

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ УСТАЛОСТИ МАГНЕТРОННОГО ХРОМОВОГО ПОКРЫТИЯ ОТ ЕГО МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

С целью установления связи механических и усталостных характеристик покрытий выполнен аналитический обзор литературных источников. Выявлены основные показатели корреляционной связи усталостных и механических характеристик. Получены экспериментальные характеристики усталости хромового покрытия на рабочей поверхности из титанового сплава VT22. Разработана программа оптимизации механических характеристик с целью снижения усталости функционального хромового покрытия на изделиях из высокопрочного титанового сплава. Результаты актуальны при разработке ионно-плазменной технологии нанесения функциональных наноструктурированных покрытий.

З метою виявлення зв'язків між механічними і втомними характеристиками покриттів виконано аналітичний огляд літературних джерел. Виявлено основні показники кореляційного зв'язку втомних і механічних характеристик. Отримано експериментальні характеристики втомності хромового покриття на робочій поверхні з високоміцного титанового сплаву VT22. Розроблено програму оптимізації механічних характеристик з метою зниження втомності функціонального хромового покриття на виробках з високоміцного титанового сплаву. Результати актуальні при розробці іонно-плазмової технології нанесення функціональних наноструктурованих покриттів.

The literature is analytically reviewed for correlating mechanical and fatigue characteristics of coatings. The basic indices of correlation of fatigue and mechanical characteristics are revealed. Experimental characteristics for fatigue of chrome coating on the working surface from a VT22 titanium alloy are found. The program of the optimization of mechanical characteristics is developed for decreasing fatigue of functional chrome coating on the products from a high-resistant titanium alloy. The results are useful in developing an ion-plasma technology of functional nanostructured coatings.

Интегральным показателем качества деталей машин и механизмов является их способность противостоять разрушению. По статистическим данным, около 80 % разрушений деталей машин вызвано усталостными процессами. Разрушение из-за усталости происходит в результате накопления усталостных микротрещин на рабочих поверхностях деталей, которые и приводят к их разрушению. Одним из способов улучшения усталостных характеристик является модификация механических свойств рабочих поверхностей нанесением функциональных покрытий.

В данной работе поставлена задача улучшения усталостных характеристик цилиндрических рабочих поверхностей пар трения скольжения. Для оптимизации технологических режимов обработки рабочих поверхностей необходимо установление корреляционных связей между механическими и усталостными характеристиками функционального покрытия. Для оценки усталостных характеристик деталей используются различные методы испытаний. К сожалению, методики экспериментального определения усталостной долговечности характеризуются значительной трудоемкостью, а результаты ее определения имеют вероятностный характер и зависят от многих случайных факторов. Известно, что существует корреляция между механическими и усталостными характеристиками материалов. Знание корреляционных связей позволяет прогнозировать усталостные характеристики деталей и на этом основании проектировать технологию нанесения покрытий с наперед заданными механическими характеристиками рабочих поверхностей.

В известных монографиях [1 – 4] освещаются вопросы связи механических характеристик с показателями долговечности. Рассмотрим их.

Так как усталостные трещины образуются в поверхностных слоях, для повышения предела выносливости поверхностная структура материала

должна обладать максимально возможным сопротивлением деформации. Это достигается путем упрочняющей обработки рабочих поверхностей методом нанесения ионно-плазменных функциональных покрытий.

Критерием усталостной прочности материала (физическим пределом выносливости) является усталостная прочность материала σ_{-1} . Значение усталостной прочности при эксплуатации в режиме малоциклового нагружения находится в пределах до 0,6 предела прочности материала σ_b . Превышение данной величины приводит к катастрофическому разрушению. Другим важным показателем долговечности является циклическая долговечность N . Этот показатель численно равен количеству циклов нагружения, которое выдерживает материал перед разрушением.

Сопротивление усталости определяется сочетанием прочностных и пластических свойств конструкционного материала и упрочняющего покрытия. Эмпирически устанавливается связь между пределом выносливости и твердостью материала. Поверхностное упрочнение затрудняет зарождение усталостных трещин, но в случае снижения показателя пластичности распространение возникшей трещины может облегчаться. Благоприятного сочетания прочностных и пластических свойств добиваются измельчением структуры (зерна) и созданием композитных материалов. В наноструктурированных материалах развитие усталостных трещин затрудняется необходимостью перехода через межфазовую границу.

Грубые неоднородности и поверхностные дефекты являются концентраторами напряжений, способствующими зарождению усталостных трещин. Наиболее общими рекомендациями по эффективному повышению усталостных характеристик являются:

- упрочнение рабочего слоя;
- снижение шероховатости и коэффициента трения;
- создание сжимающих напряжений в поверхностном слое;
- повышение микро- и наноднородности структуры поверхностного слоя;
- увеличение напряжения начала пластической деформации в условиях циклического нагружения, т. е. сдвиг момента начала упруго-пластического перехода и начала разрушения.

На основании литературных данных, относящихся преимущественно к пределу выносливости при изгибе гладкого полированного образца круглого сечения, можно сформулировать основные закономерности влияния состава и структуры на сопротивление усталости. В нашей работе рассматриваются детали именно такой конфигурации.

В литературе приводятся эмпирически установленные, качественные зависимости σ_{-1} от других, сравнительно легко определяемых, механических характеристик поверхности. Для предварительных оценок иногда используют эмпирическое соотношение $\sigma_{-1} = 0,35 \div 0,5\sigma_b$. На усталостную прочность оказывают влияние и другие механические характеристики, например условный предел текучести $\sigma_{0,2}$.

Величина механических характеристик функционального покрытия в значительной степени определяется его структурными характеристиками, которые в свою очередь находятся в зависимости от технологических параметров нанесения. В [5] исследовалось влияние среднего размера структурного элемента (d) на предел выносливости и циклическую долговечность. Было установлено, что повышение предела выносливости находится в пря-

мой зависимости от измельчения структурных элементов покрытия. При этом достаточно хорошо выполняется соотношение типа Холла–Петча: $\sigma_{-1} \sim d^{-1/2}$.

В [6] сообщается, что в ионно-плазменных нитридтитановых покрытиях преобладают напряжения сжатия. В работе также установлено, что при нанесении нитрида титана существенно (до 25 %) повышается предел прочности и условный предел текучести материала. При этом значения показателей пластичности в некоторых случаях даже повышаются. Замечено, что значительное упрочнение поверхностного слоя происходит уже после предварительной обработки низкоэнергетическими ионами. Авторы [6] считают, что эти эффекты обусловлены комплексным влиянием многих факторов, среди которых наиболее значимыми являются формирование нанокристаллической структуры в поверхностном слое и залечивание поверхностных дефектов.

Влияние ионно-плазменных покрытий на усталостные характеристики обсуждается во многих работах. Однако анализ влияния строится в основном на основании применения нитридтитановых покрытий (TiN). Влияние ионно-плазменного хромового покрытия на характеристики усталости изучено недостаточно. Часто приводимые в публикациях данные оказываются достаточно противоречивыми и расходятся как в количественном, так и в качественном отношении. Так, в [7] сообщается, что нанесение TiN на лопатки компрессора повышало сопротивляемость усталостному разрушению. В работе [8] дается негативная оценка влиянию жесткого TiN покрытия, нанесенного на образцы из титанового сплава BT22. При испытании образцов на малоцикловую усталость усталостные характеристики высокопрочного титанового сплава существенно ухудшались. Правда, в случае нанесения ламинатного покрытия TiN-Ti-TiN наблюдалась явная тенденция к улучшению усталостных характеристик.

В работах [9, 10] исследовалось влияние толщины слоя моно- и многослойных покрытий на сопротивление усталости. Было показано, что размер структурного элемента (толщина бислоя композита или величина зерна d) влияет на σ_{-1} в соответствии с законом Холла–Петча. Делается вывод, что усталостная прочность покрытий может быть улучшена за счет уменьшения толщины слоев. Таким образом, выявляется определяющая роль структурного состояния покрытия для всех его функциональных и эксплуатационных характеристик.

В настоящее время прогресс в области модификации поверхностных свойств путем нанесения функциональных наноструктурированных ионно-плазменных покрытий обеспечивается пониманием и использованием размерных эффектов, возникающих при осаждении ионно-плазменных покрытий [11]. Наноструктурированные покрытия обладают физико-механическими характеристиками, существенно отличающимися от характеристик того же материала в массивном состоянии. Отмечается также зависимость механических свойств наноструктурированных покрытий от параметров технологического процесса.

Практически установлены закономерности управления свойствами покрытий в зависимости от условий их получения [12]. Показано, что имеется реальная возможность получения разнообразных структурных характеристик, что открывает перспективы получения покрытий с заданными прочностными свойствами [13]. В работе [14] выявлено влияние технологических факторов осаждения на переход хромовых покрытий от микрокристалличе-

ской структуры к нанокристаллической. В [14] показано, что наиболее мелкозернистая структура с размером зерна до 60 нм может формироваться в толстых (до 40 мкм) слоях хрома при магнетронном осаждении в «циклическом» режиме. При этом значение твердости покрытия достигает 18,7 ГПа и приближается к значениям нижней границы теоретической твердости хрома (21,3 ГПа). Для сравнения: твердость крупнозернистого литого хрома равняется около 1,8 ГПа. Обосновывается, что причиной такого повышения твердости является «циклический» режим осаждения, при котором облегчается взаимодействие поверхности конденсата с остаточной атмосферой вакуумной камеры. При этом в результате геттерного эффекта в покрытие внедряются атомы кислорода, обладающие более сильной химической связью с атомами хрома, чем связь атомов хрома между собой. В результате этого взаимодействия ликвидируются несплошности в границах зерен, то есть происходит упрочнение.

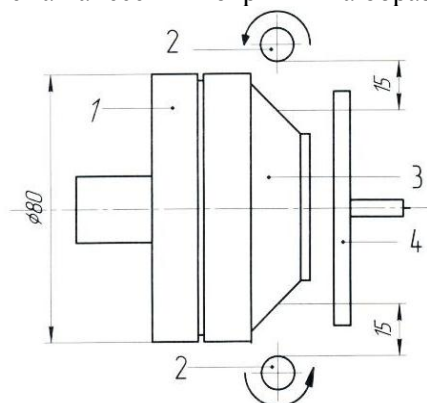
Механические свойства покрытий из наноматериалов хорошо характеризуются их твердостью H , упругим возвратом W_e (работа упругой деформации) и приведенным модулем Юнга $E^* = E/(1 - \nu^2)$. Здесь E – модуль Юнга и ν – коэффициент Пуассона. Сопротивление материала пластической деформации повышается в материалах с высокой твердостью и низким модулем Юнга. Низкий модуль Юнга покрытия предпочтителен, так как он допускает использование нагрузок, превышающих предельную для данного материала. Зависимости $H = f(E^*)$, $H^3/E^{*2} = f(H)$ и $W_e = f(H)$ (W_e – работа упругого восстановления) устанавливаются основные соотношения между механическими свойствами ионно-плазменных нанопокровтий, поскольку именно они определяют поведение тонкопленочных покрытий под действием механических нагрузок.

Результаты, полученные авторами рассмотренных работ, вселяют оптимизм относительно возможности улучшения функциональных и эксплуатационных характеристик хромовых покрытий рабочих поверхностей пар трения, полученных по магнетронной технологии с ионным ассистированием.

В данной работе была предпринята попытка экспериментального установления связи между циклической долговечностью титановых образцов с хромовым покрытием различной толщины и технологическими параметрами осаждения. Схема нанесения покрытия показана на рисунке. Магнетронное нанесение хромового покрытия производилось с предварительной ионной подготовкой поверхности вращающихся образцов. Покрытие наносилось с плазменным энергетическим ассистированием. В таблице ниже представлены режимные параметры и результаты испытаний образцов на циклическую долговечность. Испытания проводились на испытательном стенде ГП Антонов по стандартной методике. При испытаниях образцов фиксировалось количество рабочих циклов до разрушения при заданном максимальном напряжении цикла. К сожалению, из имеющегося ограниченного количества экспериментальных образцов было получено относительно малое количество образцов с кондиционным покрытием. Часть образцов была использована для предварительной отработки режима нанесения покрытия. Вследствие этого результаты испытаний имеют низкую статистическую достоверность. Основным выводом из эксперимента является необходимость совершенствования технологии нанесения покрытия с целью обеспечения воспроизводимости технологических режимов нанесения покрытия. Тем не менее, можно отметить, что усталостные характеристики образцов с качественным (по

результатам внешнего осмотра) покрытием близки к нормативным значениям.

Схема нанесения покрытия на образцы.



1 – Коническая магнетронная распылительная система (КМРС);
2 – образцы; 3 – катод магнетрона; 4 – анод магнетрона.

Таблица – Обработка образцов и результаты испытаний

Условия получения покрытия						Результаты испытаний				
№	P, Торр	U _{раз} , В	I _{раз} , А	T, мин	δ, мкм	σ, МПа	N, Кол. циклов	Оценка	Примеч.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	Камера откачивалась до давления 10 ⁻⁴ Торр. Аргон напускался до давления 2,5·10 ⁻³ Торр.	480	5,1	40	20	540	20915	н/конд.	Плохая адгезия	
2						301	3·10 ⁶	н/конд.		
3									Не обработ.	
4										
5		450	5,4	16	10	450	81180	н/конд.	Плохая адгезия	
6						397	181600	н/конд.		
7		460	5,3	20	10	326	3·10 ⁶	н/конд.	Перегрев	
8						337	3·10 ⁶	н/конд.	Перегрев	
9		490	5,1	20	10	351	181600	н/конд.	Перегрев	
10									норма	Не испыт.
11		490	5,1	30	15	350	103162	н/конд.	Перегрев	
12						360	79820		норма	
13		465	5,3	30	15	360	1708017		норма	
14									норма	
15		470	5,2	30	15	400	49481		норма	
16						400	38825		норма	
17		470	5,1	30	15	380	60718		норма	
18									норма	Не испыт.
19		500	5,0	30	15	380	66369		норма	
20									норма	Не испыт.

В колонках таблицы приведены следующие данные: 2 – давление в рабочей камере; 3, 4 – параметры разряда; 5 – время обработки; 6 – толщина покрытия; 7 – максимальное напряжение при циклическом нагружении; 8 – количество циклов до разрушения. Тем не менее, можно отметить, что усталостные характеристики образцов с качественным (по результатам внешнего осмотра) покрытием близки к нормативным значениям.

Обобщая литературные данные, можно утверждать, что улучшение усталостных характеристик рабочих поверхностей пар трения может быть достигнуто при нанесении наноструктурированного покрытия, обладающего повышенной прочностью и преимущественно сжимающими внутренними напряжениями. При уменьшении толщины покрытия можно ожидать повышения усталостных характеристик. Формирование в функциональном покрытии ламинатной структуры с толщиной бислоя $d < 100$ мкм оказывает положительное влияние на усталостные характеристики. Аналогичного эффекта можно достигнуть применением «циклического» режима нанесения покрытия. Для подтверждения выводов, полученных в результате обзора литературных источников и проведения предварительных экспериментов, необходимо проведение дополнительных исследований. В дальнейшей работе по настоящей тематике предполагается проведение экспериментальных работ по следующей программе:

1. Уточнение толщины слоя покрытия, допустимой из условий допустимого износа за период эксплуатации изделия;
2. Уточнение влияния параметров наноструктурирования на механические характеристики покрытия при энергетическом ассистировании;
3. Уточнение влияния параметров получения ламинатной структуры и технологических параметров «циклического» режима нанесения;
4. При этом необходимо обеспечить управляемость, стабильность и воспроизводимость технологического процесса.

1. *Экобори Т.* Научные основы прочности и разрушения материалов : Пер. с яп. / Т. *Экобори*. – Киев : Наук. думка, 1978. – 352 с.
2. *Троценко В. Т.* Сопротивление усталости металлов и сплавов / В. Т. *Троценко*, Л. А. *Сосновский*. – Киев : Наук. думка, 1987. – 339 с.
3. *Золотаревский В. С.* Механические свойства металлов / В. С. *Золотаревский*. – М. : МИСиС, 1998. – 400 с.
4. *Фридман Я. Б.* Механические свойства металлов. Ч. 2 / Я. Б. *Фридман*. – М. : Машиностроение, 1974. – 369 с.
5. *Трапезон А. Г.* Влияние параметров напыления и толщины покрытий из нитрида титана TiN на сопротивление усталости / А. Г. *Трапезон*, Б. А. *Ляшенко* // Проблемы прочности. – 2010. – № 6. – С. 73 – 80.
6. *Дьяченко С. С.* Влияние ионно-плазменной обработки на микро- и нанотвердость конструкционных сталей / С. С. *Дьяченко*, С. И. *Дуб*, И. В. *Пономаренко* // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2009. – № 1. – С. 21 – 28.
7. *Будилов В. В.* Защитные свойства вакуумных ионно-плазменных покрытий на лопатках компрессоров ГТД / В. В. *Будилов*, В. С. *Мухина* // Авиационная промышленность. – 1995. – № 3-4. – С. 41 – 45.
8. *Краля О. В.* Втoмні характеристики титанового сплаву ВТ22 із зносостійкими покриттями / О. В. *Краля*, О. Г. *Моляр*, А. М. *Хімко*, Д. О. *Пугачеський* // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2009. – Т. 45, № 6. – С. 45 – 49.
9. *Фирстов С. А.* О влиянии микроструктуры на циклическую долговечность микрослоистых и дисперсно упрочненных материалов / С. А. *Фирстов* // Доповіді НАН України. – 2008. – № 10. – С. 112 – 117.
10. *Фирстов С. А.* Теоретическая (предельная) твердость / С. А. *Фирстов*, Т. Г. *Розуль* // Доповіді НАН України. – 2007. – № 4. – С. 110 – 114.
11. *Андрієвський Р. А.* Размерные эффекты в нанокристаллических материалах. Ч. 2. Механические и физические свойства / Р. А. *Андрієвський*, А. М. *Глезер* // Физика металлов и металловедение. – 2000. – Т. 89, № 1. – С. 91 – 112.
12. *Musil J.* The role of energy in formation of sputtered nanocomposite films / J. *Musil*, J. *Šuna* // Mater. Scien. Forum. – 2005. – Vol. 502. – P. 291 – 296.
13. *Кавалейро А.* Наноструктурные покрытия / А. *Кавалейро*, Д. *де Хоссон*. – М. : Техносфера, 2011. – 753 с.
14. *Ракицкий А. Н.* Структура осажденного хрома при магнетронном распылении / А. Н. *Ракицкий* // Порошковая металлургия. – 1992. – № 2. – С. 56 – 63.

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и
Государственного космического агентства Украины,
Днепропетровск

Получено 09.09.2014,
в окончательном варианте 06.10.14