

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ФИНИШНОГО ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСИМОГО НАНОПОКРЫТИЯ

ТОПОЛЯНСКИЙ А.П., ЕРМАКОВ С.А., ТОПОЛЯНСКИЙ П.А.

Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого,
НПФ «Плазмацентр», Санкт-Петербург, Россия

Приведены экспериментально-статистические исследования трибологических свойств покрытия SiOCN, наносимого при финишном плазменном упрочнении. Минимальный коэффициент трения может быть достигнут при нанесении покрытия с более высокими значениями тока дуги и расхода плазмообразующего газа, влияние толщины монослоя наносимого покрытия незначительно.

Ключевые слова: финишное плазменное упрочнение, износостойкое нанопокрывтие, трибологические испытания.

Experimental and statistical analysis of the tribological characteristics of the SiOCN coating layered by finishing plasma hardening. The minimal friction coefficient may be reached by deposition of the coating that has better level of the arc current and the plasma-supporting gas flow rate, the impact of the monolayer thickness of the coating is negligible.

Key words: PECVD by cold atmospheric plasma, finish plasma strengthening, wear-resistant nanocoating, tribological tests.

Методы исследований

Исходя из анализа известных методов исследования трибологических свойств [1-9] основная концепция выбора методологии измерения характеристик трибологических покрытий основывалась на их соответствии международным стандартам.

Для исследования трибологических характеристик тонкопленочных покрытий наносимых с использованием финишного плазменного упрочнения использовался трибометр Tribometer (CSM, Швейцария) (рис. 1), в котором трибоиспытания основаны на измерении тензодатчиком силы трения, возникающей при скольжении прижатого с заданным усилием к образцу сферического неподвижного контртела. При этом коэффициент трения определяется как отношение измеренной силы трения к усилию прижима. По результатам трибоиспытаний также оценивается кривая изменения коэффициента трения со временем (длительность приработки, время выхода на постоянный уровень, повышение или его снижение), ширина и глубина следа износа, износ контртела.

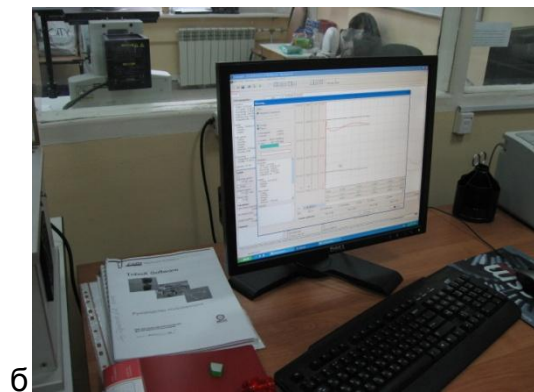


Рис. 1. Общий вид трибометра Tribometer (CSM, Швейцария) - (а) и вид протокола испытания на компьютере - (б)

Ширина следа износа после трибоиспытаний определялась на инвертированном металлографическом микроскопе Olympus GX 51.

Трибологические измерения проводились по схеме «ball-on-disk» («шар-диск») в соответствии с международными стандартами ASTM G99-959, DIN50324 и ISO 20808 с использованием контртела (шара диаметром 3 мм), изготовленного из карбида кремния SiC (для сухого трения) и нитрида кремния Si₃N₄ (для трения в условиях смазки). Нагрузка на контртело - 5 Н. Линейная скорость - 10 см/с. Путь трения - 100 м при сухом трении и 80 м при трении со смазкой. В качестве смазки использовалось синтетическое моторное масло Nissan SAE 5W 40.

Материал подложки термообработанная быстрорежущая сталь P18 (твердость 60-62 HRC), исходный параметр шероховатости *Ra* - 0,32 мкм.

Экспериментально статистические исследования трибологических свойств покрытия SiOCN, нанесенного при финишном плазменном упрочнении

Технология финишного плазменного упрочнения (ФПУ) – многопараметрический процесс, характеризующийся значительным количеством разнообразных факторов, влияющих на качество осаждаемого покрытия. Расчетным путем можно оценить только некоторые параметры режима технологического процесса, например, связанные с тепловым воздействием источника теплоты на изделия простой формы при существенной схематизации как источника теплоты, так и обрабатываемого изделия. В то же время полный комплекс параметров воздействия источника теплоты, конструктивные параметры оборудования, расходы газов, дистанция обработки, скорость осаждения покрытия, материал подложки более точно определяет тепловую обстановку и конечный результат свойств нанесенного покрытия. На практике изучение влияния этих факторов возможно только при применении экспериментальных методов.

Определение оптимальных технологических режимов ФПУ основана на применении статистических моделей метода планирования многофакторных экспериментов, их обработке и анализе. Результатом является получение эмпирических уравнений регрессии, которые могут быть использованы для разработки инженерных оценок выбора и корректировки режимов исследуемого процесса, а также автоматизации его проектирования. Для изучения технологии нанесения трибологических покрытий с использованием ФПУ наиболее важным является отыскание оптимальных условий, минимизирующих основной трибологический параметр – коэффициент трения, а также феноменологическое изучение механизмов влияния на этот параметр технологических режимов с построением статистических моделей.

При разработке технологического процесса нанесения функционального покрытия при ФПУ и нахождении трибологических характеристик покрытия в качестве параметров оптимизации были выбраны следующие: коэффициент трения, глубина износа (связанная с суммарным износом испытываемого образца и контртела), ширина дорожки износа, время приработки. Из данных параметров определяющим интегральным параметром, характеризующим трибологические свойства покрытия, является коэффициент трения.

Изменяющимися управляемыми факторами, для которых выполняется требование воспроизводимости, являющимися наиболее информативными и значимыми для данной технологии, приняты параметры, приведенные в табл. 1. При этом все остальные параметры процесса ФПУ стабилизировались.

Таблица 1. Факторы, основной уровень и интервалы варьирования технологического процесса нанесения покрытий для планируемого эксперимента

Переменный фактор	Ток дуги, I, А	Расход пл. газа, G _{пл} , л/мин	Толщина монослоя, δ, нм
Основной уровень	120	3,3	10
Интервал варьирования	20 (16%)	0,3 (9%)	6,1 (62%)
Верхний уровень	140	3,6	16,1
Нижний уровень	100	3,0	3,9

Для полного факторного эксперимента при количестве факторов, равном трем, общее число опытов составит:

$$N=2^3,$$

где N - число опытов; 2 - число уровней; 3 - число факторов полного факторного эксперимента.

Матрица планирования полного факторного эксперимента для трех факторов 2^3 с целью определения трибологических характеристик представлена в табл. 2.

Таблица 2. Матрица планирования полного факторного эксперимента для трех факторов 2^3 с целью определения трибологических свойств

Номер опыта	Ток, А	Расход плазм. газа, л/мин	Толщина монослоя, δ, нм	Трибологические свойства			
				Коэф. трения	Глубина износа, мкм	Ширина дорожки износа, мкм	Время приработки t , сек
0	120	3,3	10	0,055	3,1	138,5	560
1	100	3,0	3,9	0,077	3,4	118,0	500
2	140	3,0	3,9	0,095	3,8	114,1	20
3	100	3,6	3,9	0,079	2,9	116,2	480
4	140	3,6	3,9	0,024	2,8	103,4	150
5	100	3,0	16,1	0,08	3,0	108,7	220
6	140	3,0	16,1	0,04	2,4	101,0	40
7	100	3,6	16,1	0,036	2,4	114,0	80
8	140	3,6	16,1	0,008	2,4	91,3	80

После реализации плана эксперимента для коэффициента трения получаем следующую линейную модель матрицы 2^3

$$K = 0,05 - 0,013 I - 0,018 G_{пл} - 0,011 h,$$

где K - коэффициент трения, I - ток дуги, $G_{пл}$ - расход плазмообразующего газа, h - толщина монослоя покрытия.

Коэффициенты при парных взаимодействиях по модулю существенно (на порядок) меньше линейных коэффициентов, поэтому являются незначимыми.

Чтобы оценить степень влияния факторов вне зависимости от величины интервалов варьирования после отбрасывания незначимых коэффициентов уравнение регрессии можно привести к относительному виду:

$$\Delta K/K = - 1,418 \Delta I/I - 3,6 \Delta G_{пл}/G_{пл} - 0,33 \Delta h/h$$

Анализ уравнения регрессии в относительном виде показывает, что с увеличением тока дуги, расхода плазмообразующего газа и толщины монослоя коэффициент трения падает. Наибольшее влияние на коэффициент трения оказывает расход плазмообразующего газа.

Выводы

На основании проведенных исследований минимальный коэффициент трения может быть достигнут при нанесении покрытия с более высоким тепловложением в обрабатываемое изделие (при повышенных значениях тока дуги и расхода плазмообразующего газа). При этом влияние расхода плазмообразующего газа по сравнению с током дуги является определяющим. Толщина монослоя наносимого покрытия является менее значимой величиной.

Литература

1. Карасик И.И. Методы трибологических испытаний в национальных стандартах стран мира. Под ред. проф. В.С. Кершенбаума. М., Центр «Наука и техника». - 1993. - 328 с.
2. Тополянский П.А., Тополянский А.П., Ермаков С.А., Дунаев А.В., Поджарая К.С. Аттестация трибологических свойств упрочняющих тонкопленочных покрытий. Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 8, С. 20-29
3. Тополянский П.А., Тополянский А.П., Ермаков С.А., Соснин Н.А. Трибологические характеристики износостойких тонкопленочных покрытий. Трибология и надежность: сборник труд. XIV Междунар. науч.-техн. конф., 17-19 сентября 2014 г. / гл. ред. К.Н. Войнов. - Санкт-Петербург: Нестор-история, 2014. - С. 263-275
4. Тополянский П.А., Тополянский А.П., Ермаков С.А. Методология выбора трибологических покрытий. Повышение износостойкости и долговечности машин и механизмов на водном транспорте. Труды 5 Международного симпозиума по транспортной триботехнике «Транстрибо-2013», 10-11 октября 2013 г., СПб. ГУМРФ им. Адмирала С.О. Макарова, 2013. - С. 314-320
5. Горленко А.О., Сканцев В.М., Шупиков И.Л., Ерохин А.Н., Тополянский П.А., Тополянский А.П. Технология нанесения упрочняющего нанопокрyтия с целью повышения износостойкости поверхностей трения // Наукоемкие технологии в машиностроении. - 2013. - №6 (24) - С. 24-32
6. Каменева А.Л., Караваев Д.М., Пепелишев А.В., Пименова Н.В. Методики изучения трибологических характеристик пленок. Технология металлов. - 2012. - № 2. - С. 34-38
7. Каменева А.Л., Караваев Д.М., Пепелишев А.В., Пименова Н.В. Методики изучения трибологических характеристик пленок. Технология металлов. - 2012. - № 3. - С. 48-52
8. Левашов Е.А. Обеспечение единства измерений физико-механических и трибологических свойств наноструктурированных поверхностей. Мир гальваники. 1-9. <http://echemistry.ru/assets/files/stati/gw-levashev-e.a..pdf>
9. Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Колмаков А.Г., Рыбакова Л.М. Методы испытаний на трение и износ. М: «Интермет Инжиниринг», 2001. - 152 с.
10. Гриб В.В., Лазарев Т.Е. Лабораторные испытания материалов на трение и износ. - М.: Наука. - 1968. - 141 с.
11. Ясь Д.С., Подмоков В.Б., Дяденко Н.С. Испытания на трение и износ. Киев. - 1971. - 140 с.
12. Налимов В.В. Теория эксперимента. – М.: Наука, 1971, 208 с.