

05;12

Исследование процессов пробоя пробки во встречных волнах

© А.К. Диваков, В.А. Ермолаев, Н.И. Жигачева, Ю.И. Мещеряков,
Ю.А. Петров, С.А. Петроченков, М.В. Сильников

Институт проблем машиноведения РАН, С.-Петербург
НПО специальных материалов, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 18 февраля 1998 г.

Для реализации интенсивных сдвиговых процессов при высокоскоростном нагружении мишеней плоским ударником предлагается создавать радиально-неоднородное напряженное состояние. Методика позволяет применять лазерную дифференциальную интерферометрию для изучения кинетики микроструктуры деформируемого материала. Описаны экспериментальные результаты.

Основной трудностью исследования пробоя пробки является ограниченная возможность измерения силовых и деформационных характеристик динамического отклика преграды, особенно на начальной стадии пробоя. Как правило, мы можем измерить только скорость подлета ударника. Используя методику импульсной рентгено съемки, можно также измерять скорость движения границы между головной частью ударника и невозмущенной частью преграды. Однако пространственное и временное разрешение в таких опытах пока недостаточно хорошее, чтобы исследовать начальную стадию пробоя, которая к настоящему времени оказалась наименее изученной.

В то же время исследования динамической прочности преград на тыльный откол, использующие лазерную интерферометрию свободной поверхности преграды, позволяют получить детальную информацию не только о временных характеристиках средней скорости этой поверх-

ности, но и о кинетике микроструктуры, в частности регистрировать изменение во времени дисперсии скорости частиц на так называемом мезоскопическом уровне деформирования и разрушения ($0.1\text{--}10\ \mu\text{m}$) [1].

В этой связи представляется заманчивым разработать такие схемы нагружения плоской преграды, чтобы, с одной стороны, реализовался пробой пробки, а с другой — можно было бы применить методы регистрации процесса динамического деформирования и разрушения, используемые при исследовании процессов одноосной деформации и тыльного откола. С этой целью в настоящей работе предлагается использовать такие конфигурации ударника и преграды, которые позволяли бы создавать в преграде радиально-неоднородное напряженное состояние, обеспечивающее условия для пробоя пробки в плоской преграде при воздействии не традиционно используемым удлиненным бойком, а обычным плоским ударником, применяемым при исследовании процессов одноосной деформации.

Проанализируем возможные схемы нагружения. Неоднородное напряженное состояние означает, что в образце существуют области, в которых параметры импульсов давления различны. Методически наиболее просто варьировать длительность импульса. В свете сказанного рассмотрим следующие схемы нагружения, обеспечивающие неоднородное напряженное состояние образца при плоском соударении.

а) Плоские поверхности соударения ударника и мишени, ступенчатая форма ударника на его тыльной стороне. При такой геометрии радиальная неоднородность напряженного состояния мишени возникает на заднем фронте падающего импульса давления.

б) Плоские поверхности соударения ударника и мишени, ступенчатая форма мишени на ее тыльной стороне. Неоднородность напряженного состояния на переднем фронте отраженного импульса давления. В данной схеме вблизи выступа реализуются условия удвоения скорости сдвиговой деформации по сравнению с обычным взаимодействием удлиненного ударника с мишенью.

в) Плоские поверхности соударения ударника и мишени, неоднородные граничные условия для отраженного импульса давления на тыльной стороне мишени, что достигается применением ограничительной шайбы с отверстием. На поверхности контакта мишени и шайбы падающая волна без отражения проходит в материал шайбы, испытывая отражение сначала на свободной поверхности мишени и лишь после некоторой задержки — от свободной границы шайбы.

г) Имитация соударения удлиненного ударника с плоской преградой.

Предпочтительными можно рассматривать схемы (б) и (в), так как в этих случаях сдвиговое разрушение начинается со свободной поверхности, что позволяет исследовать начальную стадию процесса пробоя. Кроме того, в схеме (г) не реализуются условия встречи волн и для обеспечения требуемой для пробоя скорости сдвиговой деформации необходимо удваивать скорость ударника по сравнению со схемами (а) и (в).

Для случая (б) должна наблюдаться следующая картина. Если t_0 — это момент прихода импульса сжатия на свободную поверхность выступа мишени, то на гладкую часть мишени импульс придет в момент времени $t_1 = t_0 + h/C_1$, где C_1 — продольная скорость звука в мишени. Начиная с этого момента, в радиальном направлении начинает распространяться поперечная волна возмущения, которая к моменту $t_2 = t_1 + d/C_s$ (C_s — скорость поперечных волн; d — диаметр выступа) достигает центральной части мишени, где обычно сфокусирован луч интерферометра. Для регистрации этой волны интерферометром необходимо разнести моменты прихода продольной волны на свободную поверхность и поперечной волны. Второй вариант предполагает использовать два интерферометра, с тем чтобы независимо регистрировать обе продольные волны, выходящие последовательно на поверхности мишени и выступа. В обоих случаях кроме средней скорости свободной поверхности мишени и выступа может быть зарегистрирована также и дисперсия скорости частиц, что позволит связать кинетику микроструктуры с характером пробития пробки.

Ударные испытания и микроструктурные исследования были направлены на отработку оптимальной схемы пробоя пробки при плоском соударении ударника и мишени. Одним из важных, если не основных, критериев подобия процессов, реализуемых с помощью традиционной методики пробоя пробки удлиненным ударником и той, которая предложена в настоящей работе (сдвиг во встречных волнах по краю ступеньки), является подобие микроструктурных процессов, протекающих в обоих случаях в сдвиговой зоне. Были исследованы два варианта схемы — с выступом на тыльной стороне мишени и с дополнительной шайбой. В опытах с использованием ограничительной шайбы для исключения тыльного откола толщину мишени брали равной толщине ударника. В образце алюминиевого сплава Д-16 толщиной 1 мм был получен сквозной пробой уже при скорости ударника 350 м/с.



Строение трещины вблизи выступа в образце из стали Ц-85.

В образцах из вязкой высокопрочной стали Ц-85 толщиной 5 mm лишь при скорости 453 m/s удалось инициировать начальную фазу сдвигового разрушения. Следует отметить, что реализация сдвигового разрушения по схеме (в) наталкивается на серьезные методические трудности. В идеальном случае ограничительная шайба в области контакта с мишенью не должна деформироваться. Однако изготовленные из стали ХВГ и термообработанные на твердость HRC = 64 ш. шайбы деформировались и частично разрушались со стороны мишени, что изменяет условия для локализации сдвига. В этой связи дальнейшие опыты проводились по схеме (б). При использовании стального ударника толщиной 3 mm и скорости соударения 390 m/s по всей окружности выступа образовалась сдвиговая трещина, а при скорости 556 m/s произошел полный пробой пробки.

Микроструктурные исследования зоны разрушения показывают, что геометрия разрушения очень сильно зависит от анизотропии материала преграды. Так, для изотропного сплава Д-16 пробой пробки осуществляется в точности по границе выступа. Что касается стали Ц-85, то зона сдвига имеет ступенчатую геометрию, как это представлено на фотографии (см. рисунок). Продольная сдвиговая трещина начинает

распространяться по границе выступа с тыльной стороны поверхности мишени. Затем на глубине ≈ 1 mm она переходит в трещину нормального отрыва, расположенную параллельно свободной поверхности образца. Такое положение объясняется более высокой сдвиговой прочностью данного материала по сравнению с откольной прочностью из-за сильной анизотропии структуры стали, наведенной при прокатке. На определенном расстоянии от свободной поверхности энергии упругопластической волны оказывается недостаточно для продолжения сдвигового разрушения, но еще достаточно для нормального отрыва. Таким образом, при остановке продольной сдвиговой трещины поле напряжений перераспределяется таким образом, что вблизи остановившейся сдвиговой трещины образуется зона растягивающих напряжений. Ситуация напоминает известный механизм Зинера–Стро зарождения трещин отрыва при блокировании скопления дислокаций.

Результаты испытаний как изотропных, так и сильно анизотропных материалов показывают, что предложенная методика инициирования сдвиговых деформаций действительно позволяет реализовать деформацию сдвига, аналогичную той, которая получается при пробое пробки удлинённым ударником. Вместе с тем, в отличие от последней, пробой пробки реализуется при скорости ударника вдвое меньшей. Кроме того, методика позволяет исследовать начальную стадию пробоя, используя для регистрации волновых процессов методы регистрации, применяемые при исследовании тыльного откола.

При исследовании стали Ц-85 отмечен следующий факт: в то время как в образце толщиной 5 mm сдвиговое разрушение инициировано при скорости 453 m/s, в образце толщиной 2.2 mm даже при скорости 523 m/s никаких следов сдвигового разрушения на границе выступа не обнаружено. Данный феномен, по нашему мнению, связан с различной кинетикой микроструктуры. Как известно [2], функция распределения частиц по скоростям существенно изменяется по мере продвижения волны в глубь материала от нестационарного состояния с большой дисперсией скорости частиц к стационарному с более узким разбросом скоростей. При большой дисперсии реализуются ротационные механизмы разрушения, в то время как при узком — трансляционные, в виде полос локализованного сдвига, что снижает сдвиговую прочность материала. Проверка этих предположений возможна при использовании интерферометра, позволяющего измерять дисперсию скорости частиц на мезоуровне [1].

Список литературы

- [1] *Mescheryakov Yu.I., Divakov A.K.* // *Dymat-Journal*. 1994. N 4. P. 2681–2687.
- [2] *Mescheryakov Yu.I., Makhutov N.A., Atroshenko S.A.* // *J. of the mech. and phys. of solids*. 1994. V. 422. N 9. P. 1435–1467.