

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ИЗ МАТЕРИАЛОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Бледнова Ж.М., Дмитренко Д.В., Балаев Э.Ю.

ФГБОУ ВО «КубГУ»

г. Краснодар, Россия, E-mail: ddv-kk@yandex.ru

Введение

При разработке технологий формирования поверхностных слоев из материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ) машиностроительного назначения целесообразно использовать комплексные методы инженерии поверхности, обеспечивающие направленное комбинирование структуры с максимальным использованием многофункциональных возможностей материалов с ЭПФ для работы в условиях трения, циклического нагружения, ударных и коррозионных воздействий. Наилучшие результаты достигаются при использовании инновационной концепции многослойно-композиционной архитектуры с чередующимися слоями различной толщины и дисперсности, различного состава и функционального назначения [1].

Одним из эффективных способов формирования многофункционального композитного поверхностного слоя является комплексный метод поверхностного модифицирования (ПМ) материалами с ЭПФ (пат. № 2535432), включающий последовательность высокочастотных воздействий: механоактивацию (МА) напыляемого материала нужного химического состава, высокоскоростное газопламенное напыление (ВГН) в защитной среде с возможностью раздельного ввода в зону газового потока компонентов напыляемого материала. Поверхностные слои, полученные ВГН, отличаются высокой плотностью, адгезионной и когезионной прочностью, мелкодисперсной и гомогенной микроструктурой, низкими остаточными напряжениями. Для снятия остаточных напряжений и обеспечения функциональных свойств материала с ЭПФ проводится циклическая термическая (ТО) и термомеханическая обработка (ТМО) поверхностным пластическим деформированием (ППД) [2].

Обоснование цели исследования

При формировании многослойных композитных поверхностных слоев из материалов с ЭПФ или с использованием их в комбинации со слоями иного функционального назначения, с увеличением толщины ПМ слоя основным показателем качества композиции является адгезионная прочность. Повышение адгезии достигается формированием переходных слоев. При нанесении на стальную основу многокомпонентных материалов с ЭПФ на основе TiNi в качестве переходного слоя использовали никель, имеющий неограниченную растворимость с железом. Несмотря на то, что для повышения адгезии использовались различные методы подготовки, очистки и активации поверхности основы, а наносимый порошковый материал подвергался МА и оптимизации по гранулометрическому составу, прочность сцепления с основой составила 100–120 МПа.

Для повышения качества композитных поверхностных слоев, как по критерию адгезии, так и по критерию эксплуатационных и функциональных свойств, перспективным является использование интенсивных технологических полей (силовых, термических, электрических и др.). К числу наиболее универсальных технологических воздействий относится ультразвуковая обработка (УЗО), отличающаяся высокой адаптивностью к существующим технологиям, возможностью применения в широком диапазоне частот, позволяющая интенсифицировать технологический процесс и существенно повысить его качественные характеристики. Основной целью работы является оценка целесообразности использования УЗО при формировании композитных поверхностных слоев из материалов с ЭПФ как на этапе подготовки поверхности для повышения адгезии, так и в качестве финишной УЗО в сочетании с ППД для обеспечения прочностных и функциональных свойств композиции.

В настоящее время отмечен положительный эффект использования ультразвука при подготовке наносимого материала на стадии МА [3]. В ряде работ экспериментально и теоретически изучено воздействие УЗО на адгезию металлических покрытий [4] и на возможность управления полями остаточных напряжений, [5].

Методика исследования

На подложке (Сталь 45) через промежуточный слой никеля толщиной 30–50 мкм ВГН наносили композитный слой, состоящий из: функционального слоя TiNiZr ($\delta=900\text{--}1000$ мкм) с прочностью сцепления с основой более 100 МПа и износостойкого слоя cNb–Co ($\delta=450\text{--}500$ мкм). ВГН создает особые условия осаждения частиц материала на подложку со сверхвысокими скоростями, что обеспечивает высокое давление при растекании частиц на подложке и надежную адгезию. После ВГН образцы подвергались отжигу при $T = 923\text{K}$ в вакуумной печи для снятия внутренних напряжений и удаления естественного оксидного слоя.

Комбинируемая обработка заключается в последовательно–одновременном проведении операций ППД и УЗО слоя с ЭПФ, обеспечивающего адгезию со стальной основой. ППД осуществляется при контактном воздействии роликом на локальную зону поверхности нагрузкой 300–1000 Н с одновременной УЗО твердосплавным рабочим наконечником, колеблющимся с частотой 22 кГц. Наконечник прижимается к поверхности детали усилием до 1000 Н. К вращающемуся валу с ПМ слоем подводится ролик и нагружается усилием обкатки P_1 (рис. 1). В результате у боковых поверхностей ролика образуются пластически деформированные зоны – «волны», а сам ролик погружается на определенную глубину в обкатываемый слой. После включения продольной подачи суппорта станка волна сгоняется в левую сторону. Непосредственно за деформирующим роликом на минимально возможном расстоянии с той же скоростью подачи движется твердосплавный рабочий наконечник магнитострикционного преобразователя, который производит доуплотнение материала с ультразвуковой частотой. Эта операция выполняется за один или несколько проходов. Обкатка проводится при продольной подаче 0,08..0,10 мм/об, скорости 94×10^{-3} м/с и числе проходов 1..3. Основные параметры процесса УЗО: статическая нагрузка, амплитуда колебаний инструмента, радиус его округления, частота колебаний, эффективная масса инструмента, подача, число проходов, скорость обработки детали.

Обсуждение результатов исследования

При комбинированном упрочнении инструмент 4 (рис. 1) под действием силы P_2 , создаваемой с помощью пружины или груза, и значительной ударной нагрузки, создаваемой колебательной системой, пластически деформирует напыленный слой 2. В зоне контакта с роликом в процессе пластической деформации происходит снижение остаточной пористости, сглаживание вершин микронеровностей и упрочнение слоя с формированием сжимающих остаточных напряжений, что является благоприятным фактором, т.к. снижает результирующие напряжения в цикле растяжения, повышается адгезионная прочность.

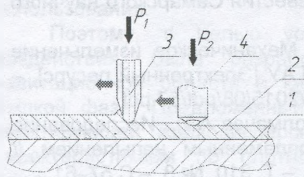


Рисунок 1 – Схема комбинированного ППД и УЗО:
1–обрабатываемая деталь; 2–модифицируемый слой; 3–ролик; 4–наконечник магнитострикционного ультразвукового преобразователя

В процессе холодной пластической деформации в материале увеличивается плотность дислокаций, формируется развитая субструктура, измельчается зерно. Создаются условия диффузионного массопереноса атомов внедрения вглубь

материала как по границам зерен, протяженность которых увеличивается, так и по телу кристаллов, за счет образования легкоподвижных комплексов с вакансиями и повышенной диффузионной проницаемостью в искаженных областях решетки вблизи ядер дислокаций [4]. Дополнительное множественное скопление увеличивает торможение дислокаций, повышается плотность дислокаций. В результате степень наклепа повышается в 1,5–2 раза и, соответственно, увеличивается уровень остаточных сжимающих напряжений. Кроме того, ультразвуковая обработка поверхности и ППД оказывают заметное влияние на величину энергии активации. Пластическая деформация, возникающая в процессе обработки, порождает многочисленные дефекты кристаллической решетки материала. Атомы в несовершенной кристаллической решетке обладают более высокой потенциальной энергией, что приводит к уменьшению энергии активации.

В процессе УЗО шероховатость поверхности уменьшается. Так, при формировании композиции «сталь 45Ni–TiNiHf–TiNiCu» шероховатость поверхности снижается с $R_z=36$ мкм после ВГН до 28,73 мкм после ТО и 6,33 мкм после УЗО. На поверхности образуется новый специфический микрорельеф, характеризующийся однородностью свойств по всем направлениям, о чем свидетельствует снижение разброса микротвердости. При продолжительной обработке микрорельеф постоянно воспроизводится. Формирующийся в процессе УЗО ячеистый микрорельеф, мелкозернистая, с высокой плотностью дефектов кристаллическая структура поверхностного слоя и внутренние напряжения сжатия обеспечивают надежную адгезионную связь. В результате УЗО происходит измельчение зеренной структуры до субмикроструктурных и наноразмеров [2]. Для указанной композиции после ВГН диаметр зерна $d=98$ нм, после ТО $d=188$ нм, после УЗО $d=32$ нм.

Заключение

УЗО вносит существенные изменения в распределении микротвёрдости в композиции «поверхностный слой–основа». Увеличение микротвёрдости после УЗО свидетельствует как об измельчении зёрен, повышении дефектности зёренной структуры, так и формировании напряжений сжатия в поверхностных слоях. Важной особенностью УЗО является сглаживание скачка значений микротвердости, который имеет место при напылении твёрдых покрытий, что благоприятно влияет на эксплуатационные свойства. Сравнительные испытания адгезионной прочности композиции после проведения комплексной обработки ППД и УЗО показали ее увеличение в 2 +2,1 раза по сравнению с необработанными покрытиями.

Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда (Соглашение 15–19–00202)

Список литературы:

1. Blednova Zh.M., Rusinov P.O. Intellectualization surface layers, working under cyclic loading and reversing friction. Applied Mechanics and Materials. Vol. 798 (2015). – pp 440–446.
2. Русинов П.О., Бледнова Ж.М., Балаев Э.Ю. Методические подходы и технические решения по формированию наноструктурированных поверхностных слоев Ti–Ni высокоскоростным газопламенным напылением // Известия Самарского научного центра РАН. – 2013. – Т. 15, № 4(2) – С.484–488.
3. Дмитренко Д.В., Бледнова Ж.М., Русинов П.О. Механическое измельчение твердых порошковых материалов // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ. – 2015. – №08(112). <http://ej.kubagro.ru/2015/08/pdf/57.pdf>
4. Клименов В.А., Ковалевская Ж.Г., Зайцев К.В., Толмачев А.И.. Исследование адгезии покрытий, полученных высокоскоростным газопламенным напылением // Известия Томского политехнического университета. –2007. – Т. 310, № 3. – С.57–61.
5. Киселев Е.С., Лексин Е.Н., Романов С.А., Благовский О.В. Возможности комбинированной обработки в формировании заданного уровня остаточных напряжений в поверхностном слое / СТИН. – 2012. – № 2. – С. 25–29.