

УДК 621.793.7; 620.22

ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ УДАРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТВЕРДЫХ МИКРОЧАСТИЦ С ПОДЛОЖКОЙ

© 2013 С.Ю. Ганигин, В.В. Калашников, И.Д. Ибатуллин, А.Ю. Мурзин,
О.Ю. Глазунова, А.А. Григорьев

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 02.04.2013

В статье приведены результаты исследований высокоскоростного ударного взаимодействия потока частиц порошковых материалов, разгоняемых энергией взрыва, с металлическими преградами. Описаны эффекты, возникающие при движении сферических микрочастиц в материале, приводят модель взаимодействия твердой частицы с подложкой.

Ключевые слова: имплантация, проникание, микрочастицы, удар, плавление, кипение

Обработка поверхности материалов высокоскоростными потоками микрочастиц широко используется в машиностроении. В зависимости от скорости, температуры, свойств частиц и обрабатываемой поверхности могут происходить: образование покрытия, шаржирование частиц в поверхность, имплантация в поверхностный слой. При этом могут использоваться потоки частиц, имеющие широкий диапазон скоростей - от десятков до нескольких тысяч метров в секунду. Высокоскоростное соударение микрочастиц широко используется в исследовательских целях для имитации микрометеорных потоков и их воздействия на обшивки космических аппаратов. В работе [1] рассматривается динамическое микролегирование. В этих работах, в частности, показано, что обработка поверхности деталей высокоскоростными потоками микроразмерных частиц твердосплавных материалов приводит к повышению механической прочности.

Тем не менее, эффекты, возникающие при высокоскоростном (тысячи м/с) взаимодействии твердых микрочастиц с подложками широкого практического применения не находят. Однако

вокруг этих явлений продолжается активная дискуссия, т.к. эта тема охватывает широкий круг научных проблем. Механизм проникания частиц в вещество металлической подложки в описанных выше условиях остается на сегодняшний день неизвестным. Предлагаемые в литературе физические модели этого явления [1] нельзя признать удовлетворительными, во-первых, в силу их недостаточной обоснованности и, во-вторых, из-за отсутствия их математического представления через общие физические законы, которое бы позволило описать явление проникания хотя бы на качественном уровне.

Для анализа описанных взаимодействий были проведены экспериментальные исследования соударения потоков микрочастиц сплава ПР-Х11Г4СР со средним диаметром (80-100) мкм с подложками из стали и алюминия. Для обеспечения диапазона скоростей метания частиц свыше 1000 м/с использовались устройства взрывного метания, а также лабораторное оборудование и технические средства, входящие в состав УСУ СамГТУ НИК «Исследования быстропротекающих процессов»: бронекабина (норма загрузки ВВ до 1 кг), оборудованная вытяжной вентиляцией и защитным шиббером, автоматизированная линия подрыва, технический комплекс измерения скорости быстропротекающих процессов. В работе использовались различные схемы взрывного метания частиц, описанные в [2]. Недостатком проводимых экспериментов является отсутствие точных данных по скоростям разгоняемых потоков частиц. Для оценки адекватности получаемых результатов были выполнены простые расчеты параметров равнозамедленного движения сферических частиц в деформируемой пластической среде. Для этого использовалось уравнение движения:

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

Калашников Владимир Васильевич, доктор технических наук, президент

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

Мурзин Андрей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология твердых химических веществ». E-mail: ttxb@inbox.ru

Глазунова Ольга Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология твердых химических веществ»

Григорьев Андрей Александрович, аспирант

$$m_0 \frac{d^2 H(t)}{dt^2} + H_{VD} \cdot S(x) + F_{fr} = 0, \quad (1)$$

где $S(H)$ – эффективная площадь контакта частицы с материалом (зависит от глубины внедрения); H_{VD} – твердость материала; m_0 – масса частицы; v – скорость частицы; t – время; F_{fr} – сила трения микрочастицы о стенки канала.

На рис. 1 приведены временные диаграммы глубины проникания стальных частиц диаметром 10 мкм и 100 мкм в алюминиевую подложку при скорости 1700 м/с, рассчитанные по решениям на основе (1) с учетом полусферической (переменной) цилиндрической (постоянной) поверхности контакта. На временных диаграммах (1) рассматриваются участки до точек экстремума. Полученные теоретические расчеты дали хорошую сходимость с экспериментальными данными.

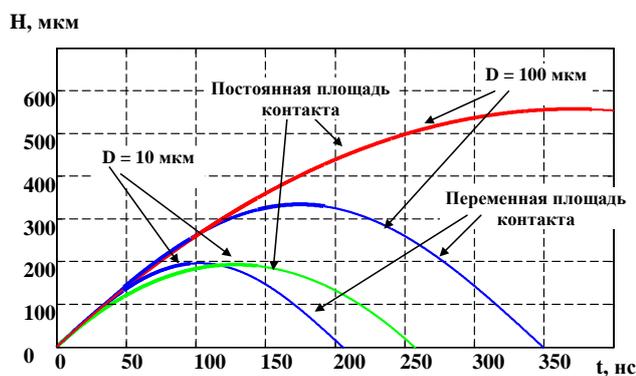
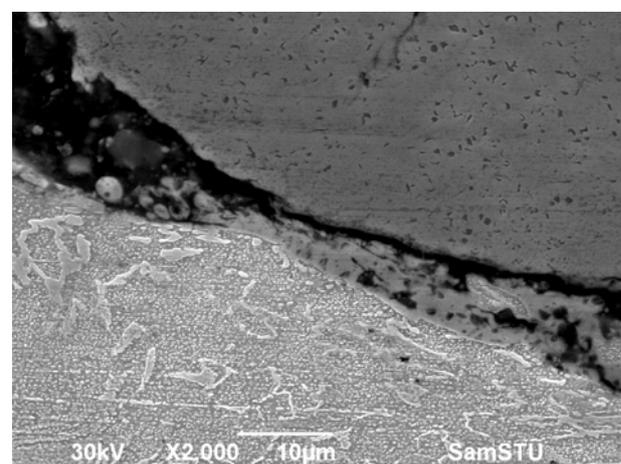
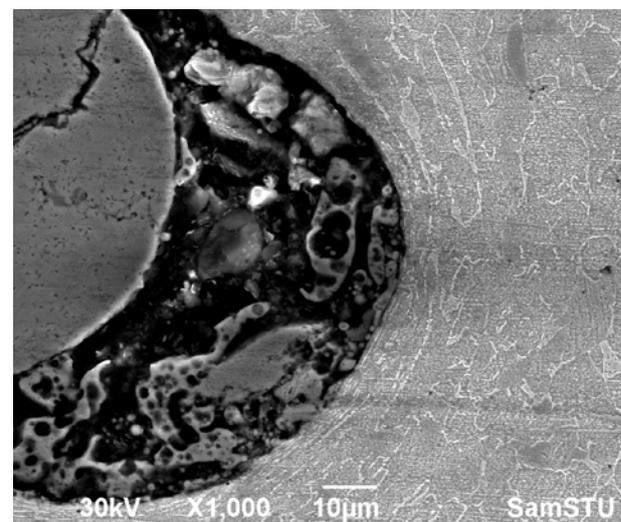
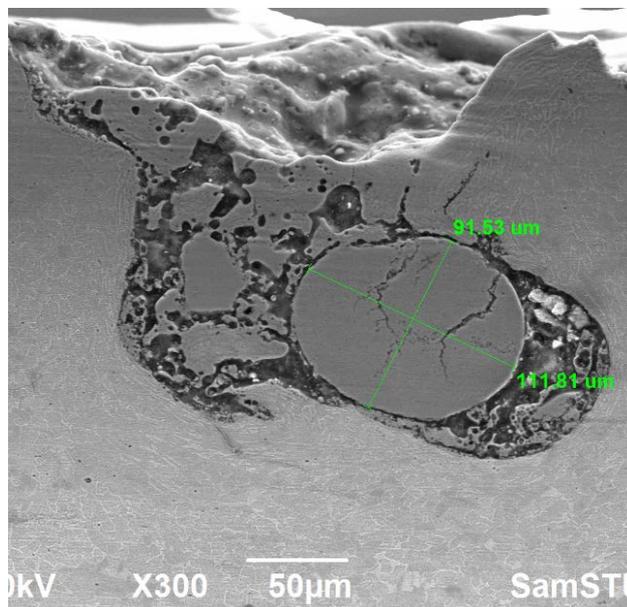


Рис. 1. Графики движения частиц стали в алюминии при разных вариантах расчета

В ходе экспериментальных исследований после обработки образца высокоскоростным потоком частиц изготавливались микрошлифы и осуществлялось травление шлифа раствором азотной кислоты. На рис. 2 представлены результаты внедрения отдельной частицы в стальную подложку. По полученным фотографиям (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 сдавливающих 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 расстояние до 100 мкм от границы трека. Глубины проникания частиц достигали

значения 230 мкм, что соответствует рассчитанным значениям скоростей (1500-3000) м/с. В сплавах железа при ударно-волновом воздействии возникают полиморфные превращения [3]. Существование каждой из трех фаз α , γ и ϵ обусловлено определенным сочетанием температуры T и давления p .



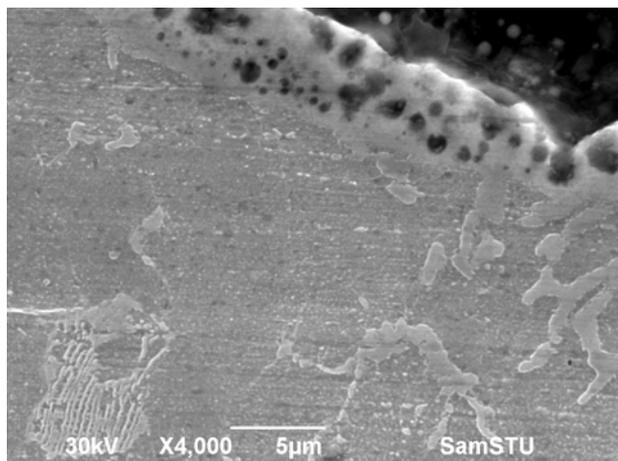


Рис. 2. Внедрение частицы железо-никелевого сплава в стальную подложку

Движущийся фронт касания частицы порождает распространяющуюся ударную волну, которая формирует в металле деформированный слой. Так как ударный процесс длится очень короткое время (доли микросекунд), взаимодействие можно считать адиабатическим и полагать, что вся энергия деформации преобразуется в тепло, которое не успевает рассеиваться за счет теплопроводности и концентрируется в малой пограничной области контакта. В [3] приведена зависимость температуры ударного сжатия в зависимости от относительного объемного сжатия ζ . Используя характерное расстояние между элементами карбидной сетки, получили оценку значения $\zeta < 0,5$. Аппроксимируя указанную зависимость, получаем температуру ударного адиабатического сжатия железа превышающую температуру кипения. Вспененный характер материала подложки (сталь 3) свидетельствует о кипении. Видимые размеры пор, образованных при кипении составляет от сотен нанометров до единиц микрометров. Граница перехода от основного материала к кипящему слою четкая. Образованный вспененный материал имеет мартенситную структуру без карбидных включений. Такие выводы можно сделать по фотографиям микрошлифов. С другой стороны, расчет давления во фронте взаимодействия дает значения в диапазоне $P = (0,5-5)$ ГПа, в то время как плавление железа происходит при сжимающем напряжении на фронте ударной волны равно 300 ГПа. Следовательно, с этих позиций нельзя обосновать даже плавления стальной подложки.

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 скоростям частиц до 3000 м/с.

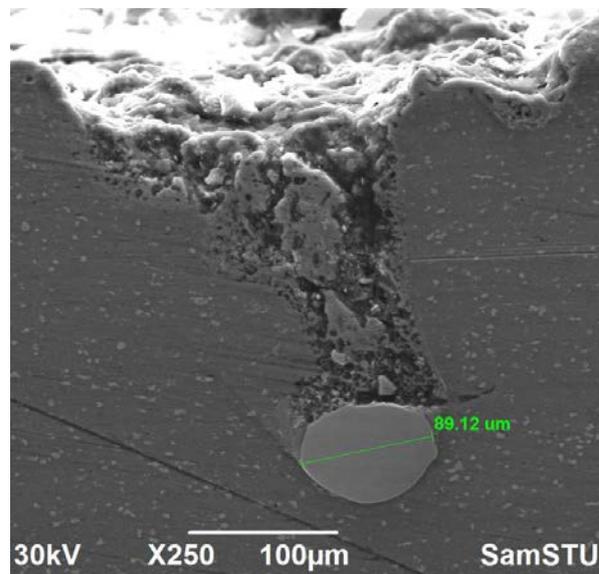


Рис. 3. Зона внедрения частицы порошка ПР-Х11Г4СР в алюминиевый сплав

Таким образом, возникает ряд противоречий при попытках объяснить процессы, протекающие при соударении микрочастиц с подложками. Очевиден факт плавления металла в области трека частицы вследствие гидродинамического механизма торможения, однако отсутствуют количественные модели, объясняющие процесс кипения металла в зоне повышенного давления перед частицей. В тоже время высокая скорость движения частицы (1-3) км/с может привести к малой толщине слоя расплавленного металла (вследствие конечности скорости движения фронта его плавления и зависимости этой величины от градиента температуры). В этом случае процесс торможения частицы будет определяться главным образом упругопластическими свойствами металла мишени, а расплавленный металл играет роль смазки при движении материала мишени относительно поверхности частицы. На рис. 4 представлена фотография поверхности микрочастицы, которая косвенно подтверждает предложенный механизм.

На рис. 4 видно, что расплавленный металл, вытесненный частицей из трека, также имеет вспененную структуру. Вероятно, это связано с кипением перегретого при атмосферном давлении за частицей расплава металла, который в зоне высокого давления перед частицей находится в равновесном жидком состоянии. То, что толщина пузырькового следа плавно уменьшается в сторону фронта удара, а также малый объем вытесненного расплава говорит в пользу реализации представленного выше механизма. Это

предположение требует теоретического обоснования, которое предполагает решение уравнения теплопроводности для движущейся частицы. При этом существенной проблемой является постановка движущихся в пространстве граничных условий, которая предполагает наличие математической модели преобразования кинетической энергии в тепловую.

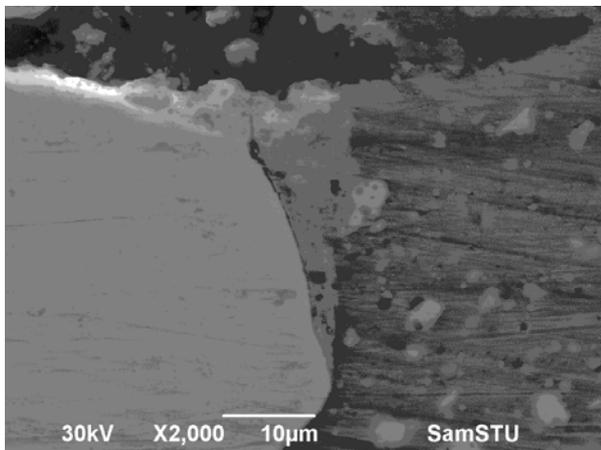


Рис. 4. Вытеснение расплавленного слоя из зоны контакта

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. Калашиников, В.В. Разработка и исследование эффективности импульсных устройств на основе энергонасыщенных материалов для модификации поверхности деталей машин высокоскоростными потоками частиц / В.В. Калашиников, И.Д. Ибатуллин, С.Ю. Ганигин и др. // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т.14, №1. С. 615-619.
3. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е перераб. В 2 т. Т.1. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 832 с.

HIGH SPEED IMPACT OF SOLID MICROPARTICLES AND THE SUBSTRATE

© 2013 S.Yu. Ganigin, V.V. Kalashnikov, I.D. Ibatullin, A.Yu. Murzin, O.Yu. Glazunova, A.A. Grigoryev

Samara State Technical University

The results of studies of high-speed impact interaction of powder materials particles flow, dispersed by energy of explosion, with metal barriers. The effects due to the motion of spherical microparticles in the material are described, and models of interaction the solid particles to the substrate are given.

Key words: *implantation, penetration, microparticles, impact, melting, boiling*

Sergey Ganigin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department "Technology of Solid Chemical Substances". E-mail: ganigin@inbox.ru

Vladimir Kalashnikov, Doctor of Technical Sciences, President

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

Andrey Murzin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department "Technology of Solid Chemical Substances". E-mail: ttxb@inbox.ru

Olga Glazunova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department "Technology of Solid Chemical Substances"

Andrey Grigoryev, Post-graduate Student