

05.1;12

## Микроструктура стальных преград, обработанных высокоскоростным потокм микрочастиц

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

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

E-mail: post@mail.ioffe.ru

Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, С.-Петербург

E-mail: admin@ad.igpp.ras.spb.ru

Белорусский национальный технический университет, Минск

Поступило в Редакцию 19 октября 2005 г.

Приведены результаты исследования микроструктуры и состава стали, подвергнутой воздействию потокм микрочастиц плотностью  $2-5 \text{ g/cm}^3$  со скоростью  $0.8-1.5 \text{ km/s}$ . Отмечается, что наблюдаемые неоднородности микроструктуры не связаны с материалом воздействующего потока микрочастиц, а представляют собой области локальной деформации при нагружении в упругопластической области, которые увеличиваются с ростом давления в ударной волне.

PACS: 68.37.-d, 81.05.-t

**Введение.** Современные средства защиты космических аппаратов рассчитаны на воздействие высокоскоростных частиц размером  $> 10^{-4} \text{ m}$ , приводящее к образованию сквозных отверстий, механическому повреждению с изменением формы защищаемых объектов [1]. Рациональной конструкцией защиты признаны два экрана, предназначенные для эффективного диспергирования ударяющей частицы и поглощения вторичных частиц. Воздействие потока микрочастиц на корпус не рассматривалось ввиду отсутствия вышеперечисленных повреждений от них.

В исследованных по взрывной обработке металлических преград порошками различных материалов [2] было обнаружено, что при определенных условиях микрочастицы порошка проникают на значительные глубины в металлы, образуя сетку схлопнувшихся каналов. Основной

причиной, обеспечивающей сверхглубокое проникание микрочастиц, считалось перераспределение запасенной при динамическом воздействии потенциальной энергии преграды к проникающим частицам [3,4]. Альтернативная позиция сводилась к заносу микрочастиц в объем преграды по трещинам, образовавшимся в результате воздействия на преграду высокоскоростного потока материала [5,6].

Подтверждение возможности проникания микрочастиц в металлы на глубину, в тысячи раз превышающую их размер, потребует новых подходов к построению защиты и выбору конструкционных материалов космических аппаратов. Так, в работе [7] выдвигается гипотеза, объясняющая повышенный уровень отказа электронных устройств космического аппарата за счет многократного воздействия высокоскоростных частиц, проникших через защиту космического аппарата без нарушения его сплошности и герметичности.

Целью данной работы является исследование микроструктуры стальных преград после динамического воздействия высокоскоростным потоком микрочастиц, разогнанных на баллистической установке, для выявления наличия микрочастиц порошка и следов их воздействия в объеме преграды.

**Эксперимент.** В работе применялась баллистическая установка, оснащенная определителем скорости потока и рентгеновской импульсной аппаратурой, позволяющей снимать моменты взаимодействия потока с преградой. Порошки меди и корунда массой 8.5 и 3.5 g, начальной плотностью 5.3 и 2.0 соответственно, диаметром 12 mm и в полимерной оболочке толщиной 1.5 mm и длиной 20 mm со скоростью 0.8–1.5 km/s в течение 20–30  $\mu$ s воздействовали на преграду из стали Ст40 диаметром 27 mm, толщиной 15 mm. Дополнительно вместо порошка разгонялся стержень из монолитного фторопласта с теми же геометрическими параметрами.

Скорость потока микрочастиц подбиралась из условия нагружения в упругой или в упругопластической области. В упругой области давление, создаваемое потоком на границе с преградой, было недостаточным для преодоления прочностного сопротивления. Образования каверны на лицевой поверхности преграды при этом не происходило. При повышении скорости потока образовывалась поверхностная каверна в соответствии с гидродинамическими представлениями.

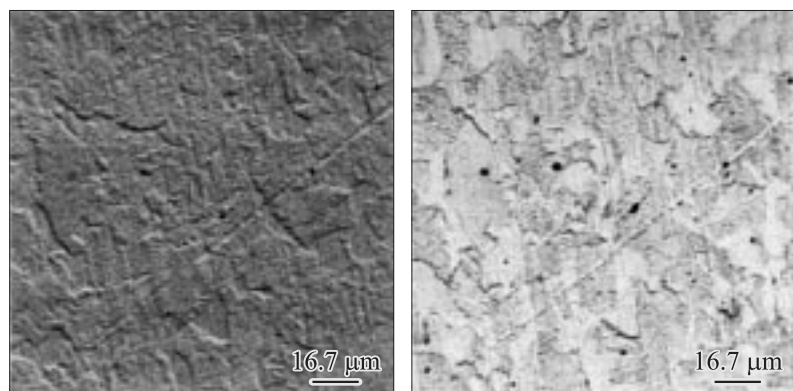
В табл. 1 приведены параметры материала потока и характеристики нагружения стабильной преграды.

**Таблица 1.** Микроструктура стальных преград, обработанных высокоскоростным потоком микрочастиц

№ п/п	Материал потока	Размер частиц, $\mu\text{m}$	Насыпная плотность, $\text{kg/m}^3 \cdot 10^{-3}$	Скорость потока, $\text{km/s}$	Начальное давление в преграде, $\text{GPa}^*$	Ср. размер областей деформации, $\mu\text{m}$
1	Корунд	40–60	2.0	0.77	2	1–3
2				1.18	5	3–10
3				1.55	8	5–30
4	Медь	30–50	5.3	1.06	9	3–10
5	Фторопласт	Монолит	2.16	1.16	7	7–10

\* — начальное давление в преграде находилось по пересечению ударных адиабат ударника и преграды.

После обработки преграда разрезалась по оси направления удара и полученное сечение шлифовалось наждачной шкуркой, полировалось алмазными порошками 63/40, 3/1 и корундом 1/0.3 с водой. Готовые шлифы обрабатывались ультразвуком в спирте и травились в течение 10 с в 3%-ном растворе азотной кислоты в спирте с последующей промывкой спиртом и высушиванием.



**Рис. 1.** Микроструктура исходной стали Ст40 преграды. Режим съемки SE и BSE.

Таблица 2.

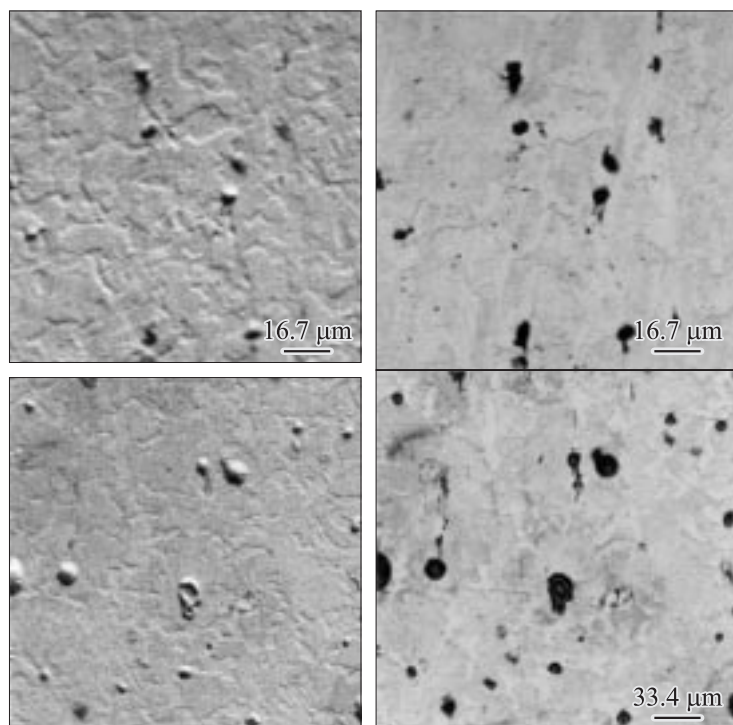
Поверхность	Fe	Mn	Cr	Si	Co	Ni	Cu	S	Al	Ca	Cl	P
Стали (сред.)	97.76	0.75	0.30	0.44	0.32	0.21	0.36		0.06			
Технологического	94.45	0.72	0.30	1.05	0.07	0.07	0.57	1.32	0.53	0.46	0.11	0.15
включения	95.87	0.90	0.33	0.82	0.04	0.07	0.59	0.87	0.02			
	96.63	0.83	0.37	0.55	0.09	0.08	0.64	0.48	0.13	0.11	0.12	

0.07 — курсивом выделены определения на уровне ошибки прибора.

На рис. 1 приведены изображения шлифа исходной стали Ст40, полученные на электронном сканирующем микроскопе АВТ-55 (Япония) в двух режимах: SE (secondary electrons) и BSE (back scattered electrons). SE-режим выявляет структуру в виде микрорельефа, обусловленного различной травимостью зерен стали с различным содержанием углерода. BSE-режим дополнительно отражает фазовый состав поверхности, проявляет неметаллические включения и газовые поры в виде темных областей („легкая“ фаза).

В табл. 2 для исходного состояния преграды приведены элементные составы стали (матрицы) и включений неметаллических примесей без регистрации легких элементов до натрия, полученные на рентгеновском микронзонде LINK AN 10 000 (Англия) и приведенные к 100% для устранения влияния формы поверхности и неопределенности смесового состава. Элементный состав включений соответствует смеси стали и шлаковых примесей в виде сульфидов, оксидов, фосфорных тугоплавких соединений.

При исследовании шлифов преград после воздействия потока (рис. 2) особое внимание обращалось на неоднородности микроструктуры, которые тестировались по сравнению изображений в SE- и BSE-режимах и рентгеновским микронзондом на элементный состав. SE-режим показывает, что неоднородности выступают над поверхностью шлифа, т.е. представляют области с повышенной стойкостью к абразивному воздействию при конечной полировке поверхности. Это, по-видимому, связано с кратковременной локальной деформацией по межзеренным границам в упругопластической области, когда основной материал зерна деформируется упруго. Замечено, что при увеличении давления нагружения выше упругопластического предела в преграде размер неоднородностей локальной деформации возрастает (рис. 2).



**Рис. 2.** Микроструктура шлифов преграды на глубине 10 mm после нагружения фторопластом (верхний ряд), потоком частиц корунда (нижний ряд) со скоростью 1.16, 1.55 km/s соответственно. Режим съемки SE и BSE.

и табл. 1), что, по-видимому, связано с развитием пластической деформации по границам зерен. Начальное распределение и увеличение размера областей деформации при динамическом воздействии играют определенную роль в упрочнении металла.

Также фиксируются включения с неметаллическими примесями со следами хрупкого разрушения в ударной волне. Отдельные включения алюминия (меди), как свидетеля проникшей частицы корунда (меди), не найдены. Содержание меди во всех определениях состава не превышало уровня 0.4%, характерного для исходной стали. Фиксируемое во всех неоднородностях различное содержание алюминия, не зависимо от материала высокоскоростного потока, указывает на занос полировоч-

ного материала корунда, который не удалось удалить ультразвуковой обработкой. Изображения полос деформации не могут быть приняты за „треки проникающих микрочастиц“, так как характеризуют стальную преграду и не зависят от материала воздействующего потока.

Подобие шлифов, полученных при воздействии порошков и монокристаллического фторопласта, подтверждает, что изменения в микроструктуре стальной преграды связаны действием поля давлений, возникающем при действии высокоскоростного потока материала.

**Заключение.** В данной постановке эксперимента и исследования микроструктуры стали сверхглубокого проникания микрочастиц в преграду не обнаружено. Аналогичный результат получен в [8,9].

Наблюдаемые неоднородности микроструктур стальной преграды после динамического нагружения высокоскоростным потоком являются областями локальной деформации по границам зерен и неметаллических примесей.

Отмечен рост размера областей локальной деформации при обработке ударной волной с амплитудой выше динамического предела текучести.

Выражаем признательность А.Б. Синани за ряд полезных обсуждений.

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

## Список литературы

- [1] *Bernhard R.P., Christiansen E.L., Hyde J. et al. // Int. J. Impact Engng. 1995. V. 17. P. 57–68.*
- [2] *Ушеренко С.М. Сверхглубокое проникание частиц в преграды и создание композиционных материалов. Минск, 1998. С. 208.*
- [3] *Альтшулер Л.В., Андилевко С.К., Романов Г.С. и др. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 5. С. 42–44.*
- [4] *Kiselev S.P., Kiselev V.P. // Int. J. Impact Engng. 2002. V. 27. P. 135–152.*
- [5] *Герасимов А.Э. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 1. С. 26–29.*
- [6] *Буравова С.Н. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 17. С. 63–67.*
- [7] *Ушеренко С.М., Романов Г.С., Дыбов О.А. // ИФЖ. 2002. Т. 75. № 6. С. 7–11.*
- [8] *Gladtsinov A.V., Ilushkina N.Yu., Kolomytsev V.E. // Int. J. Impact Engng. 2001. V. 26. P. 231–241.*
- [9] *Сивков А.А. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 16. С. 59–64.*