

05

Сопrotивление хрупких тел высокоскоростному внедрению на начальной стадии соударения

© А.Б. Синани, А.А. Кожушко, Е.Л. Зильбербранд

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: alex@mdlab.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 20 июня 2007 г.

Установлено, что монокристаллические хрупкие материалы оказывают более низкое сопротивление внедрению ударников высокой твердости по сравнению с поликристаллическими, имеющими тот же состав и физико-механические характеристики. Такое различие связывается с тем, что в монокристаллических материалах, в отличие от поликристаллических, на начальной стадии соударения наблюдается значительное снижение твердости по отношению к измеренной в стандартных условиях.

PACS: 62.50.+p

В [1,2] показано, что высокая твердость монокристаллов сапфира определяет его перспективность как элемента усовершенствованной прозрачной защиты от пуль с сердечниками из твердой ($HV = 8 \text{ GPa}$) стали. Следует заметить, что в [1] сапфир в части опытов заменялся керамикой на основе Al_2O_3 с близкими физико-механическими характеристиками. Сопоставление результатов опытов с использованием керамики и сапфира показало их полную идентичность.

Развитие техники поставило задачу разработки основ защиты от сердечников из карбида вольфрама (WC), имеющего значительно более высокую твердость ($HV = 17 \text{ GPa}$) и плотность ($\rho = 14.5 \text{ g/cm}^3$) по сравнению с закаленной сталью. Такие сердечники пробивают защиту, описанную в [1,2], не деформируясь.

Для решения этой задачи был использован принцип защиты от стальных ударников [1,2] при условии увеличения толщины лицевого слоя сапфира.

Вначале были проведены модельные опыты с использованием вместо сапфира керамики на основе Al_2O_3 фирмы SGAC (Чехия),

характеристики которой ($HV = 18 \text{ GPa}$, $\rho = 3.91 \text{ g/cm}^3$) весьма близки к сапфиру ($HV = 20\text{--}22 \text{ GPa}$, $\rho = 4.0 \text{ g/cm}^3$). Опыты проводились при скорости соударения $V = 850 \pm 20 \text{ m/s}$. Было установлено, что при взаимодействии WC сердечника с пластиной керамики толщиной 14 mm сердечник полностью разрушается. Преграда, состоящая из лицевого слоя керамики толщиной 14 mm, упрочненного стекла толщиной 10 и 4 mm коликarbonата, обеспечивает защиту от WC ударника (рис. 1, *a*).

По аналогии с результатами для стальных сердечников можно было ожидать, что комбинированная преграда с лицевым слоем из 14 mm сапфира будет способна противостоять WC сердечнику. Однако экспериментально это предположение не подтвердилось: WC сердечник пробивает такую преграду, практически не деформируясь (рис. 1, *b*).

Здесь требует объяснения, прежде всего, следующее. Как было показано в [3], условием деформирования ударяющего тела на преграде является превышение твердости преграды относительно твердости ударника. Это условие выполняется как для керамики, так и для сапфира. Однако при соударении с WC сердечником поведение этих материалов существенно различается. С другой стороны, как следует из [1], при соударении с сердечником из твердой стали керамика хорошо моделирует поведение сапфира.

В [3] высказано предположение, что твердость хрупких материалов, измеренная в стандартных условиях (при нагрузке на индентор $P \leq 10 \text{ N}$) не реализуется при более высоких нагрузках и, в частности, в условиях высокоскоростного удара. На начальной стадии соударения, длительность которой на порядок меньше общего времени взаимодействия [4], в хрупком теле, в зоне контакта с ударником, где развиваются неупругие деформации, зарождаются трещины. Этот процесс приводит к деградации исходной твердости и снижению сопротивления внедрению.

Такое предположение было подтверждено зависимостью твердости от приложенной нагрузки для силикатного стекла, полученной с помощью методики [5], которая позволяет надежно измерять твердость при нагрузках на 2–3 порядка более высоких, чем при стандартных измерениях.

С этих позиций была предпринята попытка объяснить различие в поведении сапфира и керамики при соударении с WC сердечниками. Для этого с использованием методики [5] были получены зависимости твердости HV сапфира и керамики от нагрузки P , приведенные на рис. 2. На рис. 2 показаны также уровни твердости двух WC сердечников и сердечника из твердой стали.

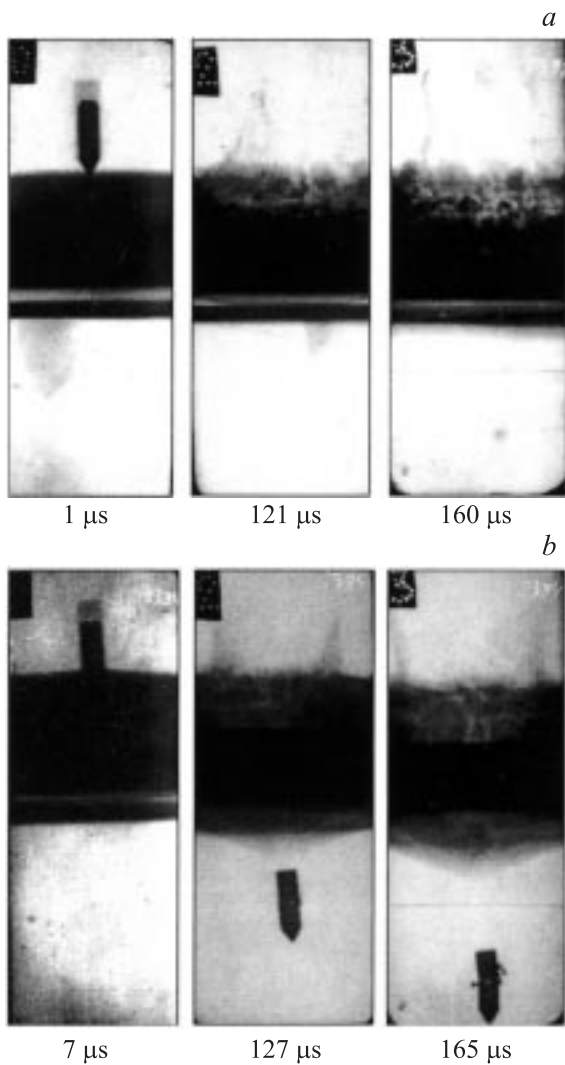


Рис. 1. Импульсные рентгенограммы взаимодействия WC ударников с преградами, состоящими из 10 mm упрочненного стекла и 4 mm поликарбоната с лицевым слоем из 14 mm Al_2O_3 керамики (a) и 15 mm сапфира (b). Времена указаны от момента соударения.

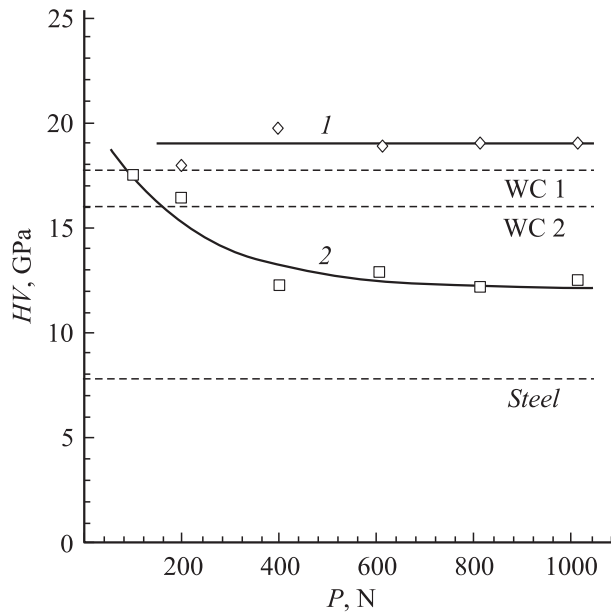


Рис. 2. Зависимость твердости от приложенной нагрузки для Al_2O_3 керамики (1) и сапфира (2).

В полученных экспериментальных данных можно отметить следующее:

1. Твердость керамики при увеличении нагрузки до 1000 N остается близкой к исходной и превышает твердость WC сердечников.
2. Твердость монокристаллов сапфира при увеличении нагрузки выше ~ 100 N падает до уровня 12–13 GPa, более низкого по сравнению с твердостью WC сердечников.
3. Твердость и керамики, и сапфира в широком диапазоне нагрузок остается намного выше твердости стального ударника.

Из приведенных результатов становится очевидной причина существенного различия в поведении керамики и сапфира при высокоскоростном соударении с WC сердечниками. Столь же очевидна и возможность моделирования сапфира керамикой при соударении со стальными сердечниками.

Причины различной зависимости твердости от нагрузки для поликристаллических (керамики) и монокристаллических (сапфир) или аморфных (стекло) хрупких материалов не вполне ясны. Можно предполагать, что в малодефектных монокристаллических и аморфных телах разрушение развивается беспрепятственно, в то время как в поликристаллических имеющиеся дефекты, границы зерен являются препятствиями для развития трещин разрушения. Решение этого вопроса требует исследования.

Результаты работы приводят к следующим выводам:

1. Для хрупких материалов, прежде всего, аморфных и монокристаллических, твердость, измеренная в стандартных условиях, при малых нагрузках, не может служить характеристикой сопротивления внедрению ударяющего тела. Это связано с деградацией твердости на начальной стадии соударения. В поликристаллических хрупких материалах деградация твердости, как правило, выражена значительно слабее или отсутствует. Вопрос о факторах, определяющих снижение твердости с ростом нагрузки, требует дополнительного исследования.

2. При разработке прозрачной защиты от ударников высокой твердости следует ориентироваться на использование высокотвердых материалов, характеризующихся минимальным снижением твердости при увеличении нагрузки.

Работа выполнена в рамках проекта НАТО „Наука для мира“ № 981770.

Список литературы

- [1] Синани А.Б., Власов А.С., Зильбербранд Е.Л., Кожушко А.А., Козачук А.И., Степанов М.И., Бахолдин С.И., Антонов П.И. // Изв. РАН. Сер. физ. 2004. Т. 68. № 6. С. 808.
- [2] Jones C.D., Rioux J.B., Locker J.W., Bates H.E., Zanella S.A., Plum V., Mandelartz M. // Am. Ceramic Soc. Bull. 2006. V. 85. N 3. P. 24.
- [3] Синани А.Б., Зильбербранд Е.Л., Степанов М.И. // Тр. Междунар. конференции „7-е Харитоновские научные чтения. Экстремальные состояния вещества“. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. С. 376.
- [4] Златин Н.А. // Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. М.: Наука, 1974. С. 194.
- [5] Синани А.Б. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 19. С. 48.