

А. В. РОГАЧЕВ, доктор химических наук, профессор, проректор по научной работе; Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель; В. В. НАЗАРЕНКО, заместитель начальника Белорусской железной дороги, В. В. ХВАЛЬКО, начальник службы технической политики и инвестиций Белорусской железной дороги

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Рассмотрены основные технологические особенности упрочнения рабочих поверхностей трения путем нанесения плазменных вакуумных покрытий, поверхностной плазмохимической модификации резинотехнических изделий, приведены свойства обработанных материалов.

В числе приоритетных направлений развития транспортного комплекса особое внимание уделяется проведению исследований и внедрению прогрессивных энерго- и ресурсосберегающих технологий обработки материалов с целью придания им высоких служебных свойств. Применение современных методов обработки материалов позволяет, во-первых, на высоком технологическом уровне, со значительным экономическим эффектом проводить работы по повышению износостойкости и долговечности ответственных и, как правило, наиболее сложных узлов подвижного состава и, во-вторых, обеспечить необходимый уровень безопасности перевозочного процесса.

Анализ основных тенденций развития машиностроительных технологий свидетельствует о перспективности и высокой эффективности плазменных и плазмохимических методов обработки материалов. Такие технологии заключаются в нанесении на рабочую поверхность тонких функциональных слоев, что позволяет экономить материальные и трудовые ресурсы и, что особенно важно, получать изделия со значительно более высокими служебными свойствами. К наиболее значительным практическим разработкам в данном направлении, выполненным в БелГУТе и нашедшим применение на Белорусской железной дороге, следует отнести:

1 Технологию нанесения антифрикционных и износостойких многослойных и композиционных покрытий на основе нитрида титана, алмазоподобных слоев (АПП), меди, фторполимера [1 – 4]. Данная технология рекомендуется для восстановления прецизионных узлов трения, систем топливной аппаратуры двигателей. Общая толщина покрытия не превышает 5 – 8 мкм и наносится на поверхность за один технологический цикл. Опытно-промышленные испытания форсунок, плунжерных пар, содержащих такие покрытия, показали их высокую работоспособность и надежность при эксплуатации.

2 Поверхностную плазмохимическую модификацию резинотехнических изделий путем осаждения тонких (толщиной до 2–4 мкм) слоев композиционного материала на основе полимеров. При ее проведении важным является осуществление оптимальной предварительной активационной обработки поверхности резины, обеспечивающей образование хемосорбционных слоев. После модификации резиновые изделия имеют более низкий коэффициент трения, высокую износостойкость и, что особенно важно, незначительное набухание в среде топлив и масел, а также высокую долговечность.

Технология нанесения покрытий на основе нитрида титана, алмазоподобных слоев (АПП)

На основании результатов, полученных при исследовании свойств сверхтвердых покрытий на основе TiN и АПП и влияния на них технологических режимов и условий процесса обработки, определены следующие основные направления совершенствования технологии восстановления и упрочнения высоконагруженных рабочих поверхностей пар трения:

1 Разработка конструкции и технологии формирования многослойных покрытий на основе нитридов металла, АПП, пластичных металлов и полимеров. При этом пластичный слой используется в качестве внешнего.

2 Оптимизация технологических режимов нанесения покрытий с заданной структурой, снижение до минимума содержания капельной фазы в покрытиях TiN .

3 Разработка эффективных приемов легирования АПП, например, титаном на стадии их осаждения.

4 Выбор оптимального способа и режима последующей обработки тонкопленочных систем с целью повышения их свойств.

Определены также наиболее эффективные практические приложения вакуумных плазмохимических технологий.

Твердые износостойкие покрытия из нитрида титана и твердосмазочные покрытия на основе меди формируются методом конденсации при ион-

ной бомбардировке, алмазоподобные покрытия – из импульсной катодной плазмы, а антифрикционные слои из политетрафторэтилена – методом электронно-лучевого диспергирования исходного материала [5]. Комплексные триботехнические исследования таких многослойных систем толщиной до 5 мкм, сформированных в оптимальных технологических условиях, показали, что они обладают низким коэффициентом трения по стали ШХ15 (рисунок 1), высокой износостойкостью, долговечностью (таблица 1) [6].

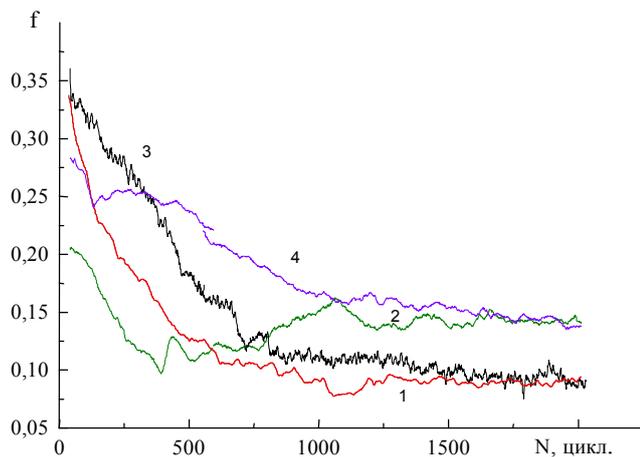


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента трения шарика из ШХ15 по покрытию $TiN-Ti$ -АПП-свинец (1); $TiN-Ti$ -АПП-ПТФЭ (2); $TiN-Ti$ -АПП (3); $TiN-Ti$ -АПП-серебро (4) от числа циклов истирания

Таблица 1 – Триботехнические свойства многослойных покрытий

Состав покрытия	Диаметр зоны износа, мм	Интенсивность изнашивания, 10^{-9}	Давление, МПа	Линейный износ, мкм
$TiN+Cu$	0,8	66,5	3,97	13,3
$TiN+Cu+ПТФЭ$	0,75	58,5	4,52	11,7
TiN^*	0,2	4,15	63,7	0,83
$TiN^*+ПТФЭ$	0,25	6,5	40,7	1,3
TiN^*+Cu	0,17	3,0	88,1	0,6
$TiN^*+Cu+ПТФЭ$	0,16	2,6	99,5	0,53
TiN	0,84	73,5	3,6	14,7
ШХ15	0,5	26,6	10,19	5,2

Примечание – TiN^* - покрытие не содержит капельной фазы.

Весьма эффективным приемом повышения механических свойств покрытий на основе АПП является их легирование титаном [7]. Результаты исследования деформационных и триботехнических свойств легированных титаном АПП, получаемых совместным осаждением углерода из импульсной плазмы и титана из ионизированного потока, свидетельствуют, что твердость покрытий и их модуль упругости неоднозначно зависят от концентрации титана в покрытии (рисунок 2).

При объемном наполнении титаном до 9 – 11 % наблюдается резкое снижение твердости, что, по-видимому, обусловлено уменьшением размеров твердых кластеров из-за диффузионных затруднений их роста вследствие экранирования атомами

титана и межмолекулярного титан–углерод взаимодействия. Последующее возрастание твердости покрытия при увеличении содержания титана определяется, вероятнее всего, технологическими особенностями процесса нанесения углеродной фазы. При этом толщина слоя в диапазоне 0,2 – 3,0 мкм и природа материала подложки не оказывают заметного влияния на твердость покрытия. Так, при изменении толщины углеродного покрытия почти в три раза его твердость, модуль упругости изменились примерно на 10 %, что может быть обусловлено и различием в тепловом режиме осаждения. Концентрация титана оказывает влияние и на триботехнические свойства покрытий (см. рисунок 2). При этом заметное возрастание коэффициента трения имеет место при концентрации титана более 10 %. Отмечено также, что при трении таких покрытий более низкие значения коэффициента трения достигаются при увеличении нормальной нагрузки и скорости скольжения.

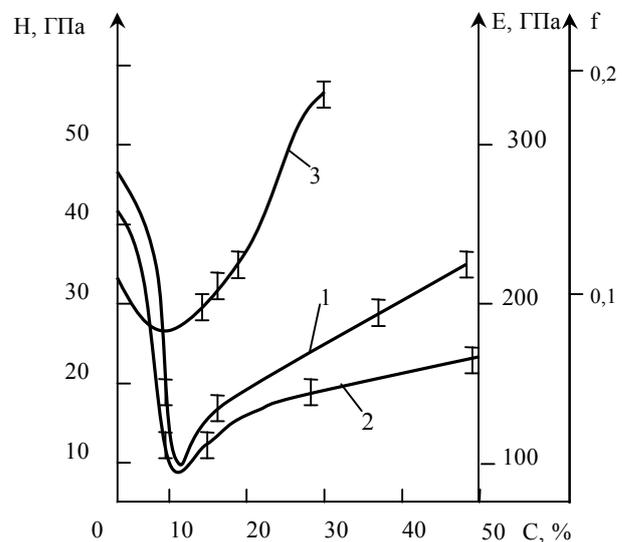


Рисунок 2 – Влияние концентрации титана на модуль упругости E (1), твердость H (2) и коэффициент трения f (3) легированных АПП

Сложное и в значительной степени неоднозначное влияние на механические свойства легированных углеродных покрытий оказывает режим термообработки. Отметим, что нагрев нелегированных углеродных покрытий в процессе нанесения до температуры выше 350 °С вызывает, как правило, его графитизацию [8] и, как следствие этого, снижение твердости. При нагреве же легированных титаном углеродных покрытий в вакууме до температуры выше 850 °С имеет место значительное увеличение твердости и некоторое снижение модуля упругости. Так как титан относится к карбидообразующим металлам, значительное увеличение микротвердости при термообработке легированных покрытий можно объяснить протеканием диффузионных и химических процессов, приводящих к образованию карбидных соединений. Образование карбидных соединений титана было экспериментально подтверждено методами рентге-

ноструктурного анализа и фотоэлектронной спектроскопии.

Испытания плунжерных пар, содержащих многослойное покрытие, в зимних условиях эксплуатации показали, что в случае использования в качестве материала внешнего слоя фторполимера не происходит характерного для топливных насосов заклинивания при его запуске вследствие замерзания воды, находящейся в топливе, в зазоре. В данном случае из-за высокой гидрофобности фторполимера наблюдается ее вытеснение из зазора.

Поверхностная плазмохимическая модификация резинотехнических изделий (РТИ)

Поверхностная модификация резинотехнических изделий (РТИ), заключающаяся в осаждении на поверхности тонких полимерных слоев из газовой фазы, позволяет значительно снизить в 1,5 – 2,5 раза коэффициент трения, в 2 – 6 раз набухание резин при эксплуатации в среде топлив и масел, расширяет температурный диапазон их эксплуатации (таблица 2).

Таблица 2 – Влияние предварительной обработки РТИ на трение

Марка резины	Вид обработки	Сила трения, мН			
		в начальный момент при скорости скольжения, м/с		после 100 циклов при скорости скольжения, м/с	
		0,04	0,08	0,04	0,08
На основе фторкаучука ИРП-1287	Без покрытия	1,2	1,45	Катастрофический износ	
	Химическая очистка	0,2	0,2	0,65	0,7
	Глеющий разряд	0,35	0,35	0,35	0,35
Бутадиен-нитрильная В-14	Без покрытия	1,55	2,5	Катастрофический износ	
	С покрытием без обработки	0,95	1,35	2,2	3,5
	Химическая очистка	1,25	1,4	2,1	1,8
	Глеющий разряд	0,35	0,4	0,35	0,4
На основе силоксанового каучука 5И-23	Без покрытия	0,6	0,7	Катастрофический износ	
	Химическая очистка	0,22	0,2	0,3*	0,4*
	Глеющий разряд	0,16	0,18	0,28*	0,38*

* Данные получены после 300 циклов испытания

Изучено влияние технологических режимов осаждения на триботехнические свойства модифицированных резин. Установлено, что значительное влияние на долговечность нанесенного слоя оказывает способ предварительной подготовки поверхности. Наиболее высокий эффект достигается при проведении перед нанесением покрытия обработки в глею-

щем разряде. При такой модификации резин изменение коэффициента трения практически не наблюдается в процессе всего цикла испытания.

На основе анализа результатов комплексных исследований предложены следующие направления совершенствования плазмохимической технологии модификации резин:

1 Проведение предварительной обработки в плазме тлеющего разряда эпиламинированных резин. В этом случае эффект модификации более долговечен; снижение трения наблюдается при толщине изношенного слоя, значительно превосходящей толщину полимерного покрытия.

2 Осаждение тонкого композиционного покрытия толщиной 0,5 – 2,5 мкм на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) и термопластичного эластомера. При этом частицы ПТФЭ равномерно размещены в матрице эластомера. При такой структуре слоя матрица обеспечивает высокую износостойкость и минимальную проницаемость молекул среды (масла, топлива) в объем резины, а наполнитель (ПТФЭ) – низкий коэффициент трения. В итоге долговечность модифицированных резин, как показали результаты опытно-промышленных испытаний, возрастает в 2 – 8 раз.

3 Проведение термообработки сформулированного покрытия, что инициирует протекание постполимеризационных процессов, способствует повышению когезионной и адгезионной прочности слоя.

4 Образование активной газовой фазы, в которой проводится обработка РТИ, методом электронно-лучевого диспергирования исходного полимера. В ряде случаев целесообразно использовать дополнительное возбуждение летучих частиц, например, путем создания электрических разрядов. Для каждого полимера существует оптимальный интервал значений плотности потока частиц (скорости диспергирования) и температуры поверхности, при которых формируется покрытие с высокой молекулярной массой. Оптимальная скорость осаждения слоя полимера при $T = 300 K$, как правило, составляет 0,1 – 0,5 мкм/мин. При более высоких скоростях роста формируются покрытия с развитой поверхностью, имеющие низкую когезионную прочность.

Определены также оптимальные условия и режимы эксплуатации модифицированных РТИ [9]. Модификация поверхности резины в активной газовой фазе значительно снижает износ, момент трения пары и обеспечивает её более стабильную работу. При этом эффективность применения модифицированных РТИ в значительной степени зависит от условий и режимов эксплуатации, и наибольший эффект достигается при трении со скоростями скольжения менее 0,3 – 0,4 м/с в среде топлива и при более высоких скоростях – при трении

в масле. Показано, что резкие периодические изменения в процесс трения линейного размера резинометаллической пары, работающей в условиях жидкой смазки, обусловлены изменением адсорбционной активности поверхности трения.

Таким образом, применение плазмохимических методов модификации материалов, нанесения тонких функциональных слоев из активной газовой фазы позволяет эффективно решать многие технические задачи, формировать системы с высокими эксплуатационными свойствами.

Список литературы

1 *Липин Ю. В., Рогачев А. В., Сидорский С. С., Харитонов В. В.* Технология вакуумной металлизации полимерных материалов. Гомель, 1994. 206 с.

2 *Ткачук Б. В., Колотыркин З. М.* Получение тонких полимерных пленок из газовой фазы. М.: Химия, 1977. 216 с.

3 *Гильман А. Б., Венгерская Л. Э., Тузов Л. С., Григорьева Г. А., Шифрина Р. Р., Потанов В. К.* Влияние плазмохимической обработки на свойства и структуру поверхности полиимидной пленки//Физика тонкопленочных материалов: Сборник. Гомель, 1992. С. 9–12.

4 *Рогачев А. В.* Кинетические и физико-химические закономерности процессов тепло- и массопереноса при формировании тонкопленочных металлополимерных систем в вакууме: Дис. ... докт. хим. наук. М., 1987. 364 с.

Получено 05.11.2001

A. V. Rogachev, V. V. Nazarenko, V. V. Khvalko. Modern methods of processing materials and their application for raising the durability of the rolling stock parts.

The main technologies peculiarities of strengthening the working surfaces of friction by putting plasmic vacuum coatings, the surface plasmochemical modification of rubbertechnical articles are considered and the properties of processed materials are also given attention to.

5 *Рогачев А. В., Щебров А. В., Казаченко В. П., Егоров А. И., Попов А. Н.* Использование вакуумных плазмохимических методов обработки материалов с целью повышения их эксплуатационных свойств//Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века: Сборник. Донецк, 1998. С. 31–35.

6 *V. P. Kazachenko, A. N. Popov, A. V. Rogachev.* Friction and wear behavior of DLC coatings and PTFE coatings filled with nanodispersed diamond powder/Proceedings of 4-th International Symposium on Diamond Films and Related Materials, Kharkov, 1999, p. 237–240.

7 *Рогачев А. В., Попов А. Н., Казаченко В. П., Сидорский С. С.* Механические свойства и структура композиционных углеродных покрытий//Материалы, технология, инструмент. 2001. Т. 5. № 2. С. 77–80.

8 *Станишевский А. В.* Структура пленок углерода, осажденных из плазмы импульсного катодно-дугового разряда в вакууме: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1996. С. 17.

9 *Сидорский С. С., Рогачев А. В., Петров С. В., Щебров А. В.* Влияние обработки резин в активной газовой фазе на их триботехнические свойства//Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения. – Мн., 2001. С. 231–324.