



**Рисунок – Морфология поверхности покрытий фторсодержащих олигомеров, подвергнутых термической обработке:**

а, б – покрытие, сформированное из фторсодержащего олигомера В1 (подложка TiN); в, г – покрытие, сформированное из фторсодержащего олигомера Ф1 (подложка электролитический хром, модифицированный нанодисперсными частицами алмаза детонационного синтеза); а, в – исходное покрытие фторсодержащего олигомера; б, г – термообработка при  $T = 523\text{ K}$  в течении 60 минут. (поле сканирования  $25 \times 25\text{ мкм}$ )

Исходя из полученных данных следует, что при термообработке фторсодержащих покрытий, сформированных на активных подслоях реализуется комплексный механизм модифицирования олигомерной матрицы фторсодержащих соединений: формирование квазикристаллической нанофазы и структурирование матрицы низкоразмерными частицами, обладающих нескомпенсированным зарядом. Возможно образование частиц, состоящих из структурированных областей и квазикристаллической нанофазы. Проведенные исследования показали, что энергетическое воздействие на покрытия фторсодержащих олигомеров имеют общий механизм, однако необходимо при этом учитывать величину энергетического воздействия, активность покрытия и подложек на которых формировались покрытия. Синергическое сочетание данных факторов сказывается на интенсивности структурных изменений в покрытии, что предопределяет физические, химические, механические характеристики данной системы.

УДК 621.7

## **ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ В ЖАРОСТОЙКИХ КРЕМНИЙСОДЕРЖАЩИХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЯХ И ПРИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБЛАСТИ ПОДЛОЖКИ ПРИ ДЕЙСТВИИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР**

А.Л. Голозубов канд. техн. наук, доц.  
 УО «Мозырский государственный педагогический университет»  
 (г. Мозырь, Республика Беларусь)

Защитные покрытия, наносимые существующими методами упрочнения, как правило, требуют последующей механической обработки упрочненной поверхности, что часто затруднено ее высокой твердостью, вязкостью, или дру-

гими специфическими свойствами, а также возможностью отслоения покрытия от подложки в процессе обработки. Улучшить показатели шероховатости поверхности и повысить ее эксплуатационные свойства позволяет нанесение жаростойких тонкопленочных покрытий (ТП) толщиной до 2 мкм из дуговой плазмы. Высокая точность нанесения ТП по толщине (до 0,3 мкм), позволяет применять разработанный технологический процесс для упрочнения контактирующих поверхностей пресс-форм, штамповой оснастки и других деталей, не допускающих последующей механической обработки из-за высоких требований к точности изготовления и сборки.

Действие высоких температур оказывает различное влияние на процессы, происходящие в ТП разного химического состава. В качестве жаростойких покрытий наиболее рационально использовать ТП на основе оксида, карбида и нитрида кремния. Исследования показали, что повышение температуры внешней среды в интересующем нас диапазоне (до 1300 °С) не влияет на изменение фазового состава нитрида и карбида кремния, вызывая лишь изменение их химического состава при контакте с кислородсодержащими средами. Для диоксида кремния наоборот, химический состав остается стабильным, однако в процессе нагрева происходит изменение фазового состава ТП. Последовательно, при повышении температуры будут происходить следующие фазовые переходы:  $\alpha$ -кварц  $\xrightarrow{537^{\circ}\text{C}}$   $\beta$ -кварц  $\xrightarrow{870^{\circ}\text{C}}$  тридимит  $\xrightarrow{1470^{\circ}\text{C}}$  кристобалит  $\xrightarrow{1713^{\circ}\text{C}}$  расплав.

При нагревании подложки с ТП происходит термическое расширение как подложки, так и тонкопленочного покрытия. Из-за разности в термических коэффициентах линейного расширения (ТКЛР) стали и кремнийсодержащего ТП в последнем должны развиваться значительные напряжения, которые могут стать причиной как адгезионного так и когезионного разрушения. Проведенные экспериментальные исследования на образцах из стали 12Х18Н9Т толщиной 2 мм с нанесенным на одну сторону покрытием показали, что при многократном разогревании (более 30 циклов) до температуры 800–900 °С, как со стороны с нанесенным покрытием, так и с тыльной стороны образца разрушения тонкопленочного покрытия по когезионному или адгезионному типу не происходило. Мы предполагаем, что такое поведение тонкопленочного покрытия связано со следующими факторами:

- малой толщиной ТП (0,5–1,0 мкм);
- особенностью состава (экспериментальные исследования методами РСМА-анализа на СЭМ "Nanolab-7" со спектром энергетической дисперсии EDS "Sistem 860" и рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 показали, что тонкопленочное кремнийсодержащее покрытие представляет собой сложный псевдосплав нестехиометрического состава, содержащий в своем составе карбиды, оксиды и нитриды кремния, не имеющий кристаллического строения и представляющий собой аморфную стеклообразную структуру);
- возможностью пластификации тонкопленочного покрытия при высоких температурах.

На термический коэффициент линейного расширения (ТКЛР) существенное влияние оказывает температурный режим нанесения покрытия: быстро охлаждаемые стеклообразные покрытия по сравнению с медленно охлаждаемыми имеют в несколько раз более высокий ТКЛР.

В зоне закалки плазменной струи, контактирующей с подложкой, имеющей протяженность  $L < 1-2$  мм, наблюдается резкое снижение температуры (с  $9 \cdot 10^3 - 11 \cdot 10^3$  К внутри плазматрона до  $3 \cdot 10^3$  К на его срезе) за счет интенсивного охлаждения приповерхностных слоев плазменной струи металлической подложкой. Наличие значительного градиента температур обусловлено высокими скоростями охлаждения поверхностных слоев подложки, достигающих  $10^5 - 10^6$  К/с. Снижение температуры плазмы приводит к изменению изобарно-изотермического потенциала (энергии Гиббса), в результате чего в газовой фазе начинают протекать химические реакции с образованием конденсированных фаз. Температура поверхностных слоев подложки при этом, как показали эксперименты, может составлять от 150 до 450°С. При последующем охлаждении из-за разницы в ТКЛР в ТП возникают термические напряжения, величина которых будет зависеть от химического состава ТП, его толщины и, как указывалось ранее, скорости охлаждения ТП. Последнее обстоятельство показывает, что работоспособность ТП (определяемая сплошностью, адгезией и когезией), зависит от внутренних напряжений в ТП, связанных с термическим циклом нанесения покрытия. При этом снижение времени обработки приводит к увеличению скоростей охлаждения и значительному росту ТКЛР при малой толщине ТП. Совместное действие этих двух факторов приводит к резкому снижению внутренних температурных напряжений в ТП малой толщины и оказывает положительное влияние на эксплуатационные свойства покрытия.

УДК 621.7

## ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ МАШИН

В.С.Ивашко, д-р техн. наук, проф.

Белорусский национальный технический университет  
(г. Минск, Республика Беларусь)

Приведены современные методы ремонта соединений и устранения неисправностей, подробно рассмотрены способы восстановления и упрочнения деталей машин.

**Введение.** Неисправности деталей появляются в результате постоянного или внезапного снижения физико-механических свойств материала, истирания, деформирования, смятия, коррозии, старения, перераспределения остаточных напряжений и других причин, в конечном итоге вызывающих потерю работоспособности узла. Практически любая неисправность является следствием изменения состава, структуры или механических свойств материала, конструктивных размеров деталей и состояния их поверхностей.