

3. Правила классификации и постройки морских судов. НД № 2-020101-077. — Т. 2.
4. Сильфоны. Расчет и проектирование / под ред. Л. Е. Андреевой. — М.: Машиностроение, 1975. — 156 с.

УДК 621.384.6;620.178.16

С. Г. Чулкин,

д-р техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

В. М. Петров,

д-р техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

А. А. Буцанец,

ведущий специалист по НТП
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ СУДОВОЙ ЗАПОРНОЙ АППАРАТУРЫ

PROMISING TECHNOLOGICAL METHODS TO INCREASE WEAR RESISTANCE OF SURFACES OF SHIP LOCKING DEVICES PARTS

В статье приведены данные о существующих технологиях ионно-лучевой обработки поверхностных слоев ответственных деталей, применяемых в судостроении и машиностроении с целью повышения их эксплуатационных свойств. Дана классификация видов данной обработки. Отмечены их достоинства и недостатки. Отдельно рассмотрены вопросы технологии ионной азотации.

In article the data about existing technologies of ion-beam processing of the surface layers of the critical parts used in shipbuilding and engineering to improve their operational properties are given. A classification of the species of the given processing is presented, their advantages and disadvantages are marked. The problems of ion nitration technology are considered separately.

Ключевые слова: судовые трубопроводы, запорная арматура, технологии упрочнения, ионная имплантация, азотирование поверхностей.

Key words: marine pipelines, stop valves, technologies of hardening, ion implantation, surface nitration.



ЛЕМЕНТЫ судовой запорной трубопроводной арматуры работают в тяжелых условиях эксплуатации. Транспортируемые жидкости по трубопроводам и элементам запорной аппаратуры находятся под давлением и, как правило, нагреты до 300 °С. Высокие температуры в совокупности с агрессивными свойствами и химической активностью органических перегретых теплоносителей негативно влияют на состояние поверхностей внутренних элементов запорной аппаратуры (уплотнительные втулки, сильфоны, клапаны, седла и т. п.), что приводит к общему снижению работоспособности и сокращению срока службы изделия. Для функциональных деталей запорной арматуры широко применяют высоколегированные коррозионно-стойкие стали согласно ГОСТ 5632, наплавочные износостойкие покрытия СТ ЦКБА 053-2008. Однако повышение эксплуатационных свойств методом наплавки не всегда дает желаемый результат,

а в отдельных частных случаях исполнения запорной трубопроводной аппаратуры экономически нецелесообразно. Поэтому актуально стоит вопрос о возможном применении других методов высокоэнергетического воздействия на функциональные поверхности элементов запорной аппаратуры. Ниже приведен обзор метода ионной лучевой обработки поверхностных слоев деталей как один из наиболее перспективных.

1. Перспективные методы ионно-лучевой обработки для повышения износостойкости поверхностей ответственных деталей судовой запорной аппаратуры.

Среди основных методов ионно-лучевой обработки (ионной имплантации) поверхности конструкционных материалов, применяемых в судостроении и машиностроении, можно выделить [1]:

1) ***вакуумное испарение.*** Основная суть метода сводится к осаждению паров материала. Толщина слоев достаточна для решения триботехнических задач судостроения;

2) ***молекулярная эпитаксия.*** Суть метода заключается в создании термически генерированных молекулярных пучков в ультравысоком вакууме до 10^{-5} – 10^{-6} . Недостаток — высокая стоимость и сложность процесса, низкая производительность, трудности получения хорошей адгезии делают применение метода для получения износостойких покрытий неперспективным;

3) ***осаждение посредством ионного распыления.*** Метод основан на высокоэнергетическом воздействии вылетающих ионов с атомами поверхности твердого тела. Технология, реализующая данный метод, может быть применена для решения отдельных инклюзивных и специфических задач судостроения;

4) ***ионно-плазменное напыление.*** Осаждение материалов ведется из плазмы (тлеющий разряд в плазме, среды инертного газа) на деталь, находящуюся под отрицательным потенциалом, значение которого достигает 10^3 В. Метод перспективен для задач судостроения и позволяет получать пленки равномерной толщины с хорошей адгезией к подложке. К недостаткам ионно-плазменного напыления можно отнести большое число параметров, активно влияющих на структуру и свойства получаемых покрытий. Это делает задачу оптимизации технологического процесса сложной;

5) ***ионная имплантация.*** Суть метода весьма проста и заключается в поверхностной обработке изделия ионами с энергией выше $3 \cdot 10^{-18}$ Дж, достаточной для внедрения в поверхностные слои материала. Технологически реализуют три энергетических диапазона ионной имплантации: низкоэнергетическая (10^{-17} – 10^{-16} Дж), имплантация ионов средних энергий (10^{-15} – 10^{-14} Дж), высокоэнергетическая имплантация ($10^{-(15...13)}$ Дж и выше). Наиболее перспективной в судостроении сегодня представляется имплантация ионов средних энергий;

6) ***имплантация атомами отдачи и ионное перемешивание.*** Эти методы являются разновидностями ионной имплантации. Они основаны на изменении свойств, связанных с внедрением не первичных высокоэнергетических ионов в легируемый материал, а атомов отдачи из ранее нанесенной одним из вышеперечисленных методов тонкой пленки. Процесс протекает в газовой среде, что, в свою очередь, позволяет синтезировать карбиды или нитриды. Преимущество — более низкие дозы энергии, чем в методе прямой имплантации. Недостатком является динамическое перемешивание легирующих веществ. Метод перспективен для задач судостроения;

7) ***совмещенные методы формирования покрытий.*** Технология реализует комплексный подход, где покрытие формируется в условиях одновременной бомбардировки пучком высокоэнергетических ионов, или серию последовательных операций осаждения и имплантации. Суть работы — совместить преимущества методов напыления и легирования.

2. Обеспечение износостойкости ионно-легированных слоев. Методы ионного азотирования.

Существуют разные методы насыщения поверхностных слоев материалов азотом [2]. Наиболее перспективным для решения триботехнических задач трубопроводной аппаратуры является метод ионного азотирования. По сравнению с обычным газовым методом обладает рядом преимуществ.

ществ — более низкая энергоемкость, экологическая чистота, приспособленность к полной автоматизации.

Теоретические основы процесса разработаны в начале XXI века. Исходя из современных теоретических представлений, основным элементом, насыщающими поверхностные слои, является атомарный азот, который, в отличие от существующей технологии газового (печного) насыщения, позволяет избежать наводораживания металла и исключить охрупчивание.

Основные преимущества ионного азотирования перед обычным газовым заключаются в следующем:

- уменьшение общего цикла процесса в 1,5–3 раза;
- инжиниринг диффузионного слоя;
- отсутствие силовых деформаций и дефектов поверхности;
- низкая шероховатость поверхности;
- возможности обработки сталей с высоким содержанием хрома за один технологический цикл;
- большая экономичность процесса;
- повышенный КПД установки;
- сокращение расхода газов;
- большая экологическая чистота.

Сравнение двух методов ионного азотирования для различных сталей приведено в табл. 1 согласно данным работы [3].

Таблица 1

Режимы, глубина и твердость поверхностного слоя после ионного азотирования

Марка стали	Температура азотирования	Азотирование в тлеющем разряде			Ионное азотирование в модуле при давлении азота, $6 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.	
		Время, ч	Эффективная толщина слоя	Поверхностная твердость, H_{μ}^{50}	Поверхностная микротвердость, H_{μ}^{200}	Эффективная толщина слоя, мкм
40X13	550	1	15–20	900–1000	1060–1200	40–45
X12	510	1	25–30	1000–1100	1100–1200	42–49
5XHM	550	1	70–80	660–740	800–850	80–90
40X	500	1	50–55	680–760	780–850	110–120
ХВГ	500	1	55–60	780–850	850–900	65–70
12X18H10T	550	1	8/13	760–900	900–1140	5–7
45	550	1	50	380–440	380–400	80–90
P6M5	600	1	50–55	1130–1200	1200–1300	25–35

На практике возможны два варианта реализации схемы ионного азотирования. В обоих случаях концентрация плазмы в технологической камере и ее качественный состав будут определяться родом используемых плазмообразующих газов, их давлением и током разряда. Характеристики плазмы будут определять плотность потока и характер частиц, бомбардирующих поверхность,

подвергаемую азотированию. Энергия же *ионной компоненты потока* может регулироваться независимо образом путем изменения напряжения смещения на обрабатываемых деталях ($U_{\text{дет}}$) [3].

Данные работ [4, р. 3–9; 5] позволяют записать выражение для оценки величины падения напряжения на разрядном или основном разрядном промежутках U_p для случая низких давлений, когда пограничные слои между плазмой и электродами будут бесстолкновительными:

$$U_p = \frac{W_{0_k}}{e \xi_{1k} \xi_2 \gamma_{\text{эф}}} \left[1 + \frac{i_{\text{евн}} (1 + U_{\text{евм}} / U_p) \xi_{1\text{вн}}}{j_{ik} S_k \gamma_k (W_{\text{евн}} / W_{0_k}) \xi_{1k}} + \frac{\gamma_{\text{дет}} S_{\text{дет}} (1 + U_{\text{дет}} / U_p) \xi_{1\text{дет}}}{\gamma_k S_k (W_{\text{дет}} / W_{0_k}) \xi_{1k}} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где W_{0_k} , $W_{\text{евн}}$ и $W_{\text{дет}}$ — средние затраты энергии на один акт ионизации, совершаемой быстрым катодным электроном; e — заряд электрона; ξ_{1k} , $\xi_{1\text{вн}}$, $\xi_{1\text{дет}}$ — доля энергии, растрачиваемая быстрыми катодными внешними электронами или электронами из обрабатываемых деталей на ионизацию до их ухода из разрядной области; ξ_1 — доля ионов, приходящаяся на катод основного разряда из всех образований в объеме газоразрядной камеры; j_{ik} — плотность ионного тока на катode; S_k , $S_{\text{дет}}$ — площади катода основного разряда и поверхности обрабатываемых деталей; eU_p , $eU_{\text{евн}}$, $eU_{\text{дет}}$ — энергия быстрых электронов с катода; $\gamma_{\text{эф}}$ — эффективный коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии катода основного разряда:

$$\gamma_{\text{эф}} = \gamma_k + (1 + \gamma_{\text{дет}}) \frac{S_{\text{дет}}}{S_k} + \frac{i_{\text{евн}}}{j_{ik} S_k}, \quad (2)$$

где γ_k , $\gamma_{\text{дет}}$ — коэффициенты вторичной электронно-ионной эмиссии материала катода основного разряда и деталей; $i_{\text{евн}}$ — ток электронов, инжектируемых в основной разрядный промежуток от вспомогательного источника, определяется согласно работам [6, р. 103–108; 7, р. 93–101; 8, р. 387–394; 9].

Плазма будет проникать в полость только в том случае, если характерный размер полости R , будет удовлетворять неравенству $R > d_{\text{сл}}$ ($d_{\text{сл}}$ — размер пристеночного слоя между поверхностью детали и плазмой), а $d_{\text{сл}}$ можно оценить из выражения

$$d_{\text{сл}} = \left(\frac{5,48 \cdot 10^{-8} U_{\text{дет}}^{3/2}}{\sqrt{\tilde{A}} j_{i_{\text{дет}}}} \right)^{0,5}, \quad (3)$$

где $\tilde{A}$ — усредненная атомная масса ионов, бомбардирующих обрабатываемое изделие.

Представленные зависимости можно вставить в алгоритм блока управления процессом управления ионного азотирования деталей.

В результате ионного азотирования можно улучшить следующие характеристики деталей запорного узла судовой арматуры: золотник, седло клапана.

В целом азотирование повышает теплостойкость поверхностей, что позволяет снизить коэффициент трения и повысить антифрикционные свойства.

Заключение

Инновационные установки ионно-плазменного азотирования позволяют комплексно использовать разные рабочие газовые среды, регулируемые по составу смеси водорода, азота и аргона, а также плазму «пульсирующего», а не постоянного тока, технологичность процесса ионного азотирования существенно возросла.

По сравнению с постоянным импульсный тлеющий разряд обеспечивает:

- стабильность процесса;
- отсутствие электрических дуг во время протекания технологического процесса;
- надежное покрытие плазмой обрабатываемых поверхностей;
- повышение производительности и качества обработки.

Технологическими факторами, влияющими на эффективность ионного азотирования, являются температура процесса, продолжительность насыщения, давление, состав и расход рабочей газовой смеси. Температура обработки должна быть как минимум на 10–20 °С ниже температуры отпуска.

В целом, имеющиеся данные позволяют с оптимизмом говорить о больших возможностях технологии ионного азотирования применительно к возникающим задачам триботехнического плана при изготовлении и эксплуатации судовой запорной арматуры.

Список литературы

1. *Петров В. М.* Управление процессами контактного взаимодействия элементов трибосопряжения машин и технологических систем путем применения активных сред: дис. д-ра техн. наук: 05.02.04 / В. М. Петров. — СПб., 2004. — 335 с.
2. Теория и технология азотирования / Ю. М. Лахтин [и др.]. — М.: Металлургия, 1991. — 320 с.
3. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б. Н. Арзамасов [и др.]. — М.: МГТУ им. М. Э. Баумана, 1999. — 400 с.
4. Non-self maintained glow discharges for ion-beam and plasma technologies // *Vacuum Physics and Technology*. — 1993. — Vol. 1, № 1.
5. *Абрамов И. С.* Математическое моделирование приборов и устройств плазменной электроники / И. С. Абрамов, В. Т. Барченко. — СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 1999. — 72 с.
6. *Korhonen A. S.* A new low pressure plasma nitriding metod / A. S. Korhonen, E. H. Sirvio // *Thin Solid Films*. — 1982. — № 96.
7. *Sirvio E. H.* Abrasive wear of ion-playted titanium nitride coatings on plasma-nitrided steel surfaces / E. H. Sirvio, M. S. Sulonen, H. Sundquist // *Thin Solid Films*. — 1982. — № 96.
8. *Korhonen A. S.* Plasma nitriding and ion plating with an intensified glow discharge / A. S. Korhonen, E. H. Sirvio, M. S. Sulonen // *Thin Solid Films*. — 1983. — № 107.
9. Разработка технологии и элементов оборудования для вакуумно-дугового осаждения покрытий и модификации поверхностных слоев: отчет по НИР / СПбГЭТУ. — СПб., 1995.