

УДК 534.2

Ушеренко С.М., д-р техн. наук, профессор,
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

ЭФФЕКТЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ В МЕТАЛЛАХ В РЕЗУЛЬТАТЕ УДАРА ПОТОКА МИКРОЧАСТИЦ, РАЗОГНАННЫХ ВЗРЫВОМ

Новизна эффекта проникания порошковых частиц состоит в том, что частицы, разогнанные с помощью энергии взрыва и ударной волны, проникают в материал преграды на глубины, превышающие на два-три порядка величины диаметра ускоренных частиц [1], причем осуществляется объемное насыщение металлической матрицы материалом внедренных частиц. Объемное насыщение металлической матрицы материалом проникших частиц не достигается ни одним другим из известных методов импульсной обработки, таких как лазерное легирование, электронно-лучевая обработка материалов и др. Эти методы позволяют легировать лишь поверхностные слои, глубина которых измеряется сотнями микрометров. Глубина проникания порошковых частиц достигает десятков миллиметров. Экспериментально зарегистрирована глубина проникания в Al_2O_3 – 20 мм, SiO_2 – 25 мм, сталь – 50 мм, медь – 40 мм, алюминий – 60 мм.

При исследовании этого процесса выявился ряд особенностей, обуславливающих проникание частиц и явлений сопутствующих реализации этого явления:

а) Материал преграды подвергается обработке высокоскоростным потоком порошковых частиц за счет энергии взрывчатого вещества (ВВ). Эффект проникания частиц реализуется в интервале скоростей метаемых частиц 1...3 км/с [2], что не объясняется ранее изученными процессами проникания быстролетящего твердого тела в металлические преграды со скоростью, при которой соударение еще не приводит к заметному испарению и разлету материала тела и преграды (рис. 1).

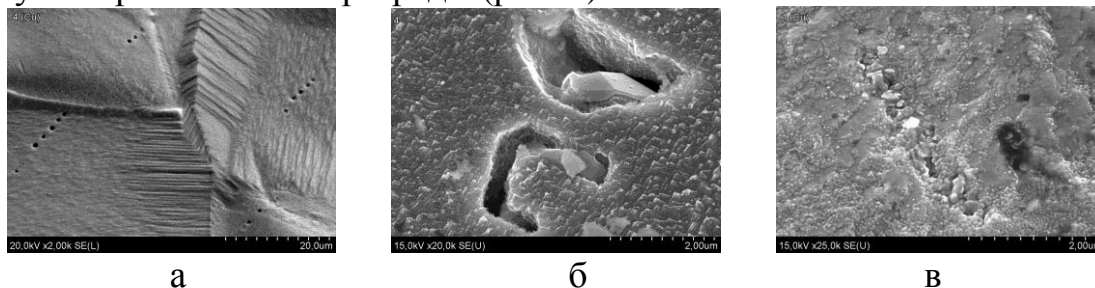


Рис. 1. Микроструктура образцов меди после воздействия потоком микрочастиц (а, б); структура канала и микрочастицы SiC в канале (в)

б) Экспериментально установлена зависимость глубины проникания от характерного размера частицы $h = (10^2 \dots 10^4) \cdot d$ (рис. 2). Перемещение частиц на глубину, превосходящую их размер в сотни и тысячи раз, характеризует аномальность процесса проникания частиц, т.к. по существующим баллистическим теориям при метании тел макроскопических размеров, глубина проникания не может превышать нескольких диаметров (в пределах 10) ударяющего тела [3].

в) Определен критический размер проникающих частиц $d_k > 10^{-4}$ м [4]. При нагружении преграды потоком частиц с $d > d_k$ явление проникания не наблюдалось.

г) Процесс проникания частиц реализуется лишь при нагружении металлической преграды потоком высокой плотности ($\rho_i \geq 10^3$ кг/м³) [5]. Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования столкновения с преградами одиночных высокоскоростных (>1 км/с) тел не реализуют процесс проникания, обеспеченного прониканием частиц на большие глубины [6,7]. Поэтому предполагается [4], что для внедрения частиц в металлическую преграду необходимо наличие организованного потока порошкообразного вещества, который в хорошем приближении можно рассматривать как непрерывную среду.

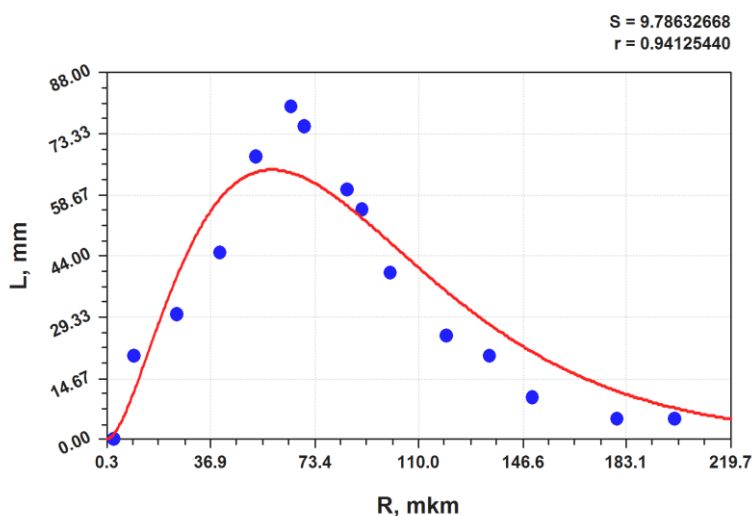


Рис. 2. Зависимость глубины проникания от размера микрочастиц

д) Определено значение давления при соударении потока порошковых частиц с преградой около 15 ГПа и выше [5, 8]. Вероятно, это значение определялось по известной методике построения ударных адиабат, т.к. нет сведений экспериментального подтверждения этих значений.

е) Зафиксировано время взаимодействия высокоскоростного дисперсного потока микрочастиц с материалом преграды. Оно имеет длительность $\tau_0 \sim (2 \dots 7) \cdot 10^{-5}$ с.

ж) В объеме матрицы число проникающих частиц составляет $10^2 \dots 10^3$ шт/мм² [8]. В зависимости от метода динамического микролегирования масса внедренных частиц составляет от 1 % [9] до 2...3 % [10] от общей массы метаемых частиц.

з) Общая картина эффекта проникания определяется также процессами, происходящими в материале на структурном и субструктурном уровнях, характеризующими динамику изменения состояния вещества. Проникание порошковых частиц в преграду сопровождается микроканализованием материала преграды [9-11]. Такие каналы видны при рассечении преграды вдоль движения частицы при металлографических и электроннооптических методах исследования (рис. 1,в).

Канал, по которому проходит частица, на всем протяжении оказывается почти схлопнувшимся и имеет искривленный вид. Лишь в зоне торможения частицы образуется полость, которая может иметь различный вид от формы типа полости от внутреннего взрыва до щели в виде трещины. Поперечное сечение канала не круглое, также имеет различную форму. Наблюдаемые параметры треков, остающихся после проникания частиц, имеют размеры порядка 1...3 мкм [10]. В случае метания металлических частиц на стенках канала обнаружен тонкий слой материала частиц [12-15].

При ударном воздействии происходит взаимодействие дисперсных частиц с металлической преградой, где в локальных участках реализуются давления, достигающие десятков килобар [3]. Вероятно, в связи с этим взаимодействие частицы с преградой сопровождается интенсивной пластической деформацией в области, непосредственно прилегающей к траектории движения частицы. И как следствие, стенки канала представляют собой аморфный слой повышенной твердости, что вносит дополнительный упрочняющий эффект.

В результате многолетнего сотрудничества между БЛНТУ и НТУ «ДП» в области фундаментальных исследований явления сверхглубокого проникания микрочастиц в металлы получены следующие основные результаты:

- 1) в изучении механизма образования химических элементов [16-20];
- 2) в исследовании влияния роли трибоэффекта в реализации СГП [21-25];
- 3) в разработке принципиально нового механизма проникания микрочастиц в металлы [26-31];
- 4) в изучении фазовых и структурных превращений в металлах [15-20].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андилевко, С.К. Некоторые эффекты сверхглубокого проникания/ С.К. Андилевко, Г.С. Романов, В.А Шилкин, С.М. Ушеренко // Письма в ЖТФ. – 1990. – Т.16, вып. 22. – С. 42-44.

2. Козорезов К.И. Локальное хрупкое разрушение как возможный механизм явления сверхглубокого проникания частиц малых размеров в твердое тело / К.И. Козорезов, А.К.Козорезов, Л.И. Миркин // Физика прочности и пластичности металлов и сплавов.: Тез. докл. XIV Межд. конф., 27-30 июня, Самара. – 1995. – С. 444.

3. Физика взрыва / Ф.А. Баум, Л.П. Орленко, К.П.Станюкович и др.; Под ред. К.П. Станюковича. – М.: Наука, 1975. – С. 423-432.

4. Structure and Characteristics of Metals after the Processing by Stream of the Particles of High Speed / S.E. Aleksentseva, D.V. Isaev, D.A. Krivchenko // Shock Waves in Condensed Matter: Proc. of Int. Conf.– St. Petersburg. Russia, September 2 – 6, 1996. – P. 122.

5. Андилевко, С.К. Сверхглубокое проникание частиц порошка в металлическую преграду в условиях переменного по ее толщине поля давлений / С.К Андилевко, О.В. Роман, С.М. Ушеренко, Г.С. Романов // Порошковая металлургия. – Мн.: Вышейшая школа, – 1987. – Вып.11. – С. 6-11.

6. Ушеренко, С.М. Дальнодействующие поля напряжений вблизи дисперсных частиц, возникающие при взрывном легировании металлических материалов / С.М. Ушеренко, С.И Губенко, В.Ф. Ноздрин // Металлофизика. – 1991. – Т.13, N7. – С. 57-64.

7. Симоненко, В.А. О проникновении отдельных микрочастиц в прочные преграды при столкновении с ними порошкообразных потоков/ В.А. Симоненко, Н.А. Скоркин, В.В. Башуров // ФГВ. – 1991. – 27, N4. – С. 45-51.

8. Фурс, В.Я. Исследования влияния высоких давлений создаваемых в локальных зонах, на состояние металлического тела / В.Я. Фурс, С.М. Ушеренко // Влияние высоких давлений на свойства материалов: Сб. ст. – Киев: Наукова думка, 1983. – С. 165-167.

9. Козорезов, А.К. Структурные эффекты при сверхглубоком проникании частиц в металлы / А.К. Козорезов, К.И. Козорезов, Л.И. Миркин // Физика и химия обработки материалов. –1990. – №2. – С. 51-55.

10. Исследование структуры и свойств углеродистых сталей после сверхглубокого проникания высокоскоростных частиц / А.Н. Бекренев Р.Г. Кирсанов, А.Л.Кривченко // Физика прочности и пластичности металлов и сплавов: Тез. докл. XIV Межд. конф., 27-30 июня, 1995. – Самара. С. 445.

11. Зворыкин, Л.О. Структурные особенности стали 45 после взаимодействия с высокоскоростными потоками порошков бориды ниобия и силицида молибдена / Л.О. Зворыкин, С.М. Ушеренко // Металлофизика. – 1993. – Т. 15, № 1. – С. 92-95.

12. Ушеренко, С.М. Изменения структуры железа и стали при сверхглубоком внедрении высокоскоростных частиц / С.М. Ушеренко, С.И. Губенко, В.Ф. Ноздрин // Металлы. – 1991. – № 1. – С. 124-128.

13. Горобцов, В.Г. Исследование влияния бомбардировки микрочастицами на структуру стальной мишени / В.Г. Горобцов, К.И.

Козорезов, С.М. Ушеренко // В сб.: Порошковая металлургия. Мн.: Высшая школа. – 1982. – Вып. 6. – С. 19-22.

14. Ноздрин, В.Ф. О механизме упрочнения металлов при сверхглубоком проникании высокоскоростных частиц / С.М. Ушеренко, С.И Губенко // ФХОМ. – 1991. – № 6. – С. 19-24.

15. Эффекты электромагнитного излучения, наблюдаемые в условиях нагружения высокоэнергетическим потоком порошковых частиц / В.И. Овчинников, Е.А. Дорошкевич, А.И. Белоус, Т.В. Петлицкая, О.П. Реут, С.М. Ушеренко // Физика и техника высокоэнергетической обработки материалов: Сб. научн. статей / редкол.: В.В.Соболев [и др.]. Днепропетровск: Арт-Пресс. – 2007. – С. 153-160.

16. Owsik J., Sobolev V.V. Possible reasons of elements degradation of the control systems of space vehicles // Scientific Israel – technological advantages, 2008. – V.10, No. 1. – P. 75-78.

17. Owsik J., Jach K., Usherenko S., Usherenko Y., Figovsky O., Sobolev V. The physics of superdeep penetration phenomenon // Journal of Technical Physics, 2008. – V.49, N 1. – P. 3-25.

18. Соболев В.В., Ушеренко С.М. Физика сверхглубокого проникновения микрочастиц в металлы // Межд. Конф. Ударные волны в конденсированных средах, Киев, Украина, 16-21 сентября 2012. – Київ: Інтерпрес ЛТД, 2012. – С. 171-179.

19. Sobolev, V.V., Usherenko, S.M. (2008) Formation of chemical elements under superdeep penetration of lead microparticles in ferrous target // Advanced Materials Research Volume 47-50 PART 1, 2008, Pages 25-28 Multi-functional Materials and Structures - International Conference on Multifunctional Materials and Structures; Hong Kong, P.R.; China; 28 July 2008 до 31 July 2008; Код 74080.

20. Owsik, J., Sobolev, V.V. (2008) Possible reasons of degradation of elements of space vehicle control-systems // Advanced Materials Research Volume 47-50 PART 2, 2008, Pages 1270-1273 Multi-functional Materials and Structures - International Conference on Multifunctional Materials and Structures; Hong Kong, P.R.; China; 28 July 2008 до 31 July 2008; Код 74080.

21. Sobolev, V.V., Usherenko, S.M. (2006) Shock-wave initiation of nuclear transmutation of chemical elements // Journal De Physique. IV: JP Volume 134, August 2006, Pages 977-982 8th International Conference on Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dyanmic Loading; Dijon; France; 11 September 2006 до 15 September 2006; Код 68460.

22. Ушеренко Ю.С., Ушеренко С.М., Соболев В.В. Наномодифицирование структуры цветных металлов в режиме сверхглубокого проникания // Высокоэнергетические системы, процессы и их модели. – Д.: Акцент ПП, 2013. – С. 110-122.

23. Soboliev V.V., Usherenko S.M., Bilan N.V. Physical Mechanics of Microparticles Superdeep Penetration into Metals // Scientific Israel- Technological Advantages. – VOL. 15, 2013, No.3, p. 91-97.

24. Sobolev V.V., Bilan N.V., Baskevich A.S., Stefanovich L.I. Electrical charges as catalysts of chemical reactions on a solid surface // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2018 №4, 50-58.

25. Sobolev V., Bilan N.V., Baskevich A.S., Stefanovich L.I. (2018) Electrical charges as catalysts of chemical reactions on a solid surface // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2018, №4, 50-58.

26. V. Sobolev, N.Bilan, R.Dychkovskiy, E.Caseres Cabana, A.Smolinski (2020) Reasons for breaking of chemical bonds of gas molecules during movement of explosion products in cracks formed in rock mass // International journal of mining science and technology.

27. Соболев В.В., Ушеренко С.М., Чой К.И. К вопросу о дестабилизации служебных параметров систем управления аппаратов при длительных полетах // Физика и техника высоких давлений. – 2005. – Т.15, №3. – С. 41–46.

28. Соболев В.В. Ушеренко С.М. образование химических элементов при сверхглубоком проникании микрочастиц свинца в железную мишень // Сб н. тр. Импульсная обработка материалов.-Днепропетровск: НГУ,2005.-С.121-126.

29. Соболев В.В., Ушеренко С.А.М., Губенко С.И. Физический механизм сверхглубокого проникания микрочастиц в твердые фазы // Науковий вісник НГА України. - 1998.-№3.-С.62-65.

30. Sobolev V.V., Usherenko S.M. Forming of "plasma focus" at superdeep penetration of microparticles in solid // Shock-Assisted materials synthesis and processing: science, innovations and industrial implementation. – Moscow: TORUS PRESS Ltd., 2008. – P. 117).

31. Sobolev V.V., Baskevich A.S., Shiman L.N., Usherenko S.M. (2016) Mechanism of thick metal walls penetration by high-speed microparticles // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2016, – №6.–P. 74-82.

32. Соболев В.В., Ушеренко С.М., Баскевич А.С. Влияние размера и скорости твердых микрочастиц на глубину их проникновения в металлы // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (21-23 мая 2014 г., г. Бийск) / Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2014. – С. 97-101.

33. Соболев В.В., Ушеренко С.М., Баскевич А.С. Некоторые закономерности процесса сверхглубокого проникновения твердых микрочастиц в металлы // Strategy of Quality in Industry and Education // X International Conference. June 6-13, 2014, Varna, Bulgaria. – Varna, 2014. –Pp. 152-160.