

## ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

УДК 621.793.74:593.3/4

Н.В. СПИРИДОНОВ, канд.техн.наук,  
А.С. ПАНЧИШНЫХ (БПИ)

### ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ

Из большого разнообразия металлидов особый интерес представляет никелид титана TiNi, обладающий высокими эксплуатационными свойствами — коррозионной стойкостью и износостойкостью. Это ставит его в ряд перспективных материалов для создания защитных покрытий. Однако сведений о свойствах таких покрытий недостаточно для их целенаправленного применения при различных условиях эксплуатации. В данной работе приведены результаты исследований физико-механических свойств покрытий из интерметаллида TiNi непосредственно после их напыления, а также после термической обработки при объемном нагреве и нагреве локальным высококонцентрированным потоком энергии.

Для получения покрытий был использован порошок марки ПН55Т45, представляющий интерметаллическое соединение TiNi с гранулометрическим составом частиц до 160 мкм. Нанесение покрытий производилось на плазменной установке УПУ-3Д. Дополнительная их термическая обработка осуществлялась с помощью лазерной установки ЛГН-702 и в вакуумных печах с последующей закалкой в масле и воде. В качестве материалов образцов были выбраны сталь 20 и сталь 45.

В результате эксперимента установлено, что наибольшая прочность сцепления покрытия TiNi с материалом подложки достигается при подготовке поверхности типа "рваной резьбы" с параметрами шероховатости  $R_z = 300, \dots, 360$  мкм. Наиболее качественные покрытия получают при дистанции напыления 80...120 мм, когда частицы сплава попадают на поверхность, будучи в пластическом состоянии.

Разбрызгивание жидких частиц при ударе о поверхность, их деформирование и разрушение покрывающей частицу пленки приводят к образованию в покрытиях открытых и закрытых пор. Наличие в покрытиях небольшой толщины открытых пор делает их проницаемыми для газов и жидкостей.

Сплав ПН55Т45, напыленный на стальные образцы, легко подвергающиеся коррозии, испытывался на проникновение воды через поры в покрытиях разной толщины (0,1...0,8 мм) в климатической камере при следующих режимах: влажность —  $(98 \pm 1 \%)$ ; температура —  $(90 \pm 1) ^\circ\text{C}$ ; время выдержки —  $(94 \pm 1)$  с.

Следы коррозии или отслоение покрытия обнаружены на образцах из стали 20 при нанесении покрытий толщиной 0,1 и 0,2 мм и на образцах из стали 45 при толщине покрытий 0,1 мм; во всех остальных случаях коррозия отсутствует. По мере увеличения толщины покрытия поры перекрываются и покрытие становится непроницаемым для влаги и газов. Гравиметрическим методом установлено, что в порах может удерживаться до 7 % смазочного материала.

Была определена плотность материала покрытия до и после термообработки. До обработки плотность составила  $4,99 \text{ г/см}^3$ , после термообработки при  $832 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $5,44$  и при  $1022 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $6,15 \text{ г/см}^3$ . Повышение плотности материала покрытия при термообработке определяется тем, что изменяется количество образовавшихся пор. В результате диффузионных процессов, интенсивность которых возрастает при  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  и выше, происходит распад соединения TiNi на интерметаллиды  $\text{Ti}_2\text{Ni}$  и  $\text{Ti}_3\text{Ni}$  [1]. Содержание TiNi в покрытии после отжига выше температуры  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  незначительно, поскольку в результате сложных процессов, протекающих при его распылении и формировании, лишь небольшая доля частиц сохраняет состав, соответствующий низкотемпературной области гомогенности TiNi.

Исследование прочностных свойств нанесенных покрытий проводилось на специальных образцах с использованием универсальной разрывной машины мод. МР-0,5-1. Для соединения образцов использовался клеевой метод. Чтобы исключить влияние срезающих нагрузок, образцы закреплялись в шарнирных приспособлениях.

Прочность сцепления зависит от многих параметров процесса напыления и характеристик напыляемых материалов. Однако наибольшее влияние на нее оказывают температура процесса, а также дополнительная обработка, в частности термообработка и упрочнение с помощью луча лазера. Прочность сцепления покрытий, нанесенных на образец из стали 45, в результате термообработки при  $825$  и  $1052 \text{ }^\circ\text{C}$  составила соответственно  $55,60$  и  $58,65 \text{ МПа}$ , в результате упрочнения лучом лазера – более  $170 \text{ МПа}$ .

Напыленные покрытия имеют различный фазовый состав интерметаллического соединения TiNi [1]. Наибольшей твердостью обладает  $\text{Ti}_2\text{Ni}$ . Твердость покрытий в значительной степени зависит от дополнительного способа их упрочнения. У поверхности она максимальна, а у основания минимальна. Термическая обработка покрытия из интерметаллида способствует изменению его пористости, что в значительной мере влияет на эксплуатационные характеристики деталей машин, напыленных сплавом ПН55Т45.

Триботехнические исследования показали, что детали машин с покрытием из интерметаллида TiNi обладают повышенной в 2–5 раз износостойкостью поверхности.

Таким образом, термообработка, и в особенности лазерная обработка, покрытий из сплава ПН55Т45 повышает их физико-механические свойства в результате изменения структуры и фазового состава интерметаллида TiNi, что позволяет успешно применять их для упрочнения и восстановления деталей машин и механизмов, работающих в условиях трения и коррозионного воздействия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фазовый состав плазменного покрытия из интерметаллида TiNi/ Н.В. Рогов, И.С. Гельман, В.В. Кудинов и др. // Физика и химия обработки материалов. — 1984. — № 5. — С. 37–41.

УДК 669.14.018

Е.В. МАКАРЕВИЧ, С.А. ИВАЩЕНКО, канд.техн.наук,  
И.С. ФРОЛОВ, А.М. САМАЛЬ (БПИ)

### ФОРМИРОВАНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ИОННО-ВАКУУМНЫХ ПОКРЫТИЯХ ИЗ НИТРИДА ТИТАНА И В АЛМАЗОПОДОБНОЙ ПЛЕНКЕ

Напряжения, возникающие при напылении тонкопленочных покрытий, оказывают существенное влияние на эксплуатационные свойства системы подложка—покрытие. В ряде случаев внутренние напряжения могут привести к растрескиванию и отслаиванию покрытий, ухудшению их антифрикционных, коррозионных, декоративных и некоторых других свойств. В то же время многочисленными исследованиями показано, что внутренние напряжения можно использовать как дополнительный резерв повышения надежности изделий и конструкций.

Ионно-вакуумные покрытия, получаемые методом КИБ (конденсации вещества из плазменной фазы в условиях ионной бомбардировки), в силу ряда факторов (значительные микроискажения кристаллической решетки, морфологическая неоднородность покрытия, значительный приток тепла на подложку в процессе напыления и т.д.) характеризуются высоким уровнем внутренних напряжений. Отсюда вытекает необходимость изучения процесса формирования напряжений в системе подложка—покрытие, что в конечном итоге даст возможность регулировать величину и знак внутренних напряжений.

Были проведены исследования процесса формирования внутренних напряжений в ионно-вакуумных покрытиях из нитрида титана и алмазоподобной пленки, полученных методом КИБ. Исследования проводились как на стадии подготовки подложки под напыление (ионная бомбардировка), так и на стадии конденсации покрытия. Толщина наносимых покрытий составляла 1...5 мкм.

Покрытия наносились в ионно-плазменной установке типа "Юнион" со специальным испарителем для получения алмазоподобной пленки. Для исследований использовались образцы из алюминиевого сплава Д16, отожженные в вакууме. Соотношение длины и ширины образцов составляло 10:1, толщина изменялась от 0,3 до 1 мм. Один конец образца на длине 5...7 мм полировался для обеспечения высокой отражательной способности. Перед вакуумированием образцы подвергались ультразвуковой мойке, обезжириванию и сушке.

Подготовленные образцы устанавливались в специальном устройстве для исследования напряженно-деформированного состояния системы подложка—покрытие в процессе нанесения упрочняющего покрытия. Принцип измерения