заготовки из стали 38ХМЮА была изготовлена оснастка, позволяющая размещать анод внутри отверстия (рисунок 3).

Микродюретрические и металлографические исследования выполняли на микрошлифах каждого из четырех сечений образца из стали 38Х2МЮА и шести – из стали 40Х. Пробоподготовку образцов для исследований проводили на оборудовании фирмы METCON. Анализ микроструктур выполняли на микроскопе МИ-1, контроль микротвердости – на оборудовании фирмы AFFRI.



Рисунок 2 – Промышленное оборудование для ИА в ФТИ НАН Беларуси

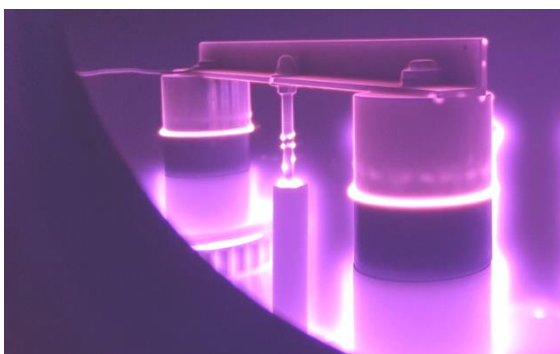


Рисунок 3 – Процесс обработки образца из стали 38Х2МЮА с оснасткой

Для построения профиля микротвердости по глубине образца измерения выполняли четыре раза на каждом микрошлифе. По усредненным данным строились графики распределения микротвердости по глубине слоя для каждого сечения образца. За глубину упрочненного слоя принималось расстояние от поверхности до слоя с микротвердостью, на HV50 превышающей твердость основы.

Микрорентгеноспектральный и энергодисперсионный анализ проводился на сканирующем электронном микроскопе HITACHI S-4800 с приставкой для EDX анализа XFlash Detector 5030 Bruker.

Распределение элементов от поверхности в глубину образцов исследовали с помощью атомно-эмиссионного спектрометра тлеющего разряда GD Profiler2 (Horiba Jobin-Yvon).

Результаты. Ранее в ФТИ НАН Беларуси выполнен большой объем исследований по отработке оптимальных режимов ИА различных инструментальных, нержавеющих, конструкционных сталей, в том числе 38Х2МЮА и 40Х. Показана возможность управления свойствами упрочненного слоя на сталях и эксплуатационными характеристиками изделий путем варьирования параметрами процесса азотирования [11-13]. Так, в зависимости от режима ИА стали 38Х2МЮА может быть получен широкий диапазон свойств упрочненного слоя – твердости материала на поверхности HV650–1050, глубины 0,3-0,8 мм (рисунок 4). Это же относится и к стали 40Х (с более низким диапазоном значений твердости).

Ионное азотирование образца из стали 38Х2МЮА проводили при температуре 535 °С в течение 13 ч, образцов из стали 40Х – при температуре 515 °С в течение 14 ч. Режимы азотирования выбраны, исходя из опыта обработки указанных сталей.

Из графиков на рисунке 5 видно, что глубина азотированного слоя во всех четырех исследованиях сечений образца из стали 38Х2МЮА с внутренней стороны составляет 290–330 мкм, диффузионный слой распределен равномерно по образцу длиной 450 мм. Максимальная микротвердость стали в приповерхностном слое составляет HV 750-800.

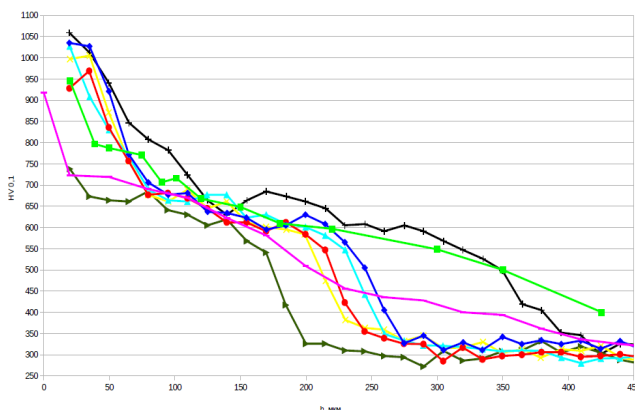


Рисунок 4 – Распределение микротвердости по глубине азотированного слоя в стали 38Х2МЮА в зависимости от режимов обработки

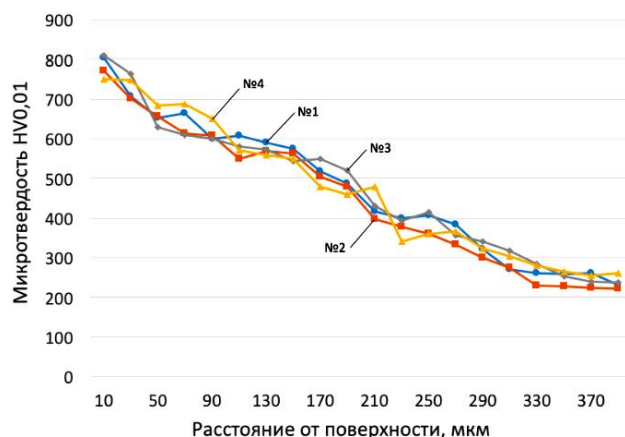


Рисунок 5 – Профили микротвёрдости по глубине в сечениях образца из стали 38Х2МЮА, показанных на рисунке 1 а

При ИА на поверхности стали 38Х2МЮА формируется азотированный слой, состоящий из поверхностной зоны нитридов (ϵ -фазы, γ' -фазы) и диффузионного подслоя из азотистого твердого раствора нитрида железа (γ -фаза) (рисунок 6 а). Диффузионный подслоя по сравнению с нитридной зоной сильнее поддается травлению и выглядит темным. Это связано с выделением нитридов железа как по границам зерен, так и в центре зерна.

В поверхностном слое ϵ -фаза и γ' -фаза формируются последовательно, γ' -фаза соответствует твердому раствору на базе нитрида Fe_4N . Это соединение характеризуется областью гомогенности в интервале содержания 5,7–6,1 мас. % азота. ϵ -фаза является твердым раствором на базе нитрида $\text{Fe}_{2,3}\text{N}$ и существует в интервале концентраций 7,7–11,1 % азота.

При азотировании сплавов железа в γ' и ϵ -фазах часть атомов железа замещается легирующими элементами. В γ' -фазе в больших количествах растворяется алюминий и кремний. Легирование ϵ -фазы повышает ее твердость и сопротивление износу. Такие легирующие элементы, как Cr, Mo и Mn, растворяясь в ϵ -фазе, уменьшают в ней содержание азота и ее толщину.

Микрорентгеноспектральным, энергодисперсионным и атомно-эмиссионным анализом распределения химических элементов по глубине азотированного слоя показано, что по мере удаления от поверхности образца содержание азота в стали уменьшается, а химический состав приближается к химическому составу исходной стали. Содержание алюминия при продвижении в глубь образца также понижается, что может быть связано с диффузией алюминия в поверхностные слои стали в процессе ИА.

Глубина азотированного слоя на всех шести образцах из стали 40X, расположенных по длине трубы длиной 2 500 мм, достаточно близка и составляет 230–270 мкм. Максимальное значение микротвердости стали 40X (HV500–590) вблизи поверхности и характер изменения микротвердости по глубине на всех шести образцах практически идентичны (рисунок 7).

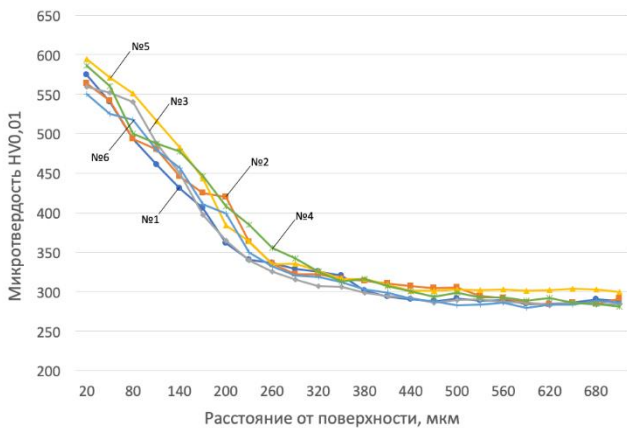


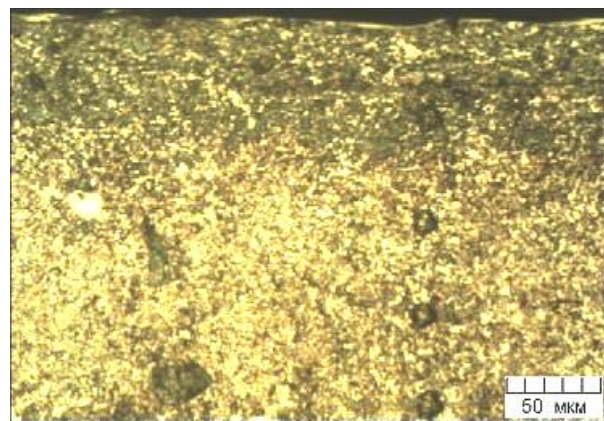
Рисунок 7 – Профили микротвёрдости по глубине в образцах из стали 40X, установленных на участках трубы, показанных на рисунке 1 б

Микроструктура образцов из стали 40X показана на рисунке 6 б. Азотированный слой состоит из диффузионной зоны (более темная, чем основной металл), представляющей собой твердый раствор азота в α -железе с дисперсными включениями нитридов железа и хрома. Сплошной нитридный слой на поверхности не образуется.

Как видно из характера распределения микротвердости по глу-



а



б

Рисунок 6 – Микроструктура сталей 38X2МЮА (а, $\times 100$) и 40X (б), подвергнутых ИА

бине для обеих исследованных сталей, благодаря большой глубине слоя с высокой твердостью, изделия после ионного азотирования могут характеризоваться высоким ресурсом на изнашивание. Так, ресурсные испытания на ОАО «МЗШ» и ОАО «Белкард» в 2019 г. штамповой оснастки из сталей 4X5МФС и 5XНМ, подвергаемой при эксплуатации циклическому нагреву с охлаждением, показали повышение стойкости инструмента в 2,1–3,8 раза.

Области применения полученных результатов. По имеющимся публикациям и собственному опыту сотрудничества с более чем 130 предприятиями Беларуси, России и Молдовы, ионному азотированию могут подвергаться детали и инструменты с габаритными размерами от нескольких миллиметров до изделий длиной до 14 м и массой до 26 т во многих отраслях промышленности, в том числе:

- цилиндры, плунжеры, валы, оси, прецизионные винты, шпиндели, пиноли и направляющие в станкостроении и нефтехимическом машиностроении;
- экструзионные шнеки, цилиндры, матрицы, пресс-формы и другие детали машин для переработки пластмасс и получения алюминиевого профиля;
- различные виды зубчатых колес общего машиностроения и автомобильной индустрии;
- ковочные штампы и пресс-формы для литья сплавов и обработки металлов под давлением;
- режущие инструменты: фрезы, долбяки, сверла и т. п.;
- уплотнительные кольца из сталей и высокопрочных чугунов, гильзы цилиндров ДВС;
- ответственные прецизионные детали авиадвигателей из титановых сплавов;
- пружины клапанные и тарельчатые и многие другие.

Упоминания в литературе о поверхностном упрочнении деталей с отверстиями немногочисленны. В ФТИ НАН Беларуси имеется опыт ионного азотирования внутренней части стальных гильз цилиндров ДВС (рисунок 8), на УЧНПП «Технолит» поставлена промышленная установка для выполнения этой операции.



Рисунок 8 – Стальные гильзы цилиндров ДВС после ИА



Рисунок 9 – Полуавтоматическая винтовка POF RENEGADE PLUS 556NATO 16.5 30RD (а) и пистолет-пулемет АК-V (б)

В [9] на основе исследований на экспериментальной установке образцов небольших габаритов из стали 38ХМЮА сделано предположение о возможности выполнения ИА в режиме полого катода внутренней поверхности цилиндра скважинных штанговых насосов, однако сообщения о реализации в промышленных масштабах этого предположения авторов отсутствуют. Внутренний диаметр цилиндра в разных моделях насосов – 26,99–95,25 мм, рабочий ход плунжера в цилиндре составляет 1 200–4 000 мм [14]. Представляется, что при таких размерах для создания эффекта полого катода и обеспечения равномерного нагрева и азотирования изделия достаточно сложно обеспечить эквидистантное размещение технологического экрана-сетки на расстоянии 3–5 мм от поверхности изнутри изделия при соблюдении указанных в [9] режимов: нагреве до температур 550 °С в течение 8 ч.

Имеются отдельные публикации касательно применения азотирования для упрочнения изделий оборонной тематики, в том числе стволов стрелкового оружия.

Традиционно на внутреннюю поверхность канала в стволе стрелкового оружия наносится гальваническим методом слой хрома, в котором после некоторого числа выстрелов обнаруживаются дефекты в виде сетки трещин, радиальных трещин, продолжающихся в материал основы, отслоившиеся от основы фрагменты слоя хрома из-за недостаточной адгезии покрытия к основе [3]. Исходя из стремления отказаться от этой экологически опасной технологии, разработчиками в различных странах мира проводятся исследования по замене хромирования на процесс азотирования. Другим очевидным преимуществом отказа от хромирования в пользу азотирования является отсутствие проблемы плохой адгезии покрытия к основе (при азотировании формируется не покрытие, а диффузионный слой).

В Польше совместными усилиями трех организаций (Instytut Mechaniki Precyzyjnej, Wojskowa Akademia Techniczna и Fabryka broni) проведены исследования по выбору режимов газового азотирования стали 38НМЖ, которую предполагалось использовать вместо 30НН2МФА, применяемой для изготовления стволов стрелкового оружия калибром 5,56 мм [3]. После упрочнения по наилучшему режиму выполняли испытания путем проведения 10 000 выстрелов и контролировали состояние материала, подверженного воздействию значительных механических, тепловых и коррозионных воздействий. В результате таких воздействий вблизи поверхности появляются и растут микротрещины двух типов – радиальные и окружные, что авторы связывают в том числе с наличием на поверхности достаточно толстого (до 17 мкм) хрупкого нитридного слоя. Однако технология газового азотирования не дает возможности получать диффузионные слои без слоя соединений. Следует отметить, что ионное азотирование стали позволяет легко избежать этой проблемы.

Сообщается, что ряд производителей в США используют в промышленных масштабах азотирование (без указания метода) стволов стрелкового оружия (рисунок 9), в том числе моделей Patriot Ordnance Factory RENEGADE PLUS 556NATO 16.5 30RD калибра 223 Remington/5.56 NATO [15] и пистолета-пулемета Palmetto State Armory АК-V калибра 9x19 мм (созданный на базе ПП-19–01 «Витязь») [16]. Ствол модели АК-V выполнен из стали AISI/SAE 4150 (аналоги – стали 40ХФА и 38ХМА), которая хорошо подвергается азотированию и широко применяется для изготовления различных деталей (шестерен, валов, шпинделей и т. п.) авиакосмического назначения, в нефтегазовой, автомобильной, сельскохозяйственной промышленности.

В дальнейших исследованиях большое внимание будет уделено оптимизации режимов ионного азотирования разнообразных дета-

лей, имеющих труднодоступные участки поверхности, которые невозможно подвергать поверхностному упрочнению другими существующими методами инженерии поверхности.

Заключение. Изделия, имеющие углубления и отверстия, являются трудным объектом для реализации практически всех методов инженерии поверхности.

Показана возможность получения диффузионного слоя, равномерного при длине изделия до 2 500 мм, глубиной 230–270 мкм с микротвердостью материала HV50 550–600 (для стали 40Х) и соответственно 290–330 мкм и HV50 750–800 (для стали 38Х2МЮА) на внутренней поверхности отверстий в деталях. Возможность варьирования параметрами процесса азотирования дает возможность управлять свойствами упрочненного материала и эксплуатационными характеристиками изделий в широких пределах, в том числе внутренних поверхностей отверстий в длинномерных деталях, которые невозможно обработать иными способами.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б. Н. Арзамасов, А. Г. Братухин, Ю. С. Елисеев, Т. А. Панайоти. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – 400 с.
2. Nell, R. W. New gas nitriding technique using the interior of the nitrided pressure vessel as the process chamber / R. W. Nell, M. Kleingeld, L. Liebenberg // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2016. – V. 116. – N 1. – P. 65–72.
3. Latas, Z. Azotowanie regulowane luf broni strzeleckiej / Z. Latas, J. Michalski, J. Tacikowski, M. Betiuk // Inzynieria powierzchni. – 2013. – N 1. – S. 26–33.
4. Nisbett, E. G. Steel forgings: design, production, selection, testing, and application // ASTM International, Materials Park. – Ohio, USA, 2005. – 135 p.
5. Katoh, T. Plasma assisted nitriding for micro-texturing martensitic stainless steels / T. Katoh, T. Aizawa, T. Yamaguchi // Manuf. Rev. – 2015. – V. 2. – N. 2.
6. Farghali, A. Phase transformation induced by high nitrogen content solid solution in the martensitic stainless steels / A. Farghali, T. Aizawa // Mater. Trans. – 2017. – V. 58. – P. 697–700.
7. Blawert, C. Structure and composition of expanded austenite produced by nitrogen plasma immersion ion implantation of stainless steels X6CrNiTi1810 and X2CrNiMoN2253 / C. Blawert, B. L. Mordike, Y. Jiraskova, O. Schneeweiss // Surf. Coat. Technol. – 1999. – V. 116. – P. 189–198.
8. Aizawa, T. Low temperature plasma nitriding of inner surfaces in stainless steel mini-/micro-pipes and nozzles / T. Aizawa, K. Wasa // Micromachines – 2017. – V. 8, 157; doi:10.3390/mi8050157.
9. Хусаинов, Ю. Г. Перспективы использования ионного азотирования с эффектом полого катода для упрочнения рабочих пар скважинных насосов / Ю. Г. Хусаинов, И. С. Копейкин, А. Е. Тихонов // Нефтегазовое дело. – 2015. – Т. 13. – № 1. – С. 137–140.
10. Pokorný, Z. Hardness of plasma nitrided layers created at different conditions / Z. Pokorný, J. Kadlec, V. Hruby, M. Pospichal, Dung Q. Tran, T. Mrazkova, L. Fecso // Chem. Listy. – 2011. – V. 105. – P. 717–720.
11. Босьяков, М. Н. Новое оборудование ионно-плазменного азотирования / М. Н. Босьяков, С. В. Бондаренко, А. С. Бондаренко, Д. В. Жук, И. Л. Поболь // Сварщик (Украина). – 2013. – № 3. – С. 30–34; Сварщик в России. – 2013. – № 4. – С. 36–40.

12. Былицкий, В. В. Управляемое ионное азотирование шестерен большого диаметра на промышленном оборудовании / В. В. Былицкий, В. В. Рудый, М. Н. Босняков, И. Л. Поболь // *Металлургия и машиностроение Беларуси: итоги и перспективы научного обеспечения* : сборник статей / Под ред. Е. И. Маруковича и А. А. Шипко. – Минск : Беларуская навука, 2016. – С. 208–222.
13. Поболь И. Л. Исследование формирования упрочненных слоев на титановых сплавах методом ионно-плазменного азотирования / И. Л. Поболь, И. Г. Олешук, А. Н. Дробов, Сун Фун, Ван Лин // *Весці Нац. акад. навук Беларусі. – Сер. физ.-тэхн. навук.* – 2019. – Т. 64, № 1. – С. 25–34.
14. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.drillings.ru/skvazhnasos>.
15. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.rdfgun.com/Pof-Renegade-Plus-556-165-30rd-Brz_p_16861.html.
16. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://palmettostatearmory.com/psa-ak-v-9mm-railed-moe-sba3-pistol-black-5165450179.html>.

11.11.2019

POBOL I. L. Ion nitriding of workhole surfaces in the long-length steel parts

The problems of surface hardening of workholes and recesses in parts using nitriding method are considered. The results of surface treatment in long-length products made of 38Kh2MYuA and 40Kh steels up to 2,500 mm long by ion nitriding are presented. It has been shown that nitrided layers with a thickness of up to 330 μm and a microhardness of up to HV 550-600 (for steel 40 Kh) and up to HV 750-800 (for steel 38Kh2MYuA) can be obtained on the hole surface, which should be accompanied by a significant increase in the wear resistance of hardened products.

UDC 621.793

**Sokorov I. O., Vanuk E. A., Ghazban Zadeh E.,
Kuis D. V., Levantsevich M. A., Lobko D. N.**

RESEARCH ON WEAR RESISTANCE AND FRICTION COEFFICIENT OF GAS-THERMAL COMPOSITE COATINGS WITH THE ADDITION OF NANO CARBON COMPONENTS WITHOUT LUBRICANTS

The Branch Research Laboratory "Plasma and laser technology" is developing a technology for introducing Nano carbon components into powder materials.

At the first stage of research into the coatings (table 1), Nano carbon was added in the materials (2% of the total volume of powder materials).

Table 1 – Powder materials without Nano carbohydrates.

	Name	Chemical composition
1	ПГ-СР4	Base: Ni; 13-17%Cr; 0,6-1% C; 3-5% Si; 2,5-4%B; 4%Fe
2	ПР-БрОНСР	Base: Cu; 8% Sn; 5% Ni; 1%Si; 1%B
3	ПН-НД-42	Base: Ni – Cu; 42,5%Cu; 0,2% C; 0,9%Si; 1% B; до 3%Fe
4	ПР-Х4ГСР	Base: Fe; 3,8% Cr; 1,2% C; 2,5% Si; 2,2% B; 0,5% Cu
5	ПГ-19М-01	Base: Cu; 4% Fe; 8,5-10,5% Al
6	ПТ-ЮНХ16СР3	Base: Ni; 0,7% C; 16% Cr; 3,2% Si; 2,6% B; 1,2% Al

Due to the 2% error of the equipment, obtaining clear results of the influence of Nano carbon was impossible. It was decided to increase the amount of nanocarbon in 10% of the total volume of powders.

The mixing of Nano carbon components and powder materials was carried out mechanically. Disks made of steel 45, with a thickness of $h = 4$ mm and a diameter of $d=70$ mm with a hole $d=30$ mm, were used as the basis for spraying. Coating was performed by flame method and reflow sub layer. It should be noted that not all materials interacted with nanocarbon. And coating No. 2 during reflow began to boil and release bubbles, so the integrity of the coating was broken and this coating was removed in further studies. After spraying, the samples were ground to a roughness of Ra3.2.

Tests for wear resistance and friction coefficient were carried out as follows: the sample was degreased and weighed, then fixed in a self-centering cartridge of the equipment and determined the face runout of the sample within 3 μm . The friction body (indenter) is brought to the sample on a

tripod, which was also weighed in advance. The modes of testing the coefficient of friction: test time $t = 60$ min, linear speed of rotation of the sample $v = 5$ m / s. The rotation frequency of the part $n = 1837.33$ rpm; the friction path was $S = 18000$ m; friction force $F = 0.206$ N, Indenter spherical with radius $R = 1$ m. Track diameter $d = 30$ mm, Specific pressure at the point is $P_0 = 7.8$ MPa.

A strain gauge sensor was connected to the indenter, which recorded the friction force. The value of the friction force was fixed continuously in the form of an oscillogram. The friction coefficient was determined by the ratio of the friction force to the normal load and was recorded every 5 minutes (12 times). At the end of the tests, the sample and indenter were degreased and weighed. The tests were carried out without lubricants.

During the study, the friction coefficient of composition No. 1 in the coating with the addition of 10% Nano carbon increased to 25 minutes, after which it began to decline. In a coating without Nano carbon, the friction coefficient increased to 10 minutes and after 5 minutes began to decrease. Subsequently, the friction track was analyzed for the samples. Brown oxides were formed in the sample with the addition of Nano carbon, which did not appear in the composition without Nano carbon. The track had scratches and holes. As a result, the friction coefficient of composition No. 1 with the addition of Nano carbon compared with the same composition without Nano carbon increased by 90%. The effect was negative.

In the study on the friction coefficient of composition No. 3, the friction coefficient of the coating with the addition of Nano carbon changed in a sinuous and had the greatest value in time from 35 to 45 minutes. The friction coefficient of the coating without Nano carbon also changed in a sinuous shape, but at the 35th minute the coating was run-in. On the friction track, both the composition with Nano carbon and the composition without Nano carbon was formed a weak appearance of brown oxides. The tracks had easy scratches and holes. The result of the research: the friction coefficient of composition No. 3 with the addition of Nano carbon increased by 11.6% compared with the same composition without Nano carbon. The effect was negative.

In the study, the coefficient of friction of the coating with the addition of Nano carbon of composition No. 4 did not change and had a stable value,

Sokorov I. O., Vanuk E. A., Lobko D. N., *Belarusian National Technical University, Faculty of Mechanical Engineering, Minsk, Republic of Belarus.*

Ghazban Zadeh E., *BPPC «BEL PEKA PAINT», Minsk, Republic of Belarus.*

Kuis D. V., *Belarusian State Technological University.*

Levantsevich M. A., *the State Scientific Institution «The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus».*