

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДИСКРЕТНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ ПОКРЫТИЙ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

*Лойко В.А., к.т.н., доцент; Сёмин Е.В., аспирант
УО «Белорусский государственный аграрный технический
университет», г. Минск.*

В данной работе рассмотрены вопросы, связанные с восстановлением и упрочнением прецизионных пар топливной аппаратуры. Рассмотрены факторы, влияющие на разрушение поверхностного слоя прецизионных деталей, виды разрушений, характерные для подобного рода деталей, а также выведена зависимость между допустимой протяжённостью дискретного участка и предельной величиной напряжения сжатия покрытия. Предложен вариант наносимого композиционного дискретного покрытия, включающего в себя структурные слои, способные выполнять различные функции исходя из условий функционирования и видов разрушения прецизионных деталей. Отмечены достоинства дискретных покрытий в сравнении с покрытиями сплошного типа.

Из условий функционирования прецизионных пар и опыта эксплуатации топливных агрегатов следует, что практически все отказы и неисправности вызываются повышением трения или износом деталей. В зависимости от условий внешнего трения и связанных с ним параметров и особенностей упругопластической деформации производные процессы, возникающие в поверхностных слоях металла, могут иметь различную интенсивность. В одних условиях преобладающее значение могут иметь химико-механические процессы, к которым относятся упругопластическая деформация поверхностного слоя металла и обеление его; в других - максимальное развитие могут получать теплофизические процессы и схватывание металлов. Могут возникнуть условия для развития усталостных процессов, абразивного разрушения и другие. Общеизвестным для прецизионных соединений любого типа является положение о ведущем и сопутствующих видах изнашивания. В зависимости от условий трения сочетание таких факторов, как механическое воздействие, среда, материал и состояние поверхностей складывается более благоприятно для развития одного процесса и менее благоприятно для развития других. Поэтому процессы имеют различные скорости и, следовательно, развивается преимущественно тот процесс, для которого складывается наиболее благоприятное сочетание факторов. Следовательно, в любых условиях трения существует ведущий вид износа. В некоторых трущихся парах детали подвержены нескольким видам изнашивания, что объясняется, прежде всего, неравномерным нагружением поверхностей трения одной детали. Однако каждая деталь имеет наиболее изнашиваемый участок поверхности, где преобладает только один вид изнашивания.

Необходимость защиты и упрочнения поверхности, даже при использовании конструкционных материалов с улучшенным комплексом физи-

ческих и механических свойств, вытекает из того, что поверхностные слои нагруженных твердых тел являются самостоятельной подсистемой, в которой развиваются процессы, являющиеся синергетическим активатором процессов во всем объеме тела. Отсюда следует, что отказы изделий вследствие износа, коррозионных и эрозионных процессов, трещинообразования при различных видах эксплуатационного нагружения определяются свойствами относительно тонкого поверхностного слоя. Синергетический эффект при нанесении тонких покрытий обеспечивает достаточный уровень функциональных характеристик в необходимом масштабе путем объединения свойств двух и более материалов с получением композитов, обладающих характеристиками, которые не могут быть достигнуты при использовании одного материала.

Вместе с тем, поверхность со сплошным покрытием неизбежно разрушается путем растрескивания покрытия (когезионное разрушение) или отслоения по интерфейсу (адгезионное разрушение). Такое разрушение может наступать как под действием остаточных либо эксплуатационных напряжений, так и в результате их совместного действия. В итоге, подобно процессам в живой природе, происходит самоорганизация новых, более устойчивых структур. Исходя из принципов самоорганизации, была предложена концепция создания композита с поверхностью, имеющей дискретную топографию, архитектура которой изначально подобна той, которая будет сформирована в результате приработки под действием остаточных напряжений и напряжений от эксплуатационного нагружения, например, от приложенной к основе растягивающей нагрузки [1-3]. Такой подход позволяет на проектировочном и технологическом уровне обеспечивать качество и эксплуатационные свойства изделия с покрытием.

Таким образом, определение допустимой протяженности дискретного участка происходит исходя из недопущения вспучивания при действии остаточных напряжений сжатия в покрытии. Напряжениям растяжения в покрытии $\sigma(z)$ соответствуют касательные напряжения $\tau(z)$ на границе раздела фаз (покрытие-основа):

$$\sigma(z) = \frac{1}{h_n} \int_0^z \tau(z) dz, \quad (1)$$

где h_n – толщина покрытия, z – текущая координата вдоль продольной оси.

Отслоению покрытия от основы (рис. 1, а) соответствует превышение касательных максимальных напряжений τ_{max} величины прочности сцепления основы с покрытием τ_{cy} :

$$\tau_{cy} \leq \tau_{max}. \quad (2)$$

При эксплуатации изделий с покрытиями наиболее благоприятной является ситуация, когда в покрытиях формируются остаточные напряже-

ния сжатия. Значительный уровень остаточных напряжений сжатия присущ вакуумплазменным покрытиям (PVD), которые благодаря высокой износо- и термостойкости широко применяют для повышения работоспособности режущего и деформирующего инструмента, а также деталей трибосопряжений.

По данным остаточные напряжения сжатия в покрытиях повышают предел текучести, пределы прочности при растяжении и изгибе его материала. С высоким уровнем остаточных напряжений сжатия в покрытиях связывают также повышение их трещино-, износо- и коррозионной стойкости. Вместе с тем, остаточные напряжения сжатия, в зависимости от уровня, могут привести к вспучиванию покрытия с последующим растрескиванием (рис. 1, в). Исходя из значений прочности сцепления, во избежание разрушения отрывом и вспучиванием, в предложено ограничивать величину остаточных напряжений сжатия в покрытии. Считается, что вспучивание покрытия на плоской поверхности будет иметь место при наличии исходного местного нарушения адгезии покрытия с основой, когда напряжения сжатия достигают критической величины $\sigma_{кр}^{ост}$.

$$\sigma_{кр}^{ост} = \frac{\pi^2 E_{II}}{3} \left(\frac{h_{II}}{l} \right)^2, \quad (3)$$

где l – протяжённость участка; E_{II} – модуль упругости первого рода материала покрытия; h_{II} – толщина покрытия.

Таким образом, логично найти максимально допустимую протяжённость участка дискретного покрытия D , исходя из недопущения вспучивания (потери устойчивости) при действии остаточных напряжений сжатия в покрытии:

$$D = l \leq \frac{\pi}{h_{II}} \sqrt{\frac{E_{II}}{3\sigma_{кр}^{ост}}}. \quad (4)$$

где $\sigma_{кр}^{ост}$ – критическая величина напряжения сжатия; h_{II} – толщина покрытия.

Показано, что покрытия, характеризующиеся высоким уровнем остаточных напряжений сжатия, могут разрушаться еще до начала их эксплуатации в результате вспучивания, приводящего к последующему разрушению поверхности. Избежать такого вида разрушения можно путем формирования покрытий дискретного типа с заданными параметрами – ограничив протяжённость дискретного участка и увеличив его толщину. Вместе с тем, толстые покрытия больше склонны к отслоению с образованием интерфейсной трещины на граничной поверхности, поэтому вопрос выбора толщины необходимо оптимизировать. Ввиду наличия термической составляющей остаточных напряжений общий уровень оста-

точных напряжений сжатия в покрытии зависит от материала основы - предельно допустимая протяженность дискретного участка покрытия, при прочих равных условиях, будет различна на основах из различных материалов. Создание покрытий с дискретной топографией с параметрами, позволяющими предотвратить потерю устойчивости элементом покрытия, а значит и вспучивание покрытия с последующим растрескиванием, повышает самоорганизацию системы и расширяет возможности применения вакуумно-плазменных покрытий.

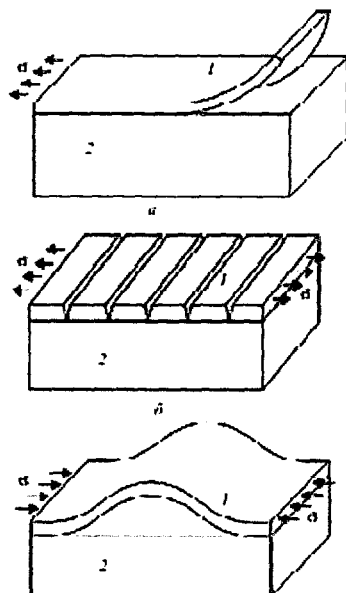


Рис. 1. Типы разрушения покрытия под воздействием остаточных напряжений – растяжения (а, б) и сжатия (в): отслоение (а), растрескивание (б), вспучивание (в), 1 – покрытие, 2 – основа.

Химический и структурный состав защитных покрытий в зависимости от их функционального назначения. Для формирования слоя с заданными параметрами выбирают материал металлического катода и смесь реакционных газов (азот, метан, кислород) с аргоном. Нитриды, карбиды и бориды металлов TiN , TiC , CrN , $TiBN$, $TiSiN$, MoC и др. характеризуются высокой твердостью [4], коррозионной стойкостью, жаропрочностью, а по структурному составу могут иметь наноструктурное строение пленки. Такие твердые покрытия относительно большой толщины могут иметь высокие внутренние напряжения, приводящие к отслаиванию пленки и появлению трещин. Поэтому используются многослойные и градиентные покрытия. В многослойных покрытиях слои нитридов, карбидов или ме-

таллов чередуются. Это регулируется изменением вида реакционного газа или его отключением для получения металлической прослойки. Двухслойные градиентные покрытия получают плавным или дискретным изменением потока реакционного газа во время процесса обработки. Поэтому возможен относительно плавный переход от чисто металлического слоя к более твердому слою нитрида металла и обратно.

Анализируя процесс и характер работы прецизионных деталей, полосчатая структура наносимого композиционного покрытия будет состоять из адгезионного, твёрдого и твёрдо смазочного слоя, каждый из которых выполняет определённые функции: адгезионный слой – выполняет адгезию между напыляемым и основным материалами, твёрдый слой – повышение твердости напыляемого слоя, и, как следствие, прецизионной детали в целом, твёрдо-смазочный слой – выполняет смазочную функцию, что позволяет уменьшить износ в парах терния прецизионных деталей.

У многослойных покрытий нижний слой, непосредственно прилегающий к поверхности прецизионной детали должен обеспечить прочное сцепление с ней и обладать возможно меньшими остаточными напряжениями для снижения перепада напряжений на границе с основой, так как известно, что наличие резкого перепада напряжений способствует отслоению покрытия. Максимальная адгезия покрытия с подложкой достигается при равномерном распределении напряжений по всей поверхности контакта.

Таблица 1

Физико-механические и теплофизические характеристики материалов износостойких покрытий

Исходный металл	Соединение	Решётка	H_v , ГПа	ΔH_{298} , КДж/моль	E , ГПа
Ti	TiC	Кубическая	31,7	232,3	460
	Ti ₂ N	Тетрагональная	-	-	-
	TiN	Кубическая	20,5	337,7	256
	TiC,N	Кубическая	26,1	285	358
Cr	Cr ₇ C ₃	Гексагональная	18,82	205	380
	Cr ₇ C ₂	Ромбическая	12,74	98,3	380
	CrN	Кубическая	10,93	118,4	330
	Cr ₂ N	ГПУ	15,41	105,8	310
Mo	Mo ₂ C	ГПУ	17,64	45,8	544
	MoC	Гексагональная	15	10,1	200

H_v - микротвёрдость, ΔH_{298} - теплота образования, E - модуль упругости.

Анализ данных физико-химических и теплофизических свойств материалов покрытий показывает, что наиболее близкими свойствами к твёрдым обладает карбонитрид титана TiCN, который имеет период кристаллической решётки, близкий к компонентам твёрдых сплавов, и схожие значения коэффициентов термического расширения. Помимо этого проч-

ность сцепления с основой может быть повышена за счёт осаждения нижнего слоя TiN по технологии «комбинированный температурный режим» при высокой температуре конденсации [4].

Для успешного торможения появившихся в процессе работы трещин многослойных покрытий необходимо включать в состав слои с высокой трещиностойкостью и сочетать слои переменной твёрдости. В качестве примера слоя с высокой трещиностойкостью и прочностью можно выбрать карбид хрома Cr_7C_3 .

В качестве смазочного слоя методом вакуумно-плазменным напылением наносится покрытие, в состав которого входит карбид молибдена MoC , позволяющий получить минимальный коэффициент трения и исключительные возможности покрытия.

Создание композиционных покрытий с дискретной топографией с параметрами, позволяющими предотвратить потерю устойчивости элементом покрытия, а значит и вспучивание покрытия с последующим растрескиванием, повышает самоорганизацию системы и расширяет возможности применения вакуумно-плазменных покрытий. Параметры наносимого покрытия можно выбирать в зависимости от условий функционирования прецизионных деталей и характера их разрушений, что позволяет создать оптимальное покрытие.

Литература

1. Ляшенко Б.А., Мовшович А.Я., Долматов А.И. Упрочняющие покрытия дискретной структуры // Технологические системы. - 2001. - № 4 (10). - С. 17-25.
2. Ляшенко Б.А., Сорока Е.Б., Рутковский А.В., Липинская Н.В. Определение параметров дискретной структуры покрытий с учетом остаточных напряжений // Пробл. прочности. - 2002. - № 4. - С. 119-125.
3. Антонюк В.С., Сорока Е.Б. Конструирование дискретно-модифицированных износостойких поверхностей // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2008. - № 8. - С. 8-13.
4. Вакуумно-плазменные технологии в ремонтном производстве: монография / В.А. Лойко [и др.]. - Минск: БГАТУ, 2007. 192 с.: ил. ISBN 978-985-6770-84-8.