

05

## Высокоскоростное внедрение стального ударника в порошкообразные материалы

© Е.Л. Зильбербранд, Б.В. Румянцев, М.Д. Толкачев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург  
Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, С.-Петербург  
E-mail: post@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 30 апреля 2005 г.

Представлены результаты по высокоскоростному внедрению стального ударника в порошки свинца, вольфрама насыпной плотности со скоростью  $\sim 1$  km/s с целью определения возможного проникания микрочастиц порошка в объем ударника. Приведены исследования микроструктуры и состава стали после внедрения методами растровой электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа. Отмечается компактирование порошка до сплошного состояния с частичным плавлением на границе внедряющегося ударника. Следов проникания материала порошка в объем ударника не обнаружено. Неоднородности микроструктуры, отличные от стальной матрицы, представляют собой неметаллические включения, с преобладающим содержанием марганца и серы, и локальные деформационные области, распределенные по границам зерен. Качественная картина состава неоднородностей исходной стали сохраняется после внедрения в сплошную и пористую среду.

PACS: 62.50.+p, 81.05.Bx, 81.20.Ev

При воздействии потока частиц размером  $1-500 \mu\text{m}$  со скоростью  $0.5-3$  km/s на металлическую преграду в работе [1] было обнаружено сверхглубокое проникание (СГП) микрочастиц, в  $10^2-10^4$  раз превышающих их размер, что приводило к объемному изменению структуры металла. В связи с этим в работе [2] была выдвинута гипотеза возможного поражения электронной аппаратуры микрочастицами, проникающими через защиту космического аппарата. В данной работе, являющейся продолжением [3], изучаются микроструктура и состав стального ударника после высокоскоростного внедрения в порошкообразные материалы с целью обнаружения СГП микрочастиц в объеме стали.

В отличие от предыдущих работ [1-3], в которых исследовалось СГП при метании порошка на металлическую преграду, в настоящей

**Таблица 1.** Параметры экспериментов по внедрению стального ударника

Материал порошка	Размер частиц, $\mu\text{m}$	Плотность, $\text{kg/m}^3 \cdot 10^{-3}$	Скорость ударника, $\text{m/s}$	Начальное давление, $\text{GPa}$
Вольфрам	60–80	3.9	1020	3.9
Свинец	1–10	2.4	967	2.1
Фторопласт	Литой	2.1	780	4.0

работе стальной ударник внедрялся в порошкообразный материал. Это позволило избежать уплотнения порошка при разгоне, динамической неоднородности потока и увеличить время взаимодействия с преградой. С точки зрения начальных параметров взаимодействия обе схемы адекватны. Различия в нагружении проявляются при последующей разгрузке со свободных поверхностей и зависят от соотношения геометрических параметров ударника и преграды. Обращенная схема метания стального ударника в порошок имитирует прохождение космического аппарата сквозь пылевое облако превосходящих размеров.

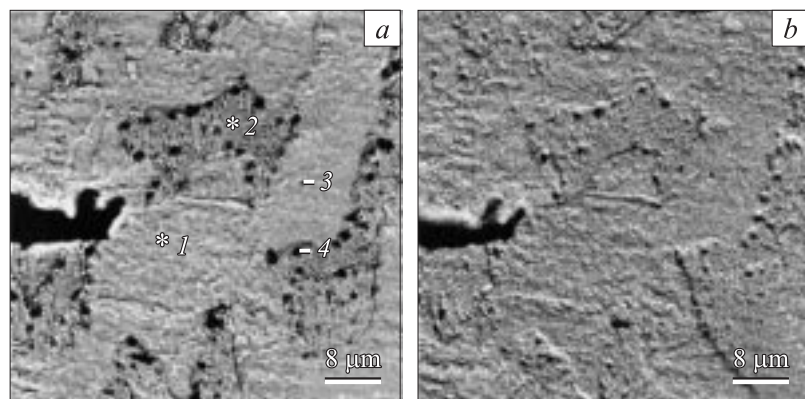
Регистрация изменений в микроструктуре стали проводилась на электронном сканирующем микроскопе АВТ-55 (Япония) в двух режимах: SE (secondary electrons) и BSE (back scattered electrons). Режим SE при расположении детектора вторичных электронов под углом  $15^\circ$  дает изображение микрорельефа плоскости шлифа. Режим BSE дополнительно отражает фазовый состав поверхности и дефекты поверхности за счет рассеивания отраженных электронов [4]. Особое внимание обращалось на неоднородности микроструктуры размером менее  $10\ \mu\text{m}$ , отличающиеся от изображения зерен матрицы. С помощью энергодисперсионной микросондовой системы LINK AN 1000 (Англия) регистрировался элементный состав в диапазоне от натрия до урана отмеченных неоднородностей, который сравнивался с составом матрицы.

Стальной ударник из стали У8А твердостью по Бринелю  $\text{HB} = 217$  ед., массой 8 г, диаметром 7.5 и длиной 23 mm, с плоскими торцами, разгонялся в стволе баллистической установки и внедрялся в порошки свинца, вольфрама насыпной плотности. Порошок размещался в пластмассовой упаковке диаметром 30 mm и длиной 80 mm. Выбор порошков определялся их отсутствием в материале ударника

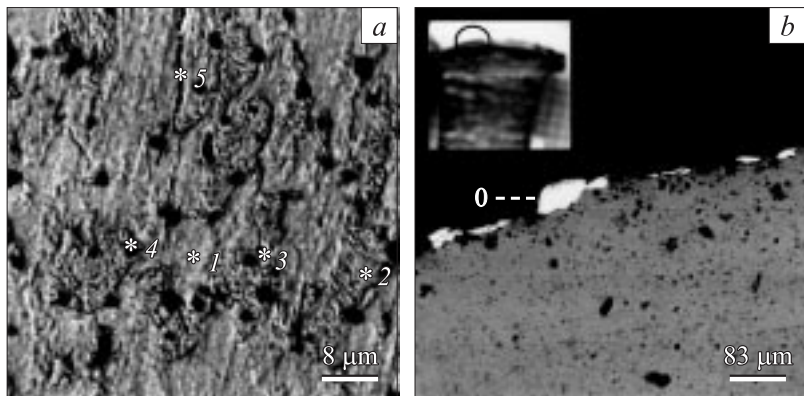
и повышенной чувствительностью при рентгеновском зондировании. Для сравнения рассматривалось также внедрение в литой фторопласт диаметром 30 mm и длиной 120 mm. Характеристики экспериментов приведены в табл. 1. Начальное давление взаимодействия находилось по методу торможения ударника о преграду при использовании возможностей сайта <http://www.ihed/ras.ru/rusbank/>.

После опыта деформированный ударник промывался водой и спиртом в ультразвуковой ванне для удаления остатков порошка с поверхности. Из очищенного ударника готовились продольные и поперечные шлифы, полированные поверхности которых травились в течение 10 s в 3%-ном растворе азотной кислоты в спирте с последующей промывкой и высушиванием.

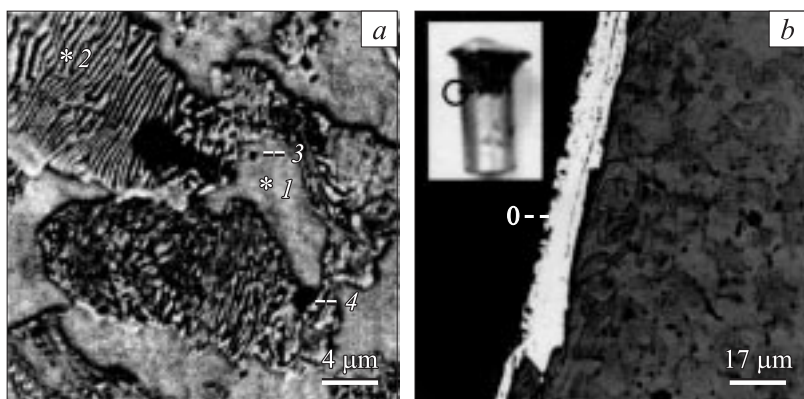
На рис. 1–3 приведены изображения шлифов ударника до и после внедрения в порошки вольфрама и свинца на глубине  $\sim 5$  mm от торцевой контактной поверхности. На изображениях обозначены номера областей зондирования, элементные составы которых приведены в табл. 2. Там же приведены результаты определения элементного состава микрообластей зондирования в шлифе ударника после внедрения в литой фторопласт. Составы микрообластей, отмеченные на изображениях, но не приведенные в таблице, учтены в усредненном составе матрицы, так как он хорошо воспроизводится независимо от вида зерна матрицы.



**Рис. 1.** Микроструктура стали У8А до внедрения. Продольный шлиф. Режим съемки BSE (a) и SE (b).



**Рис. 2.** Микроструктура ударника из стали У8А после внедрения в порошок вольфрама: *a* — на глубине 5 мм, *b* — на контактной границе. Продольный шлиф, направление динамического воздействия — сверху вниз. Режим съемки BSE.



**Рис. 3.** Микроструктура ударника из стали У8А после внедрения в порошок свинца: *a* — на глубине 5 мм, *b* — на боковой границе. Поперечный шлиф. Режим съемки BSE.

При поиске следов проникания микрочастиц проводился сравнительный анализ микроструктур стали до и после внедрения в сплошной и порошкообразный материал, изображения микрообласти и ее элемент-

**Таблица 2.** Элементный состав микрообластей шлифа ударника из стали У8А до и после внедрения в порошки вольфрама, свинца и литой фторопласт

Материал порошка	№ области зондирования	Fe	Mn	Si	Cu	Al	S	Pb	W
		% mass.							
До внедрения									
	Матрица ср.	98.96	0.48	0.29	<u>0.05</u>	<u>0.02</u>	<u>0.03</u>	<u>0.17</u>	<u>0.01</u>
	3	<b>86.05</b>	<b>1.39</b>	<b>0.28</b>	<b>0.19</b>	<b>0.09</b>	<b>0.76</b>	<b>0.00</b>	<b>0.19</b>
	4	91.78	0.39	0.36	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.01</u>	<u>0.00</u>
После внедрения									
Вольфрам	0	1.64	<u>0.07</u>	1.33	<u>0.05</u>	<u>0.00</u>	0.13	<u>0.00</u>	96.67
	3	<b>94.62</b>	<b>1.18</b>	<b>0.26</b>	<b>0.35</b>	<b>0.00</b>	<b>0.51</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
	4	82.41	0.32	<u>0.00</u>	0.29	<u>0.00</u>	<u>0.02</u>	<u>0.00</u>	<u>0.01</u>
	5	<b>92.33</b>	<b>1.69</b>	<b>0.04</b>	<b>3.08</b>	<b>1.80</b>	<b>0.00</b>	<b>0.04</b>	<b>0.08</b>
Свинец	0	3.801	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.01</u>	<u>0.10</u>	<u>0.10</u>	81.93	<u>0.00</u>
	3	<b>84.19</b>	<b>6.05</b>	<b>0.17</b>	<b>0.29</b>	<b>0.00</b>	<b>2.95</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
	4	80.01	0.73	0.46	0.17	0.29	0.14	<u>0.05</u>	<u>0.00</u>
Фторопласт	3	<b>67.05</b>	<b>2.73</b>	<b>10.62</b>	<b>0.09</b>	<b>1.93</b>	<b>0.33</b>	<b>0.26</b>	<b>0.00</b>
	Матрица ср.	98.30	0.56	0.33	<u>0.10</u>	<u>0.06</u>	<u>0.03</u>	<u>0.05</u>	<u>0.12</u>

Примечание: Подчеркнуты определения состава на уровне погрешности прибора.

ного состава. В соответствии с основными признаками СГП [1] искались неоднородности, появившиеся после внедрения в порошок, и канальные образования, совпадающие с направлением воздействия, содержащие микрочастицы порошка.

Все рассмотренные неоднородности микроструктуры стали можно разделить на следующие:

— неметаллические включения размером менее  $2\ \mu\text{m}$ , отмеченные № 3 на изображениях шлифов ударника до и после внедрения в вольфрам и свинец, элементный состав которых выделен в табл. 2 жирным шрифтом;

— темные по сравнению с матрицей области размером менее  $3\ \mu\text{m}$ , располагающиеся в основном по границам зерен, отмеченные № 4 там же. Они представляют собой выступы над поверхностью шлифа, что хорошо видно при съемке в режиме SE (рис. 1, *b*). Темный фон создается за счет рассеивания отраженных электронов при отклонении от плос-

кости шлифа („ямка–выступ“). При этом соответственно снижается и регистрируемое рентгеновским микроскопом содержание элементов [4]. Элементный состав выступов качественно не отличается от состава матрицы. Выступы свидетельствуют о повышенной стойкости к износу и травлению при подготовке шлифа, что, по-видимому, отражает области локальной деформации по границам зерен. После динамической обработки ударника размер неоднородностей увеличивается. Ранее в [3] отмечался хрупкий характер их разрушения при увеличении давления взаимодействия.

Как видно из табл. 2 и аналогичных данных из работы [3], для неметаллических включений размером менее  $2\text{ }\mu\text{m}$ , равномерно распределенных в объеме углеродистых сталей, характерно повышенное содержание марганца и серы, что отражает технологию получения стали и не зависит от динамической обработки. Этот очевидный факт противоречит выводу работы [5] о том, что „... аномалии... концентрации Mn... отражают процессы на ядерном уровне... в процессе сверхглубокого проникания“.

Во всех областях зондирования в матрице и неоднородностях ударников после внедрения в порошок изменения в микроструктуре и следы микрочастиц порошка не обнаружены.

При рассмотрении на шлифах границ контактной и боковых поверхностей ударника после внедрения обнаружены фрагменты вольфрама размером до  $40\text{ }\mu\text{m}$  (рис. 2, *b*) или пленки свинца толщиной до  $10\text{ }\mu\text{m}$  (рис. 3, *b*). В табл. 2 под № 0 приведены элементные составы фрагментов и пленок. Близость к 100%-ному суммарному составу говорит о сплошном состоянии „залипших“ остатков порошка на поверхностях ударника. Порошок при давлениях, сопровождающих внедрение ударника, сжимается до сплошного состояния с частичным плавлением микрочастиц, степень которого зависит от свойств материала и размера частиц [6].

По форме сохраненного ударника (вставка на рис. 2, *b* и 3, *b*) видно, что начальное давление взаимодействия (табл. 1) обеспечивает пластическое течение головной части. По мере внедрения давление на контактной поверхности уменьшается, деформация прекращается и движение ударника определяется инерционным и прочностным сопротивлением сжатого порошка. Напряженное состояние внедряющегося ударника определяется взаимодействием волны сжатия от контактной поверхности и волн разгрузки от свободных границ, кроме конической

области сжатия, примыкающей к контактной границе, куда волны разгрузки не проникают. Прониканию фрагментов компактированного порошка через сжатую область препятствует инерционное сопротивление материала ударника и противодействие, что подтверждается отсутствием материала порошка и следов проникания в ударнике.

Таким образом, при воздействии порошка на преграду [3] и при внедрении ударника в порошок со скоростью  $\sim 1$  km/s и примененном уровне исследований микроструктуры до  $1 \mu\text{m}$ , состава преграды до 0.1% mass., сверхглубокого проникания микрочастиц в преграду не обнаружено. Наблюдаемые неоднородности микроструктуры стали, размером менее  $3 \mu\text{m}$ , представляют собой неметаллические технологические включения с преобладающим содержанием марганца и серы и локальные деформационные области, распределенные по границам зерен. Качественная картина состава неоднородностей в исходной стали сохраняется после внедрения в сплошную и пористую среду.

Работа выполнена в рамках совместного Белорусско-Российского проекта при поддержке гранта РФФИ № 04-01-81016.

## Список литературы

- [1] Андилевко С.К., Ушеренко С.М., Шилкин В.А. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 17. С. 81–84.
- [2] Роман О.В., Дыбов О.А., Романов Г.С., Ушеренко С.М. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 2. С. 1–5.
- [3] Зильбербранд Е.Л., Румянцев Б.В., Толкачев М.Д., Ушеренко С.М. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 4. С. 89–94.
- [4] Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Эчлин П. и др. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ: В 2 т. М.: Мир, 1984. Т. 2. С. 348.
- [5] Ушеренко С.М., Калиниченко А.С., Чой К.Й., Овчинников В.И. // Труды Междунар. конф. VII Харитоновские тематические научные чтения. РФЯЦ–ВНИИЭФ. Саров, 2005. С. 520–525.
- [6] Kondo K., Soga S., Savaoka A. // J. of American Ceramic Society. 1990. V. 73. P. 1983.