

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СВЕРХГЛУБОКОГО ПРОНИКАНИЯ МИКРОЧАСТИЦ В МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МИШЕНИ

Проведены всесторонние исследования структуры, элементного состава и механизма сверхглубокого проникания микрочастиц микронных размеров, и установлена зависимость между размерами микрочастиц и глубиной проникания в стальную мишень при бомбардировке ее микрочастицами со скоростями 1-3 км/с. В качестве материала мишени для исследования была выбрана инструментальная сталь Р6М5. Проведенный комплекс теоретических и экспериментальных исследований показал, что при бомбардировке металлических мишеней микрочастицами со сверхзвуковой скоростью размерами до 120 мкм происходит микросекундное резкое снижение вязкости металла в пределах зоны, ограниченной поверхностями контакта преграды и микрочастицы, за счет явлений квантовой механики. Понимание механизмов сверхглубокого проникания микрочастиц позволит создать для промышленности новые конструкционные материалы с уникальными свойствами.

Ключевые слова: сверхглубокое проникание, тонкая структура, вязкость, время релаксации.

Постановка проблемы. Целенаправленное создание материалов с прогнозируемыми свойствами с целью улучшения их эксплуатационных и технологических свойств, а также для удешевления их производства является одной из наиболее перспективных задач современного материаловедения. Решение данной проблемы позволит создавать новые металлы и сплавы с уникальными свойствами, и как следствие, получение нового комплекса структур с необычными физическими и механическими свойствами. Актуальной задачей является разработка новых принципов получения защитных конструкций и подбор материалов композитов с целью расширения спектра возможностей инновационных конструктивных решений.

Современные проблемы. Импульсное воздействие на преграду высокоскоростных макро- и микроударников характеризуется различными деформационными процессами, динамическими аспектами прочности преград, условиями соударения на предельных режимах прочности материалов. Одним из наиболее эффективных методов высокоскоростного метания ударников является применение энергии взрыва взрывчатых веществ, способных обеспечить метание в большом диапазоне скоростей и энергий. Данный метод позволяет формировать ударные волны в широком

диапазоне давлений, которые радикально изменяют характеристики материала преграды [1–4]. Одной из проблем, которая возникает при бомбардировке металлических мишеней микрочастицами со сверхзвуковыми скоростями, является их аномально глубокое проникание в материал мишени.

Создание теории описания процессов проникания микрочастиц в преграды представляет фундаментальное значение для техники и физики сверхглубокого проникания [5–7].

Исследования фазовых и структурных превращений в твердом теле с применением различных физических способов воздействия на микроструктуру свидетельствуют о том, что простые воздействия, например: удар, нагрев, сжатие, прохождение электрического тока и другие, не приводят к принципиально новым результатам. Особенность совместных (или последовательных) физических воздействий обусловлена как минимум двумя факторами, которые могут быть совмещены во времени либо действовать последовательно. Перспективы применения двух и более видов физических воздействий связаны главным образом с решением таких актуальных задач как получение новых фундаментальных знаний, создание новых неэнергоёмких технологий, получение новых материалов и материалов с новым комплексом физических свойств. Основная

идея комплексных обработок состоит в физических воздействиях на предварительно дестабилизированную микроструктуру материалов. Следует отметить, что с применением стандартных экспериментальных методик и способов обработки подобные результаты ни в одном эксперименте не получены.

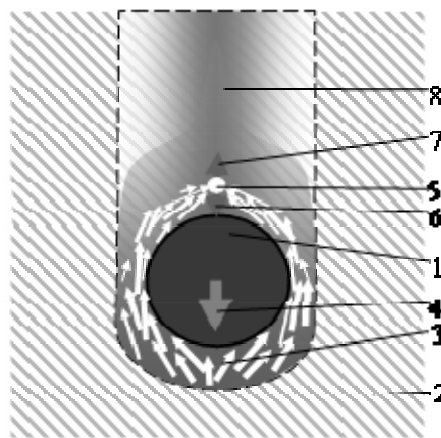
Цель работы – изучение механизма и построение модели сверхглубокого проникания в стальную мишень при бомбардировке ее микрочастицами со скоростями 1-3 км/с, а также установление зависимости между размерами микрочастиц микронных размеров и глубиной проникания.

Материалы и методика исследований. Металлические преграды изготавливали из конструкционной стали Р6М5. В качестве взрывчатого вещества использовали аммонит №6ЖВ; использовали порошки микрочастиц SiC размерами до 120мкм. Микрорентгеноспектральный анализ проводили на растровом электронном микроскопе РЕММА-102-2, микродифракцию на электронном микроскопе JEM 100СХП (JEOL), рентгеноструктурный анализ проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-2 в монохроматизированном Co-K α излучении. Измерение поверхностной плотности зарядов проводили бесконтактным индукционным методом. Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием теории случайных ошибок.

Результаты исследований.

Проникание микрочастиц в твердой среде на большие глубины не может быть представлено в виде известных гидродинамических, квантово-механических и других физических моделей. Проникание микрочастиц на глубины до 0,2м, свидетельствует об очень малом сопротивлении движению твердых микрочастиц. Это может быть связано с аномально низкими значениями вязкости металла преграды. Согласно классическим представлениям частица способна проникнуть в мишень на 5-6 диаметров. Противоречие, возможно, устранить, если принять допущение, что вязкость изменяется только в пределах зоны, ограниченной поверхностями контакта преграды и микрочастиц (рис.1). На

основании этого допущения необходимо объяснить процессы вызывающие сверхглубокое проникание на основе известных физических законов.



- 1 – микрочастица; 2 – металлическая преграда;
3 – плазма; 4 – движение микрочастицы;
5 – «плазменный фокус»;
6, 7 – новообразованные плазменные струи;
8 – зона кристаллизации новой фазы

Рис. 1. Схема формирования системы «преграда – микрочастица»:

Для получения данных о строении и кристаллической структуре обрабатываемых материалов были проведены рентгеноструктурные и электронно-микроскопические исследования поверхности стали R6M5 до и после обработки показали, что на поверхности стали виден отдельно взятый кратер вхождения микрочастицы в металл мишени (рис.2).

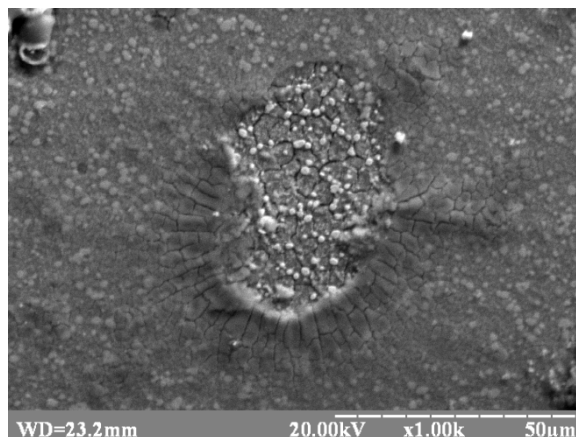


Рис. 2. Микрофотография поперечного сечения стали Р6М5 после бомбардировки потоком частиц SiC.

Растрескивание металла внутри и на границах кратера свидетельствует о большой скорости охлаждения и невозможности образования равновесной структуры. Для выяснения типа структурной упаковки была проведена микродифракция на электронном микроскопе JEM 100CXII (JEOL). Микродифракция одной из белых глобул кратера свидетельствует о том, что его структура является смесью аморфной и нанокристаллической структур (рис.3). Об этом свидетельствует наличие диффузных гало и накладывающихся на него пятен отдельных отражений. Наличие диффузного гало свидетельствует о скоростях охлаждения порядка 10^5 - 10^6 град/с для данного состава. По классическим законам такая скорость охлаждения возможна при большом градиенте температур и при большой теплопроводности материала подложки.

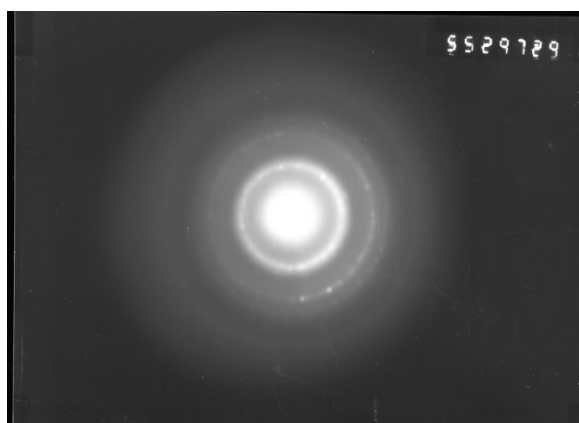


Рис. 3. Микродифракция белой глобулы в кратере вхождения микрочастицы SiC на поверхности инструментальной стали Р6М5.

Морфология поверхности поперечного сечения (рис.2–3), а также продольных сечений на разных участках (рис.4-6) показала, что на них видны треки частиц и сами частицы. Рентгеноструктурные исследования образцов показали, что фазовый состав остается практически одним и тем же (рис.7–10), а изменяется лишь незначительно количественный состав. В таблице 1 приведены данные структурного анализа, свидетельствующие от том, что параметры тонкой структуры приближенно равны, и следовательно, необходимо искать закономерности сверхглубокого проникания

необходимо искать в субмикронных явлениях – квантовых эффектах.

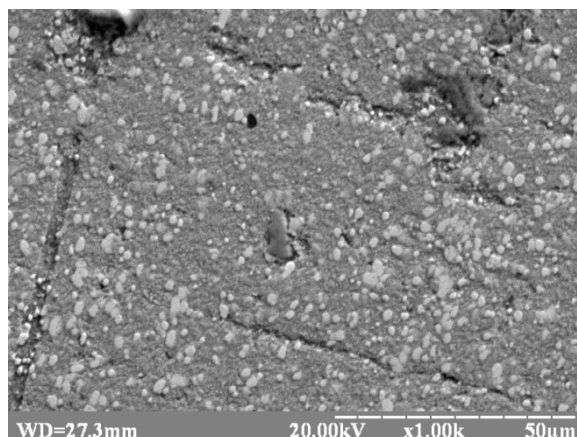


Рис. 4. Продольное сечение стали после бомбардировки микрочастицами (участок №1).

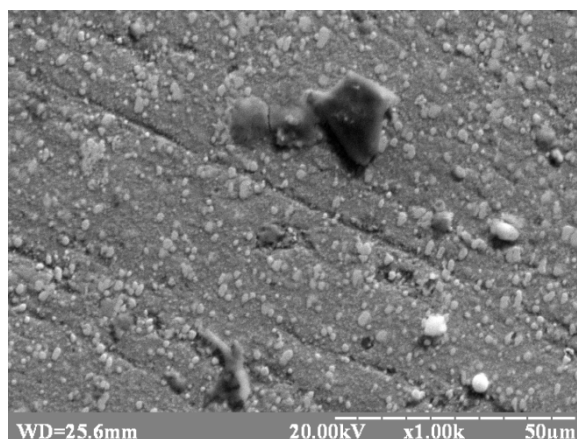


Рис. 5. Продольное сечение стали после бомбардировки микрочастицами (участок №2).

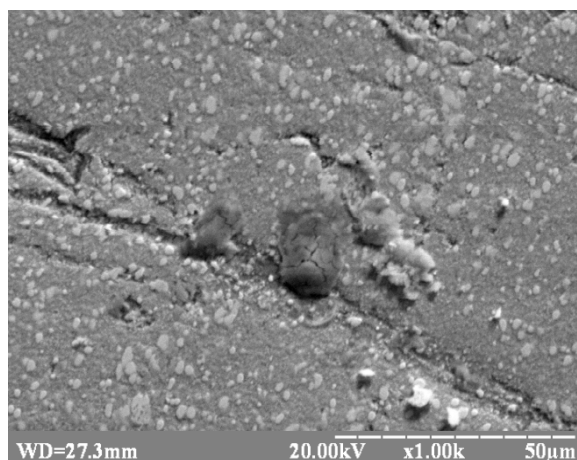


Рис. 6. Продольное сечение стали после бомбардировки микрочастицами (участок №3).

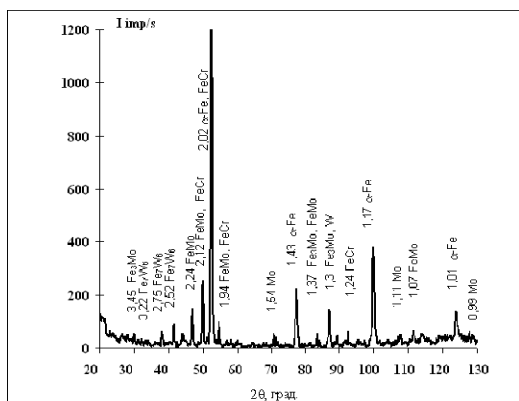


Рис. 7. Рентгеновская дифрактограмма образца поперечного сечения стали. Co-K α излучение.

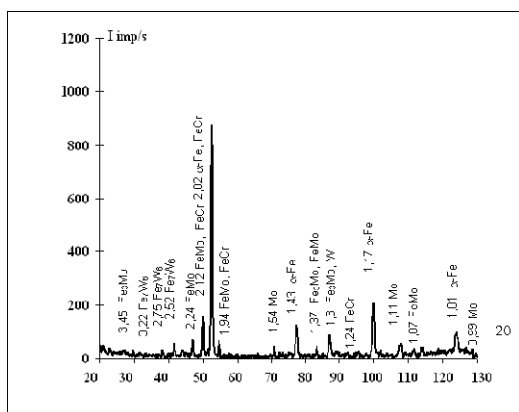


Рис. 8. Рентгеновская дифрактограмма образца продольного сечения (участок №1). Co-K α излучение.

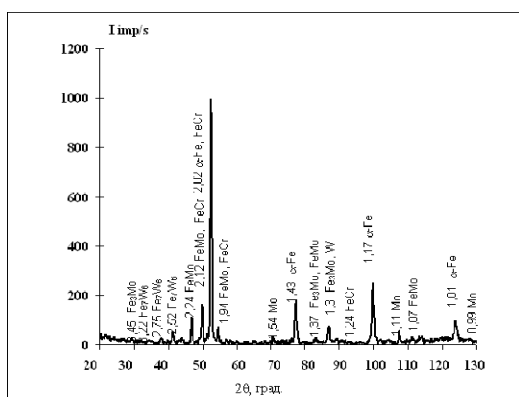


Рис. 9. Рентгеновская дифрактограмма образца продольного сечения (участок №2). Co-K α излучение.

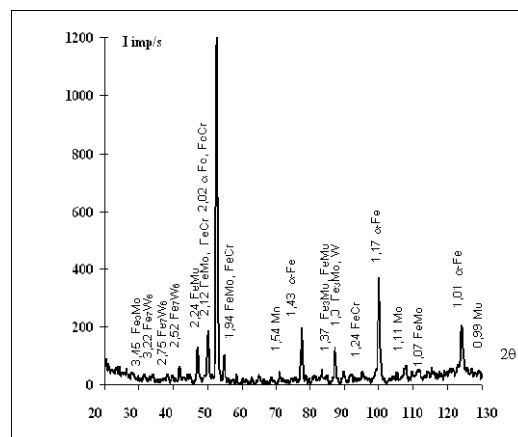


Рис. 10. Рентгеновская дифрактограмма образца продольного сечения (участок №3). Co-K α излучение.

Таблица 1 – Параметры тонкой структуры стали после бомбардировки микрочастицами.

Образец	Параметр решетки, а,Å	Размер кристаллитов, L,Å	Степень Микроискажений, %*10 ⁻³	Плотность дислокаций, D*10 ¹⁰ , см ⁻²
1	2,8691	1541	1,58	7,50
2	2,8715	1491	1,27	7,84
3	2,8715	1524	1,08	7,52
4	2,8707	1411	1,05	7,75

После кумулятивного выстрела температура микрочастицы имеет температуру не более 1200К [5]. При начальной скорости 1000 м/с и размером 50 мкм она проникает на глубину до 0,2 м.

Решение уравнения теплопроводности для для нагревания шара показало, что в момент соударения микрочастицы о мишень ее температура намного меньше температуры плавления мишени.

Таким образом, необходимо сделать допущение о том, происходит разрыв химических связей не температурным методом. С микроскопической точки зрения скорость охлаждения подразумевает собой скорость образования химических связей и скорость уменьшения амплитуды колебаний атомов. Для осуществления этого процесса сначала необходимо химические связи

дестабилизировать, увеличить амплитуду колебания атомов и разорвать их. В данном случае это возможно, если уменьшить вязкость металла мишени.

Частицы с размерами 20–120 мкм как аналоги пылевой плазмы могут заряжаться потоками электронов и ионов, а также путем фото-, термо-, или вторичной эмиссии электронов с поверхности частиц. Если микрочастица захватывает электроны, то величина заряда может достигать $\sim 10^2 \dots 10^5$ элементарных зарядов. В результате средняя кулоновская энергия взаимодействия частиц намного превышает тепловую энергию. Предположим, что сверхглубокое проникание происходит за счет кратковременного уменьшения вязкости, происходящее за счет квантово-механических эффектов. В результате удара микрочастиц о преграду возникает ударная волна, распространяющаяся со скоростью 5100 м/с (для стали), и происходит взаимодействие фононов со свободными электронами металла и электронами, образующими химические связи, а также зарядами, находящимися на поверхности микрочастицы. Оценка времени звуковой волны для микрочастиц диаметром 20...120 мкм показала, что оно составляет $(2 \dots 12) \times 10^{-8}$ с. При этом, звуковые волны (фононы) опережают микрочастицы и взаимодействуют с химическими связями и свободными электронами. Данный процесс приводит к тому, что электроны на связи и свободные электроны возбуждаются, т.е. переходят на более высокий энергетический уровень. А это означает, что энергия связи уменьшается на ΔE . Переходы электронов возможны с изменением спина (переходы с уровня 1/2 на 3/2 и т.д.). Переходы электронов (возбуждение электронов) с уровня на уровень длится $t_{\text{возб}} = 10^{-12} - 10^{-13}$ с, а релаксация валентных электронов при переходе на более низкие уровни длится $t_{\text{Relax}} = 10^{-4} - 10^{-5}$ с. Т.е. можно утверждать, что свободные электроны в данном случае играют роль доноров энергии, которая переходит на химические связи, разрыхляя их. Связи дополнительно возбуждаются и рвутся, частица начинает движение в плазме твердого тела. Сравнивая t и t_{Relax} , можем констатировать, что не на

всех химических связях успевают произойти релаксация за время движения микрочастицы. Таким образом, разность времени возбуждения и времени релаксации дает промежуток времени, в течении которого снижается вязкость в канале ограниченном поверхностью контакта микрочастицы и преграды. Используя уравнение Стокса $ma = 6\pi\eta rv$, оценим, какую величину вязкости должна иметь гипотетическая среда, по которой микрочастица диаметром 50 мкм проникнет на глубину 0,1 м, имея среднюю скорость 1000 м/с, которая составляет (рис.11–12).

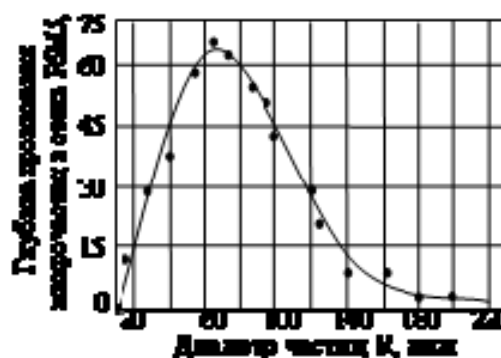


Рис. 11. Экспериментальная зависимость глубины проникания микрочастиц SiC в стали Р6М5, которые движутся со скоростью 1000 м/с, от их размера.

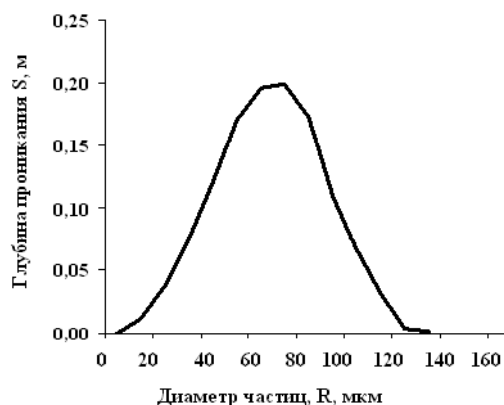


Рис. 12. Теоретическая зависимость глубины проникания микрочастиц SiC в стали Р6М5, которые движутся со скоростью 1000 м/с, от размера микрочастиц.

Сравнение экспериментальной и теоретической зависимости глубины

проникания от радиуса частиц показало, что основная часть теоретической кривой близка к экспериментальной. Отличия при больших радиусах микрочастиц можно объяснить тем, что мы брали идеальную шарообразную частицу. В действительности (экспериментальные) частицы имеют неправильную форму.

В результате теоретических и экспериментальных исследований процесс сверхглубокого проникания можно трактовать следующим образом:

– Микрочастица, вылетающая после кумулятивного взрыва, представляет собой плазменную частицу, содержащую как положительные, так и отрицательные ионы, а при взаимодействии с молекулами воздуха происходит дополнительное увеличение числа элементарных зарядов на 10^4 - 10^5 ;

– Во время столкновения с мишенью частица резко тормозит, а электронное облако устремляется вглубь преграды. Идущая впереди частицы движется звуковая волна (фононы) взаимодействует с химическими связями и свободными электронами внутри металла. Это приводит к возбуждению химических связей или к их разрушению;

– Налетающие на эти свободные электроны и химические связи электроны микрочастицы рвут химические связи, благодаря высокой энергии $T=10000\text{К}$, $P=50\text{ГПа}$;

– П.с. химические связи разрушены, то ионы находятся некоторое время в ионном состоянии (плазма твердого тела) или квазиплазме, подобной жидкому состоянию. П.с. при этом вязкость незначительная, то и микрочастица движется как в жидкости;

– По истечении времени 10^{-4} - 10^{-5} с происходит релаксация химических связей;

– Частица оставляет после себя турбулентный след, подобный движению в жидкости. Турбулентный след начинает кристаллизоваться, а поскольку скорость кристаллизации большая, то полностью цилиндр не заполняется и остается узкий цилиндр (рис.1), а в некоторых местах появляется аморфная структура (рис.3). Структура закристаллизовавшегося турбулентного следа резко отличается от структуры самой мишени (рис.2).

Проведенные расчеты с использованием данных предположений

(рис.13) показали, что вязкость металлической мишени имеет значение $\eta = 0,005 - 0,08 \text{ н/м}$ на протяжении 10^{-4} - 10^{-5} с, а это позволяет микрочастице проникнуть на глубину мишени до 0,2м.

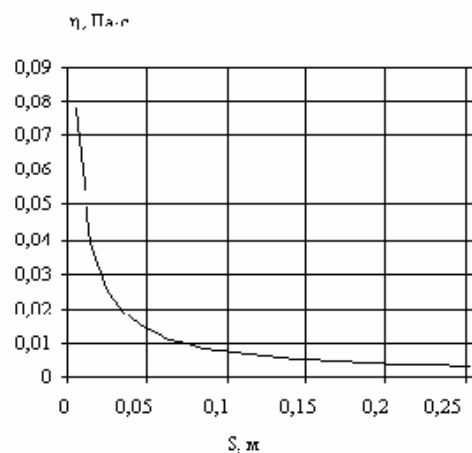


Рис. 13. Зависимость вязкости от глубины проникания ($R=50 \text{ мкм}$)

Выводы.

1. Впервые установлено, во время проникания микрочастиц в металлические преграды происходит микросекундное снижение вязкости.

2. Сверхглубокое проникание наблюдается только в определенный промежуток времени, который образуется в результате разных времени возбуждения и времени релаксации химических связей.

3. Сверхглубокое проникание наблюдается только в случае разгона большого количества микрочастиц и заряда их негативными зарядами.

4. Проведенный комплекс теоретических и экспериментальных исследований установил, что максимальное проникание характерно для частиц размерами 50–80 мкм.

Направление дальнейших исследований.

Исследования будут направлены на дальнейшее развитие теории и практики сверхглубокого проникания микрочастиц в различные материалы и изучения их физических процессов.

Список литературы

1. Ушеренко С.М. Сверхглубокое проникание микрочастиц в преграды и создание композиционных материалов [Текст]/ С.М. Ушеренко// Минск: НИИ

импульсных процессов с опытным производством. – 1998.-210 с.

2. Маликов Л.П. Структура и свойства плазменно-детонационного покрытия [Текст]/ Л.П.Маликов// Журнал физики и инженерии поверхности.- Т. 12, № 2.– 2012.–С. 550–555.

3. Aleksentseva S.E. Peculiarities of the Dynamic Interaction Between the Directed Stream of High Speed Particles and Metals [Text]/ S.E.Aleksentseva, A.L.Krivchenko // Shock Waves in Condensed Matter: Proc. of Int. Conf. – Kiev, Ukraine, 16 – 21 September. – 2012 – P. 435–438.

4. Соболев В.В. Физический механизм сверхглубокого проникновения микрочастиц в твердые тела [Текст]/В.В.Соболев, С.М.Ушеренко//Науковий вісник НГА України.-№3.– 1998.–С.62–65.

5. Sobolev V.V. Shock-wave initiation of nuclear transmutation of chemical elements [Text]/V.V. Sobolev, S.M.Usherenko// Journal de Physique.-IV,№134.– pp.977–982.

6. Sobolev V.V. Mechanism of thick metall wall penetration by high-speed microparticles [Text]/V.V. Sobolev, O.S. Baskevich, L.M. Shyman, S.M. Usherenko// Науковий вісник НГУ.– № 6.-2016.-С.75-83.

7. Баскевич О.С. Модель надглубокого проникання мікрочастинок у металеві мішені при надзвукowych швидкостях [Текст]/ О.С. Баскевич //В сб. науч. трудов «Строительство, материаловедение, машиностроение», Вып. 95, Серия «Стародубовские чтения 2017». – Днипро, 2017. – С.15–21.

8. Баскевич А.С. Скачкообразное уменьшение вязкости металлов при сверхглубоком проникании микрочастиц [Текст] /А.С. Баскевич, В.В. Соболев// В сб. материалов 77 Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» (Днипро, 11-12 мая 2017 г.), Днипро.- 2017. – С.282-284.

References

1. Usherenko S.M. (1998), "Superdeep penetration of microparticles in barrier and creation of composition materials", ["Sverchglubokoje pronikaniye mikrochastitz v

pregrady i sozdanije kompozitsionnykh materialov"], Minsk:NII impulsnykh processov s opytnym proizvodstvom, 210 p. (in Russian)].

2. Malikov L.P. (2012), "Structure and properties of plasma detonation coating", ["Struktura i svoistva plazmenno-detonazionnuy pokrytija"], Zhurnal fiziki i inzhenerii poverchnosti, Vol.12, No 2, pp. 550–555 (in Russian)].

3. Aleksentseva S.E., Krivchenko A.L. (2012), "Peculiarities of the Dynamic Interaction Between the Directed Stream of High Speed Particles and Metals", Shock Waves in Condensed Matter: Proc. of Int. Conf. Kiev, Ukrajine, 16 – 21 September", pp. 435–438.

4. Sobolev V.V., Usherenko S.M. (1998), "Physical mechanism super-deep penetration of microparticles in solids", ["Physical mechanism super-deep penetration of microparticles in solids"], Naukovyi visnyk NGA Ukrajiny, No 3, pp.62–65 (in Russian)]

5. Sobolev V.V., Usherenko S.M. (2006), "Shock-wave initiation of nuclear transmutation of chemical elements", Journal de Physique,-IV, No 134, pp.977–982.

6. Sobolev V.V., Baskevich O.S., Shyman L.M., Usherenko S.M. (2016), "Mechanism of thick metall wall penetration by high-speed microparticles", Naukovyi visnyk NGU, No 6,-pp.75-83.

7. Baskevich O.S. (2017), "Model of the superdeep penetration of microparticles in a metal target at supersonic speeds", ["Model nadglybokogo pronykannja mikrochastynok u metalevi misheni pry nadzvukovykh shvydkostjach"], V sb. Nauchn. Trudov "Stroitelstvo, materialovedenije, mashinostrojenije", Vyp.95, serija "Starodubovskije chtenija 2017", Dnipro, pp.15–21 (in Ukrainian)].

8. Baskevich A.S. (2017), "Saltatory reduction of viscosity at superdeep penetration of microparticles", ["Skachkoobraznoje umenshenije vjazkosti pri sverchglubokom pronikanii mikrochastitz"], V sb. Materialov 77 Mezhdunarodnoji nauchno-prakticheskoi konferentsii "Problemy i perspektivy razvitija zheleznodorozhnogo transporta", Dnipro, 11–12 Maja 2017., pp.282–284 (in Russian)].

Надійшла до редакції 18.10.2017

Рецензент д-р. економ. наук, проф. М.В.Румянцев.

Баскевич Александр Семенович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, кафедры строительства, геотехники и геомеханики, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (м. Днипро 49005, пр. Д. Яворницкого, 19), E-mail: abaskevich@ukr.net

ВИВЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ НАДГЛИБОКОГО ПРОНИКАННЯ МІКРОЧАСТИНОК В МЕТАЛЕВІ МІШЕНІ

Анотація. Проведені різносторонні дослідження структури, елементного складу та механізму надглибокого проникання мікрочастинок мікронних розмірів, і встановлена залежність між розмірами мікрочастинок та глибиною проникання в сталю мішень при бомбардуванні її мікрочастинками з швидкістю 1–3 км/с. В якості матеріалу мішені для досліджень була вибрана інструментальна сталь Р6М5. Проведений комплекс теоретичних і експериментальних досліджень показав, що при бомбардуванні металевих мішеней мікрочастинками з надзвуковою швидкістю розмірами до 120 мкм відбувається різке мікросекундне зниження в'язкості металу в границях зони, обмеженої поверхнями контакту перешкод і мікрочастинок, за рахунок явищ квантової механіки. Розуміння механізму надглибокого проникання мікрочастинок дозволить створити для промисловості нові конструкційні матеріали з унікальними властивостями.

Ключові слова: надглибоке проникнення, тонка структура, в'язкість, час релаксації.

Баскевич Олександр Семенович – кандидат фізико–математичних наук, старший науковий співробітник кафедри будівництва, геотехніки і геомеханіки, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет» (м. Дніпро 49005, пр. Д. Яворницького, 19)

E-mail: abaskevich@ukr.net

STUDY OF FEATURES OF SUPERDEEP PENETRATION OF MICROPARTICLES IN METALLIC TARGETS

Abstract. All-round research of structure, element composition and mechanism of the superdeep penetration of microparticles of micronic size were carried out. The dependence of the size of microparticles on the depth of their penetration in the steel target at bombardment it with microparticles at the speed of 1–3 km/s. Instrumental steel P6M5 was chosen as the material of the target for the research. The conducted complex of theoretical and experimental researches showed that at bombardment of metallic targets by microparticles sized up to 120 mkm at supersonic speed the microseconds fall-off viscosity of metal within the limits of the zone limited by the surfaces of contact of barrier and microparticles takes place due to the phenomena of quantum mechanics. Understanding the mechanism of the superdeep penetration of microparticles will let us create new construction materials with unique properties for industry.

Keywords: superdeep penetration, fine structure, viscosity, time of relaxation.

Baskevich Olexander – candidate of physico–mathematical Science, senior researcher, of department of building, geotechnics and geomechanics, State higher education institution «National mining university» (Dnipro, 49005, avenue D. Yavornitskogo, 19)

E-mail: abaskevich@ukr.net