

11. Кёстер У., Герольд У. Кристаллизация металлических стекол. // Металлические стекла. Ионная структура, электронный перенос и кристаллизация: Сб. науч. тр. / Под ред. Г.-Й. Гюнтеродта и Г. Бека. – М.: Мир, 1983. – С. 325-371.
12. Клинов И.Я. Коррозия химической аппаратуры и коррозионностойкие материалы. – М.: Машиностроение, 1967 – 468 с.
13. Пустов Ю.А., Балдохин Ю.В., Опара Б.К., Колотыркин П.Я., Овчаров В.П., Кислогубов И.А. О термической стабильности аморфного сплава Fe-Cr-B // Физика металлов и металлосодержание. – 1988. – Т. 65. – Вып. 1. – С. 159-167.
14. Пустов Ю.А., Балдохин Ю.В., Лабутин В.Ю., Опара Б.К., Овчаров В.П., Колотыркин П.Я., Кислогубов И.А. Процессы окисления и сегрегации элементов при изотермическом отжиге аморфного сплава Fe-Cr-B // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1989. – № 11. – С. 130-138.
15. Лабутин В.Ю., Нефедов В.И., Макогина К.И., Юдина Л.А., Юдин В.В. Рентгеноэлектронное и электронно-микроскопическое исследования аморфных сплавов $Fe_{67}Ni_6Si_{11}Bi_{16}$ и $Fe_5Co_{70}Si_{15}B_{10}$ // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1986. – № 12. – С. 95-101.
16. Круткина Т.Г., Решетников С.М., Самойлович С.С. Изучение сопротивления коррозии магнетомягких аморфных сплавов на основе кобальта // Вестник Удмуртского университета. – 1994. – № 6. – С. 61-70.
17. Куценко И.Б., Соломонова И.В., Томилин И.А. Термодинамическая стабильность аморфных металлических сплавов // Журнал физической химии. – 1992. – Т. 66. – № 12. – С. 3198-3204.
18. Васильева О.Я., Куценко И.Б., Томилин И.А. Термодинамические свойства аморфной металлической системы Co-Fe-Si-B // Журнал физической химии. – 1993. – Т. 67. – № 6. – С. 1153-1155.
19. Baldokhin Yu. V., Goldanskii V. I., Kolotyrykin P. Ya., Opara B. K., Pustov Yu. A. Application of Mossbauer spectroscopy for studies of the effect of structural relaxation processes on the electrochemical behaviour of Fe-Cr-B amorphous alloys // The fourth Japan – USSR corrosion seminar. Tokyo. Japan. – 1985. – P. 309-318.
20. Паташинский А.З., Якуб И.С. Релаксационное состояние вблизи точек расслоения // ФТТ. – 1976. – Т. 18. – № 12. – С. 3630-3636.
21. Скаков Ю.А. Фазовые превращения при нагреве и изотермических выдержках в металлических стеклах // Итоги науки и техники. Сер. Металловедение и термическая обработка. – 1987. – Т. 21. – С. 53-96.

УДК 534.2

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ СОУДАРЕНИЯ С ПОТОКАМИ ДИСКРЕТНЫХ УДАРНИКОВ

Ушеренко С. М.¹⁾, Шипица Н. А.²⁾, Коршунов Л. Г.³⁾, Зельдович В. И.³⁾

¹⁾ БНТУ, Минск, Беларусь, sheryl@newmail.ru

²⁾ НИИ ПМ НАН Б, Минск, Беларусь, shipitsa_nik@mail.ru

³⁾ Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, zeldovich@imp.uran.ru

Необходимо знание характеристик материалов защитных преград и оболочек, проявляющихся в широком диапазоне условий ударного нагружения. Использование для расчетов данных, полученных для этих материалов в условиях статики, неприемлемо. Их отклонение от результатов в условиях динамики составляет сотни процентов.

В результате исследований аномалии ударного взаимодействия – сверхглубокого проникновения дискретных частиц (СГП) – было установлено скачкообразное падение динамической прочности металлических преград. Относительная глубина проникновения в условиях СГП составляет $10^2\text{--}10^4$ от определяющего размера ударника, а при обычном ударе не превышает 6 – 12. Уменьшение динамической прочности металлических преград в режиме СГП на 1 – 3 порядка, предполагает существование качественно новых механизмов пробивания. Соударения пылевых сгустков с оболочками авиационных и космических аппаратов могут происходить в режиме СГП [1], а определение реальной защитной функции различных металлов и сплавов является актуальной практической задачей.

Введение

Сформировавшиеся в течение многих сотен лет представления о существовании барьерного ограничения при формировании кратерных структур опираются на многочисленные эксперименты и модельные подходы. Сущность такого барьерного ограничения заключается в том, что единственный объем материала преграды в открытой системе ударник – преграда может аккумулировать конечную величину энергии, определяемую константами энергоемкости данного материала. Излишки энергии в этих случаях должны быть выброшены из системы. В связи с этим увеличение энергии соударения не приводит к преодолению барьерного ограничения в 6–12 калибров ударника. При проникновении ударников в условиях сверхглубокого проникновения реализуется закрытая система взаимодействия ударник – преграда, а, следовательно, барьерное ограничение не действует [2]. Этот переход от реализации открытой системы взаимодействия (ударник – преграда) при макроударе к закрытой системе при СГП приводит к увеличению относительной глубины проникновения в 10 – 1000 раз. Соответственно появляются и другие отклонения от известных в области макро удара зависимостей, в том числе, уменьшение динамической прочности материалов защитных оболочек.

Столь значительное падение сопротивления при введении дискретных потоков пылеобразных частиц может объясняться только качественным изменением механизма ударного взаимодействия. Одним из обязательных условий падения динамической прочности должно являться исчезновение статической прочности металлического твердого тела, т. к. она составляет свыше 90% общего сопротивления проникновению [2]. Такое допущение требует физических обоснований. Простое предположение о проплавлении узкой канальной зоны в процессе соударения с микро ударником не выдерживает элементарной энергетической оценки. Развитие же представлений об образовании специфических трещин потребовало в дальнейшем слишком много дополнительных допущений. В частности, при его принятии не удастся объяснить эффекты объемного упрочнения металлических заготовок. В ряде работ [2] выдвигается гипотеза исчезновения статической составляющей сопротивления при ударном проникновении, объясняемого тем, что оно происходит в период незавершенного динамического перехода. В этих условиях, когда произошел распад старой фазы, а новая фаза еще не образовалась, материал локальной области, где происходит процесс проникновения, не имеет ближних связей и обладает характеристиками плотной плазмы. Такая гипотеза позволяет объяснить совокупность полученных результатов, не требуя чрезмерных дополнительных допущений, и, что не менее важно, может быть проверена. В данной работе рассмотрен вариант такой проверки, выполненной на основе расчета результатов проникновения в марганцовистую сталь (γ - фаза).

Анализ результатов взаимодействия потока частиц SiC со стальной преградой

В рамках исследований, финансируемых РФФИ и БФФИ, был выполнен цикл экспериментов по соударению различных металлов и сплавов в режиме СГП с пылеобразными сгустками порошковых частиц. Во всех случаях для реализации процесса использовались традиционные взрывные ускорители, разгоняющие дискретные частицы с размерами менее $0,2 \times 10^{-3}$ м в диапазоне скоростей 300 – 3000 м/с.

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что в процессе СГП в сталях протекают локальные динамические фазовые переходы [3], т.е. в этих зонах кумулируется кинетическая энергия соударения и возникает скачки давления. Уровень таких скачков составляет не менее 0,8-1,2 ГПа, что на 1–2 порядка выше, чем фоновое давление в материале преграды. Приведенные в работе [4] результаты исследования марганцовистых сталей (γ -фаза) показывают, что в этих сталях формируются каналные структуры, плотность которых в единичной площадке выше, чем у сталей с α -фазой, обработанных в аналогичных условиях. На основании рассматриваемой гипотезы о кумуляции вводимой энергии в локальных зонах увеличение плотности каналных образований, т.е. снижение динамической прочности, происходит за счет локального выделения дополнительной энергии $\gamma \rightarrow \alpha$ динамического фазового перехода. Следовательно, в единичный объем нагружаемого материала защитной преграды должно вводиться энергия (e_i)

$$e_i = E_k/V_i + E_p/V_i,$$

где E_k , E_p – кинетическая и потенциальная энергия вводимые в материал преграды, V_i – объем преграды.

При обработке аустенитных сталей в режиме СГП объем материала, в котором произошло $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение, определяли магнитным методом. Соответственно величину дополнительно выделившейся потенциальной (свободной) энергии можно определить как произведение объема материала, претерпевшего фазовое превращение, и удельной энергии фазового перехода стали. При такой постановке задачи количество каналных образований в поперечном сечении аустенитной стали можно определить из соотношения

$$N = E_{\Sigma}/A_{\beta},$$

где $E_{\Sigma} = e_i \cdot V_i$, а A_{β} – удельная энергия каналаобразования для данного режима СГП (показанная в работе [2]). В результате такой расчетной проверки для марганцовистых аустенитных сталей по схеме традиционной обработки в режиме СГП получена плотность каналных образований $N/V_i = 300 - 700 \text{ мм}^{-2}$. Эти расчетные результаты хорошо соответствуют экспериментальным, приведенным в работе [4].

Проверялось соблюдение известной зависимости глубины пробивания от исходной прочности материала преграды. В качестве критерия для оценки использовалась толщина преграды, которая обеспечивала торможение потока микро ударников. В системе железо и его сплавы (стали) было зарегистрировано проникновение их на глубины в сотни миллиметров. В преграде из технически чистого железа, имеющего исходно самую низкую динамическую прочность, глубина проникания составила ≈ 200 мм. В различных углеродистых сталях, обладающих существенно более высокой динамической прочностью глубины проникания составили $\approx 220 - 240$ мм (в том же режиме нагружения), а использование инструментальной стали (типа HSS) позволило устойчиво регистрировать глубины ≈ 300 мм. Во всех этих случаях возрастание неоднородности прелости и структуры по объему преграды приводило к увеличению глубины проникновения дискретных ударников и, соответственно, к падению защитных характеристик

металлических оболочек. Не было подтверждено соблюдение известной зависимости глубины протравливания от динамической и статической прочности материала. В экспериментальных исследованиях СГП получен следующий ряд эффективности торможения (динамической прочности) в сторону убывания: Cu, Al, Ti, Fe.

Заключение

Анализ полученных результатов показал, что основную ответственность за эффективность торможения (динамическую прочность) несут физические процессы при кумуляции энергии в конкретном защитном материале, в том числе, процессы, протекающие при локальных динамических фазовых переходах. Выполнена проверка гипотезы о существовании зависимости СГП от параметров локальных динамических переходов и показана перспективность данного модельного подхода для решения расчетных задач. Можно утверждать, что использование физико-механических характеристик материалов (полученных в статических и в традиционных динамических экспериментах) для создания защиты в условиях СГП нецелесообразно.

Список литературы

1. Опасные факторы при взаимодействии пылевых сгустков с металлическими мишенями / С.М. Ушеренко, В.П. Кириллюк, А.И. Белоус и др. // Сборник научных трудов НГУ №18. - Днепропетровск: РИК НГУ, 2003. - С.65 - 74.
2. Ушеренко С.М. Современные представления об эффекте сверхглубокого проникания / ИФЖ. 2002. Т.75, №3. - С.183 - 198.
3. Структурные изменения в железоникелевых сплавах, вызванные действием высокоскоростного потока порошковых частиц. 2. Эффекты сверхглубокого проникания. / В.И. Зельдович, И.В. Хомская, Н.Ю. Фролова и др. // ФММ. 2002. Т.93, №5. - С.86-94.
4. Структура и износостойкость стали Гадфильда, подвергнутой воздействию ускоренного взрывом потока частиц SiC. / Л.Г. Коршунов, С.М. Ушеренко, О.А. Дыбов и Н.Л. Черненко // ФММ. 2002. Т.94, №1. - С.90-98.

UDK 669.0.46.539.382.2.

ELECTROSTIMULATED RESTORATION OF RESOURCES DURING FATIGUE TESTS

Gromov V. E., Sosnin O. V., Konovalov S. V., Tsellermaer V. V.

Siberian State University of Industry, Novokuznetsk, Russia
gromov@physics.sibsiu.ru

In this article the technique of controlling the accumulation of steel failure in the process of fatigue tests with the help of measuring the velocity of ultrasound propagation is discussing. So we found that the dangerous stage of development fatigue failures had appeared at the beginning of the third stage of abrupt decline of the dependence of ultrasound velocity on the number of loading cycles. The way of restoration of workability of products with the help