

Еще раз о сверхглубоком проникании

© С.Н. Буравова

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН,
142342 Черноголовка, Московская область, Россия
e-mail: svburavova@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 6 декабря 2013 г.)

Процесс сверхглубокого проникания микрочастиц в природе не существует. Наблюдаемые в эксперименте С.М. Ушеренко каналные формообразования являются полосами адиабатического сдвига, которые возникают при ударе осколков облицовки кумулятивной выемки, куда помещается мелкодисперсный порошок.

Взрывная обработка металлических преград частицами с размером $100\text{--}1000\ \mu\text{m}$, которые разгонялись с помощью продуктов детонации кумулятивного заряда, позволила авторам [1] обнаружить глубокое внедрение микрочастиц в преграду. Согласно принципиальной схеме эксперимента С.М. Ушеренко, впервые обнаружившего этот эффект, порошковый материал помещается в облицованную кумулятивную выемку заряда взрывчатого вещества. Тонкая преграда на пути кумулятивной струи дробит ее. Образец подвергается трех- или пятикратному нагружению. После динамической обработки по всей глубине образца до $25\ \text{mm}$ обнаруживаются формообразования, напоминающие схлопнувшиеся каналы, которые удается выявить только после электролитического травления. Предполагается, что продольные каналы являются траекториями частиц, тогда глубина проникания частицы оказывается превышающей диаметр частицы в сотни и более раз. В материале происходит изменение тонкой кристаллической структуры, размер блоков уменьшается, а относительные микроскажения увеличиваются. Однако повышение микротвердости материала мишени не наблюдается. Следует заметить, что проникание микрочастиц на столь глубокие расстояния противоречит законам сохранения. Авторы пытаются объяснить нарушение законов. По их мнению под действием потока микрочастиц происходит перестройка структуры вещества, переход его в сверхпластическое состояние, сопровождающееся скачкообразным падением сопротивления деформации.

Ключом к пониманию импульсных процессов является волновая механика. Интересно проследить реакцию твердого тела на действие ударников, размеры которых близки к использованным в экспериментах Ушеренко.

Кавитационная эрозия характеризуется образованием глубоких иглоподобных раковин на поверхности преграды. По мнению многих исследователей такие разрушения могут создать только кумулятивные струи, которые возникают при несимметричном схлопывании кавитационного пузырька. Несимметричное схлопывание требует специальных условий, которые реализуются чрезвычайно редко. Учет волновых процессов при взаимодействии сферического пузырька с поверхностью твердого тела позволил установить, что струйный механизм не опре-

деляет изнашивание поверхности, разрушение обязано сферическим пузырькам. В условиях импульсного нагружения сферические ударники „жалят“ преграду [2].

Рис. 1 поясняет образование осевой продольной макро или микро трещины под зоной контакта. При ударе сферического ударника волна разгрузки возникает перед точкой контакта, когда скорость границы контактной поверхности становится меньше скорости звука материала преграды. Выход ударной волны на свободную поверхность сопровождается образованием „бугорка“ на поверхности мишени. Фокусировка волны разгрузки создает иглоподобную откольную зону высоких растягивающих напряжений на оси симметрии, ориентированную перпендикулярно к поверхности мишени [3]. Образование продольной повреждаемости в результате интерференции боковых волн разгрузки ударника названо в [4] эффектом „ужаления“. Согласно законам сохранения импульса и энергии, глубина проникания частицы в преграду равна $l/r_0 \approx p_0/\rho_0 c_0^2$, а расстояние, на

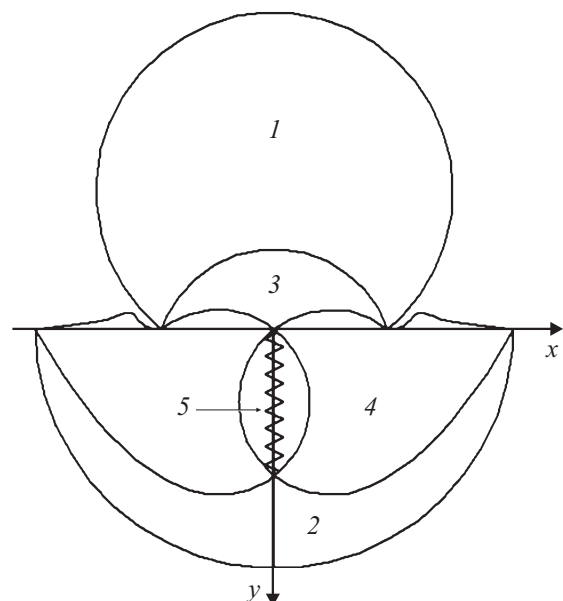


Рис. 1. Схема образования продольной откольной повреждаемости. 1 — сферический ударник, 2 — ударная волна в преграде, 3 — отраженная ударная волна, 4 — волна разгрузки, 5 — осевая зона фокусировки волны разгрузки.

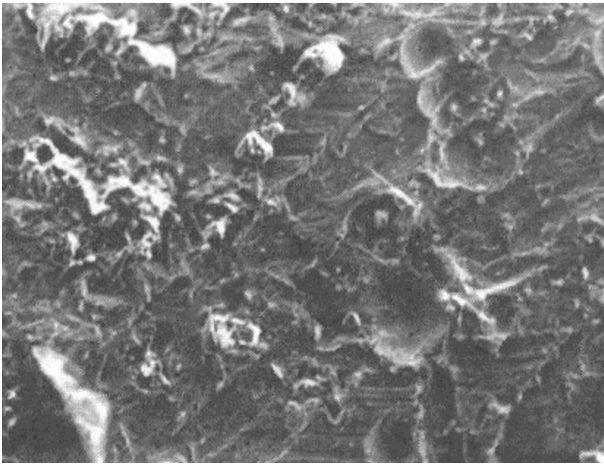


Рис. 2. Фотография мишени, после отрыва детонационного покрытия, полученного напылением на шлифованную поверхность образца.

которое углубляется продольная микротрещина, равно $L/r_0 \approx \text{tg} \arccos p_g/p_0$. Здесь p_0 — давление во фронте ударной волны, p_g — давление предела упругости Гюгонио, ρ_0, c_0 — начальные плотность и скорость звука [5]. Например, при $p_g = 0.45$ GPa и давлении в ударной волне $p_0 = 7.7$ GPa, глубина вмятины от удара частицы составит 2% от диаметра, а продольная микротрещина углубится на 8 диаметров частицы. Экспериментальное моделирование процесса образования продольной откольной повреждаемости проведено в [5].

Детонационное напыление имеет размер частиц и интенсивность нагружения, идентичные использованным в экспериментах. Канальные формообразования на продольных шлифах после травления образцов с детонационным покрытием обнаружить не удалось. На рис. 2 приведена фотография мишени после отрыва покрытия. Напыление проводилось на предварительно шлифованную поверхность. На рисунке видны округлые вмятины от удара расплавленных частиц, в центре которых обнаруживаются светлые зерна — это устье продольной трещины, куда затек напыляемый материал, будучи еще в расплавленном состоянии. По оценке глубина продольной микротрещины составляет $500 \mu\text{m}$ (при диаметре частицы $100 \mu\text{m}$). Обнаружить такую повреждаемость на продольных шлифах не представляется возможным. Только с использованием реплик удалось авторам [6] обнаружить продольную микротрещину при обработке поверхности потоком не разрушающихся при ударе микрочастиц (диаметр $70 \mu\text{m}$).

Изучение микроструктуры и состава стали, подвергнутой воздействию высокоскоростным потоком микрочастиц, разогнанных на баллистической установке, в широком диапазоне плотностей и скоростей не обнаруживает сверхглубокого проникания частиц [7]. Наблюдаемые неоднородности микроструктуры стальной преграды яв-

ляются областями локальной деформации по границам зерен и неметаллическим примесям, распределенными по объему.

Эффект ужаления сопровождается нагружение поверхности импульсами лазерного излучения [4]. Крупные сквозные отверстия возникают при подрыве заряда взрывчатого вещества, контактирующего с поверхностью твердого тела. Каждый из перечисленных процессов имеет свои индивидуальные особенности. Общим является факт образования продольных откольных макро- или микротрещин. Эффект ужаления является общим свойством действия ударников ограниченных размеров [8]. К сожалению, этот вид откольного разрушения на сегодня остается не изученным в отличие от торцевого откола. Существует множество объектов техники, разрушение которых в условиях динамического нагружения идет через образование иглоподобного откола. К таким объектам относятся бандажные полки лопаток турбин, судовые винты, вентиляторные лопасти дымососов, обшивки летательных аппаратов и т.д. Начальная стадия изнашивания поверхности в процессе капельной, пылевой, кавитационной эрозий идет через образование иглоподобной трещины.

Из анализа экспериментальных данных следует, что аномальное проникание частиц в преграду отсутствует, когда поверхность твердого тела подвергается действию потока частиц. В экспериментах Ушеренко микрочастицы помещались в кумулятивную выемку с металлической облицовкой. Именно крупные осколки облицовки создают в преграде продольную повреждаемость, которая зависит от размера осколка. Эффект сверхглубокого проникания возникает в предположении, что канальные формообразования есть траектории частиц. Глубину проникания определяют по отношению длины продольной микротрещины, создаваемой осколками облицовки, к размеру микрочастиц, не имеющих никакого отношения к наблюдаемой поврежденности. Если убрать облицовку, канальные формообразования в преграде исчезают.

Остается понять, что же представляют собой каналы в экспериментах Ушеренко. Аналогичные дискретные полосы интенсивной деформации шириной в несколько десятков микрон, расположенных между областями относительно недеформированного материала (оптически неразрешимая субструктура), наблюдаются при баллистическом ударе стального шара по мишени из титанового сплава [9]. Это полосы адиабатического сдвига! Наблюдаются полосы сдвига практически во всех динамических экспериментах по прониканию снарядов в преграду. Откольная природа образования полос адиабатического сдвига экспериментально обоснована в работах [10,11]. Полосы локализованной деформации являются результатом интерференции волн разгрузки, в зоне растяжения которой отрицательные давления не превышают динамической прочности материала.

Вывод

Явления сверхглубокого проникания микрочастиц в преграду не существует в природе, и частицы не могут нарушать законы сохранения.

Работа выполнена по программе фундаментальных исследований президиума РАН „Фундаментальные проблемы механики и смежных наук в изучении многомасштабных процессов в природе и технике“.

Список литературы

- [1] Козорезов К.И., Максименко В.Н., Ушеренко С.М. // Избранные вопросы современной механики / Под ред. Г.Г. Черного. Ч. 1. М.: Изд-во МГУ, 1981. С. 115–119.
- [2] Buravova S.N., Gordopolov Yu.A. // Int. J. Fracture. 2011. Vol. 170. N 1. P. 83–93.
- [3] Буравова С.Н. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 17. С. 63–67.
- [4] Buravova S.N., Goncharov A.A., Kiselev Yu.N. // Tribol. International. 1996. Vol. 29. N 5. P. 357–363.
- [5] Ададуров Г.А., Беликова А.Ф., Буравова С.Н. // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28. № 4. С. 95–101.
- [6] Brown R., Kosko S., Jun J.E. // Wear. 1983. Vol. 8. P. 181–193.
- [7] Зильбербранд Е.Л., Румянцев Б.В. // Сб. тез. докл. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭВ, 2007. 376 с.
- [8] Буравова С.Н., Гордолопов Ю.А. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 15. С. 69–74.
- [9] Timothy S.P., Hutchings I.M. // Acta Metallurgica. 1985. Vol. 33. P. 667–676.
- [10] Беликова А.Ф., Буравова С.Н., Гордолопов Ю.А. // ЖТФФ. 2013. Т. 83. Вып. 2. С. 153–155.
- [11] Беликова А.Ф., Буравова С.Н., Петров Е.В. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 8. С. 68–75.