

ДЕТОНАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ

© 2012 С.Ю. Ганигин, В.В. Калашников, А.Н. Журавлев, В.Р. Паклев, И.Д. Ибатуллин,
О.Ю. Глазунова

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 29.03.2012

В статье приведены результаты исследований взаимодействия потока частиц порошковых материалов, разгоняемых энергией взрыва, с металлическими и неметаллическими преградами. Описываются эффекты модификации поверхностных слоев.

Ключевые слова: *детонационные покрытия, имплантация, сверхглубокое проникновение, порошок, композиционный материал*

В машиностроении известно множество процессов обработки поверхностей, связанных с их взаимодействием с потоком частиц порошковых материалов, летящих со скоростями в сотни и тысячи метров в секунду. В зависимости от скорости, температуры, свойств частиц и обрабатываемой поверхности могут происходить: образование покрытия, шаржирование частиц в поверхность, имплантация в поверхностный слой, сверхглубокое проникание частиц в материал преграды. Малые длительности взаимодействия частиц с преградами (микросекунды) обуславливают адиабатический характер данного процесса.

Динамическое микролегирование рассматривается в работах [1, 2]. В этих работах, в частности, показано, что обработка поверхности деталей высокоскоростными потоками микроразмерных частиц твердосплавных материалов приводит к повышению механической прочности. Как правило, в таких работах приводятся сведения о сверхпроникании частиц в материал подложки, заключающийся во внедрении частиц на глубину превышающую значения, полученные расчетным путем с использованием моделей механики прочности. Приведем оценочные расчеты глубин проникания частиц разных диаметров от

скорости. При этом использовались модели на основе законов динамики и закона сохранения энергии. Расчеты с использованием уравнения равновесия сил выполнялись из условия, что на частицу, движущуюся в материале, действуют силы со стороны потока продуктов детонации и ударной волны, с другой стороны, силы противодействия пластической деформации материала подложки. Уравнение равновесия частицы имеет вид:

$$m_0 \frac{dv}{dt} = -H_{VD} \cdot S_0, \quad (1)$$

где S_0 – эффективная площадь контакта частицы с материалом; H_{VD} – твердость материала; m_0 – масса частицы; v – скорость частицы; t – время.

Переходя к перемещению $x(t)$ при прямолинейном движении частицы, имеем уравнение с разделяющимися переменными второго порядка:

$$m_0 \frac{d^2x(t)}{dt^2} = -H_{VD} \cdot S_0. \quad (2)$$

Из уравнения (2) глубина внедрения частицы определялась в соответствии с соотношением:

$$x_{\max} = \frac{3}{4} \cdot \frac{v_0^2 \cdot m_0}{H_{VD} \cdot S_0}, \quad (3)$$

где S_0 – эффективная площадь контакта частицы с материалом; H_{VD} – твердость материала; m_0 – масса частицы; v_0 – скорость частицы.

Время движения частицы в материале равно:

$$t_{\max} = \frac{v_0 m_0}{2 H_{VD} \cdot S_0}. \quad (4)$$

Может быть также использована другая модель, в которой расчет глубины проникания

Ганигин Сергей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология твердых химических веществ». E-mail: grail@rambler.ru

Калашников Владимир Васильевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Технология твердых химических веществ». E-mail: max71@mail.ru

Журавлев Андрей Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Технология твердых химических веществ»

Паклев Владимир Рашитович, аспирант

Ибатуллин Ильдар Дуғласович, доктор технических наук, доцент кафедры «Нанотехнологии в машиностроении». E-mail: tribo@rambler.ru

Глазунова Ольга Юрьевна, ассистент кафедры «Технология твердых химических веществ». E-mail: txb@inbox.ru

основан на балансе энергии частицы и энергии активации, необходимой для разрушения и вытеснения объема материала, определяемого глубиной внедрения. Движущаяся частица при контакте с поверхностью вытесняет некоторый объем материала V . Процесс вытеснения обеспечивается за счет полной энергии частицы равной сумме кинетической энергии и теплоты:

$$E_u = \frac{m_0 \cdot v_0^2}{2} + m_0 \cdot C \cdot \Delta T, \quad (5)$$

где C – удельная теплоемкость; ΔT – разность между температурой частицы и температурой материала подложки.

В энергетическом балансе участвует также энергия активации разрушения:

$$E_b = U_m \frac{V}{V_M}, \quad (6)$$

где V – объем вытесненного материала; V_M – молярный объем (для стали $7100 \text{ мм}^3/\text{моль}$); U_m – молярная энергия активации разрушения (для стали 80 кДж/моль).

Из (2) и (3) следует, что зависимость глубины внедрения частицы от скорости определяется соотношением:

$$h_{np} = \frac{\left(\frac{m_0 \cdot v^2}{2} + m_0 \cdot c \cdot \Delta T \right) \cdot V_M}{U_m \cdot \pi \cdot r_0^2}, \quad (7)$$

где r_0 – диаметр частицы, m_0 – масса частицы, v_0 – скорость частицы; c – удельная теплоемкость; V_M – молярный объем материала подложки; U_m – молярная энергия активации; ΔT – приращение температуры.

Молярная энергия активации материала образцов определялась на основе методик и с использованием оборудования, описанных в [3]. При этом полученное значение молярной энергии активации для используемых стальных образцов составила $U_m=59024 \text{ Дж/моль}$ (сталь) и $U_m=40034 \text{ Дж/моль}$ (алюминиевый сплав). Графики зависимости рассчитанной глубины внедрения в стальную и алюминиевую подложку от скорости при разных значениях диаметров сферических частиц приведены на рис. 1. Значения глубины внедрения, рассчитанные двумя методами, совпадают с пренебрежимо малым отклонением. Минимальные и максимальные значения глубины внедрения частиц разного диаметра отличаются на три порядка. Для сужения динамического диапазона значения глубин внедрения на рис. 1 отложены в логарифмическом масштабе.

Для обеспечения диапазона скоростей метания частиц свыше 1000 м/с использовались устройства взрывного метания, а также лабора-

торное оборудование и технические средства, входящие в состав УСУ СамГТУ НИК «Исследования быстротекущих процессов»: бронекабина (норма загрузки ВВ до 1 кг), оборудованная вытяжной вентиляцией и защитным шиббером, автоматизированная линия подрыва, технический комплекс измерения скорости быстротекущих процессов. В работе использовались различные схемы взрывного метания частиц, описанные в [1, 2].

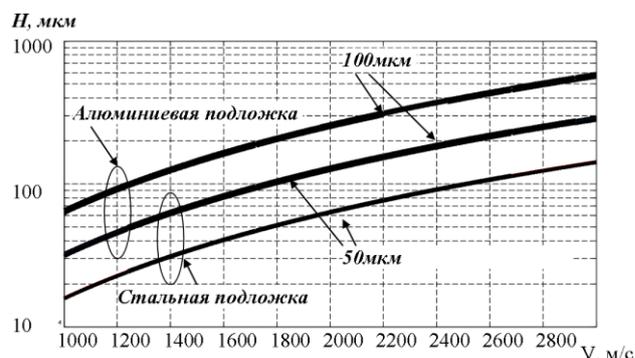


Рис. 1. Зависимости глубины проникания сферических частиц сплава на основе железа разного диаметра в алюминиевую и стальную подложку

После обработки образца высокоскоростным потоком частиц изготавливались микрошлифы. Для выявления изменений в структуре стали осуществлялось травление шлифа раствором азотной кислоты. Фотографии микрошлифа были получены с помощью сканирующего электронного микроскопа Jeol JSM-6390A (СЭМ). На рис. 2 представлены результаты внедрения отдельной частицы в стальную подложку.

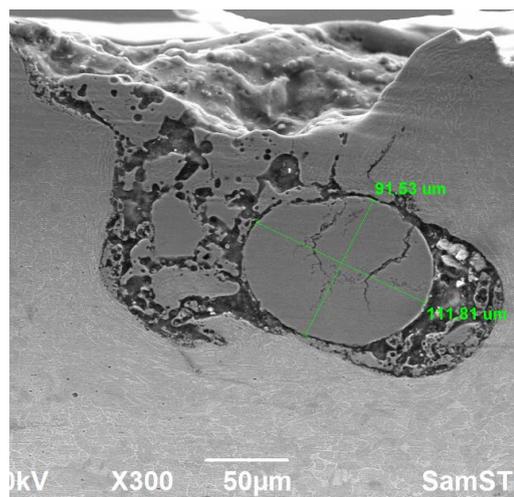


Рис. 2. Внедрение частицы железно-никелевого сплава в стальную подложку

По полученной фотографии (рис. 2) можно сделать следующие выводы. Частицы метаемого порошка в исходном состоянии имели сферическую форму. В результате внедрения наблюдается

деформация частицы, ее вытягивание по направлению трека и образование трещин в результате сдвигающих сил со стороны стенок трека. Значительных разрушений и потери объема частицы не произошло. Объем образованного канала до и после частицы заполнен материалом образца. Границы трека четкие. Вдоль границ видно уплотнение и деформация зерен стали на расстоянии до 100 мкм от границы трека. Глубины проникания частиц достигали значения 230 мкм, что соответствует рассчитанным значениям скоростей (1500-3000) м/с (рис. 2).

Обработке крупнодисперсным порошком ПР-Х11Г4СР также подвергался алюминиевый сплав. Фотографии зон внедрения частиц, полученные на СЭМ представлены на рис. 3. Ярко виден трек, имеющий структуру, аналогичную представленной на фотографии рис. 2. Здесь также трек заполнен пористым материалом за частицей. Глубина проникания обнаруженных частиц и следов треков достигала 570 мкм. Такие значения соответствуют рассчитанным, в соответствии с зависимостями (3)-(7), скоростям частиц до 3000 м/с.

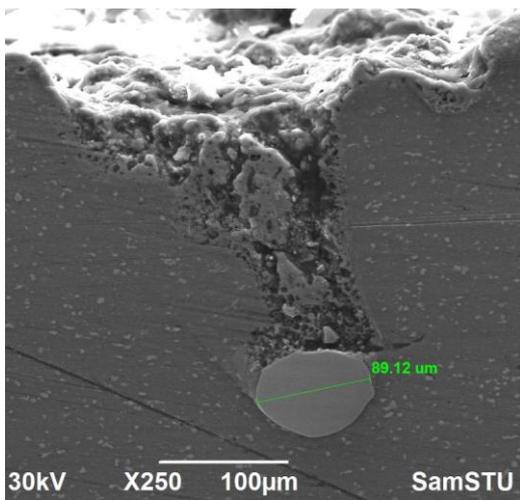
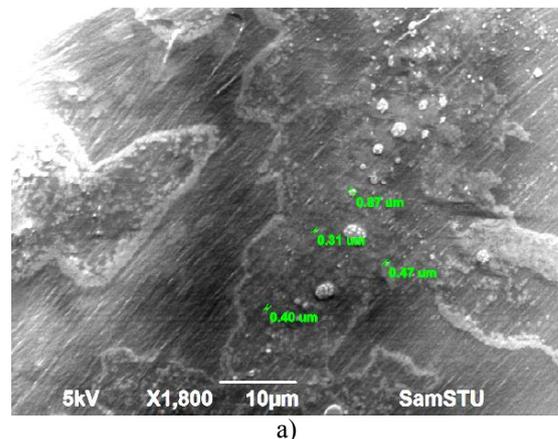


Рис. 3. Зона внедрения частицы порошка ПР-Х11Г4СР в алюминиевый сплав

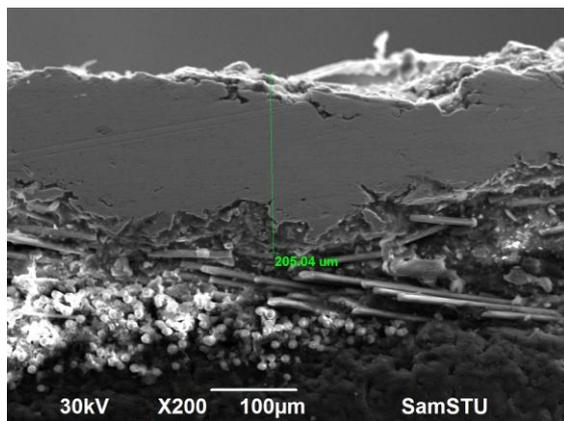
Взаимодействие потока частиц с композитами на основе эпоксидных смол. Взаимодействие потока быстролетающих частиц с преградами из полимерных композиционных материалов изучалось с целью выявления процессов, происходящих при детонационном напылении металлических покрытий на стеклопластики, полученные пропиткой слоев стекловолокон эпоксидным клеем. Такая технология предложена, в частности, для повышения износостойкости поверхности электроизолированной резцы, формируемой на ниппельной части разделителей забойных телеметрических систем. Для нанесения покрытия используется автоматизированная детонационная установка «DRAGON», в которой за счет энергии взрыва детонирующей ацетилен-кислородной смеси осуществляется разогрев (до

температуры плавления) и разгон частиц порошкового материала, представляющего собой смесь порошков легированных сталей ПР-Х11Г4СР и ПР-Н9Г4СР в равных долях. Дисперсность напыляемых частиц сферической формы составляет 50 мкм. Скорость частиц на срезе ствола пушки доходит до 1000 м/с, при подлете к обрабатываемой поверхности, удаленной от пушки на (150-250) мм, скорость частиц снижается до (400-600) м/с. Данные частицы образуют основной фронт «быстрых» частиц, за которым следует хвостовая часть потока «медленных» частиц. Поскольку ударная волна от взрыва газовой смеси на удалении свыше 100 мм от среза ствола пушки практически исчезает, при напылении металлических покрытий структура стеклопластика не нарушается, композит сохраняет прочностные характеристики.

Установлено, что при детонационном напылении указанной смеси порошков на эпоксидные полимеры без наполнителей (смола ЭД20 с отвердителем ПЭПА) формируются два процесса. Первый процесс связан с диспергированием и имплантацией в полимер «быстрых» частиц. Электронномикроскопические исследования показали (на разломах и шлифах полученных композитов), что фрагменты напыляемого порошка субмикроскопических размеров (0,2-0,8 мкм) проникают на глубину до нескольких сотен микрометров (рис. 2). Диспергирование частиц порошка можно объяснить «разбиванием» размягченных металлических частиц с температурой, близкой к температуре плавления, об относительно твердую поверхность полимера. Второй процесс связан с эрозией поверхности полимера при его взаимодействии с потоком «медленных» частиц, твердость которых значительно превышает твердость полимера. В случае использования в эпоксидном полимере в качестве наполнителя стекловолокна, последняя играет роль барьера для проникающих в полимер имплантированных частиц, а также для эрозионного процесса. Поэтому на поверхности стекловолокна начинает формироваться металлический слой (рис. 4). Микротвердость покрытия составляет 660 кгс/мм².



а)



б)

Рис. 4. Диспергирование и имплантация частиц стального порошка при встрече с преградой (а) и формирование стального покрытия на стеклопластике (б)

Микрорентгенофазовые исследования показали, что фрагменты металлических частиц проникают на глубину до 60 мкм. Триботехнические испытания композитов на усталостное

изнашивание при трении скольжения (при нормальном давлении 0,5 МПа и смазке «Циатим-209») показали, что после нанесения стального покрытия (толщина слоя 100 мкм) коэффициент трения снижается с 0,15 до 0,052, а износостойкость поверхности повышается более чем в 30 раз.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ушеренко, С.М. Сверхглубокое проникание частиц в преграды и создание композиционных материалов. – Минск, НИИИП, 1998. 208 с.
2. Кирсанов, Р.Г. Особенности распределения твердости инструментальных сталей по объему в зависимости от угла падения потока частиц / Р.Г. Кирсанов, Е.В. Петров, А.Л. Кривченко // Деформация и разрушение материалов. 2010. № 6. С. 43-46.
3. Ибатуллин, И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. 387 с.

DETONATION METHODS OF MODIFICATION

THE SURFACE LAYERS

© 2012 S.Yu. Ganigin, V.V. Kalashnikov, A.N. Zhuravlyov, V.R. Paklev, I.D. Ibatullin, O.Yu. Glazunova

Samara State Technical University

Results of researches the interaction of powder materials particles flow dispersed by energy of explosion, with metal and nonmetallic barriers are given in article. Effects of modification the surface layers are described.

Key words: *detonation coverings, implantation, superdeep penetration, powder, composite material*

Sergey Ganigin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department "Technology of Firm Chemical Substances". E-mail: grail@rambler.ru

Vladimir Kalashnikov, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department "Technology of Firm Chemical Materials". E-mail: max71@mail.ru

Andrey Zhuravlyov, Candidate of Technical Sciences, Senior Research Fellow at the Department "Technology of Firm Chemical Substances"

Vladimir Paklev, Post-graduate Student

Ildar Ibatullin, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor at the Department "Nanotechnologies in Mechanical Engineering". E-mail: tribo@rambler.ru

Olga Glazunova, Assistant at the Department "Technology of Firm Chemical Substances: E-mail: txb@inbox.ru