

ДИНАМИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Представлені результати експериментальних досліджень різних видів динамічного руйнування: відривом - у разі існування одиночної тріщини, руйнування в плоских хвилях навантаження, зсувом - при пробитті товстих перешкод.

The results of experimental researches of different types of dynamic destruction are presented: tearing away - in the case of existence of single crack, destruction in the flat waves of loading, by a change - at strike-through of thick barriers.

Введение

При анализе процессов воздействия взрыва, высокоскоростного удара и других импульсных воздействий на твердые тела требуются сведения о поведении материала при высоких давлениях и малых длительностях воздействия.

Исследования динамического разрушения твердых тел при ударно-волновом нагружении показывают ряд эффектов [1, 2], противоречащих классическим моделям прочности и трещиностойкости [3]. Природа скоростной зависимости прочности и трещиностойкости в настоящее время требует дальнейшего изучения. Динамическое разрушение является определяющим при пробивании брони, дроблении снарядов. Процессы динамического разрушения сопровождаются локальными полиморфными превращениями, образованием полос локализованного адиабатического сдвига. Сложность динамических исследований состоит в необходимости производить регистрацию параметров процесса в микросекундном временном диапазоне. Для повышения информативности необходимо оценивать поведение материалов при различных видах нагружения и разрушения: в плоских волнах нагрузки, при развитии одиночной трещины, при пробитии преграды [1, 2]. Изучение поведения материалов и полиморфных превращений при высоких давлениях необходимо для создания эффективных объектов спецтехники. Кроме того полиморфные превращения веществ при ударном сжатии используются для получения сверхтвердых материалов – алмаза и различных модификаций нитрида бора.

Дальнейшие исследования изменений прочности на микроуровне и механизмов пластического деформирования будут способствовать конструированию новых высокопрочных материалов и совершенствованию технологии их обработки. Остается актуальным выявление физической природы задержки разрушения [4, 5].

В исследованиях динамического разрушения сталей одиночной трещиной установлен эффект возрастания критического коэффициента интенсивности напряжений при росте скорости изменения КИН [1, 6]. Значения трещиностойкости (критический КИН) увеличивается многократно [6] по сравнению со статическим как для сталей так и для полимерных материалов. Если при статическом нагружении критическую величину КИН можно считать константой при выполнении условий линейной механики разрушения, то в динамических испытаниях определенные критические значения трещиностойкости зависят от скорости нагружения, способа приложения нагрузки и не являются константами.

Вкладом в решение данной проблемы стала концепция инкубационного времени [7, 8]. Было предложено отказаться от традиционного критерия и считать, что разрушение наступает тогда, когда текущий динамический КИН превышает статическую вязкость разрушения на протяжении некоторого минимального (инкубационного) времени, который можно считать константой материала. Однако достаточной проверки предложенной концепции нет.

Экспериментальные исследования поведения разных материалов в плоских волнах нагрузки [9-12], позволяют установить тенденцию увеличения разрушающего напряжения до значений, близких к теоретической прочности, с увеличением скорости нагружения. Указанный эффект требует дальнейших исследований с учетом структурных изменений в волнах нагрузки.

Явление соударения твердых тел привлекает внимание исследователей для обеспечения безопасной эксплуатации гражданской и военной техники. С увеличением скорости соударения в диапазоне 0,5...2 км/с первостепенное значение приобретает изучение поведения материала в небольшой зоне вблизи места соударения.

Постановка задачи

Целью настоящей работы является исследование природы динамического разрушения материалов при различных видах нагружения с учетом полиморфных превращений и образования полос локализованного адиабатического сдвига.

Разрушение конструкционных материалов в плоских волнах нагрузки

Экспериментальное изучение процесса разрушения твердых тел в плоских волнах нагрузки (исследование откола) в основном проводят на пневмопороховых копрах со скоростями ударника 600 м/с ...1200 м/с (рис. 1) [2,9]. Из полученных в экспериментах при нагружении плоскими ударными волнами зависимостям разрушающего напряжения от времени приложения нагрузки наблюдается излом кривой при переходе от квазистатических к откольным разрушениям (рис.1б), что связывается с существованием разрушения под действием напряжений близких к теоретической прочности [9].

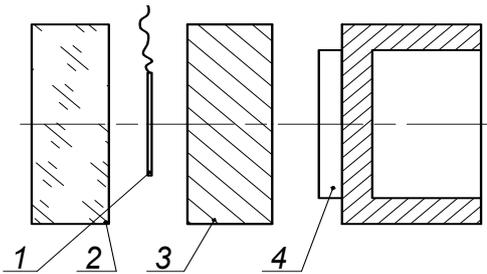


Рис. 1. Схема исследования разрушения отколом: 1- датчик, 2 – накладка из ПММА, 3-образец, 4 – пластина

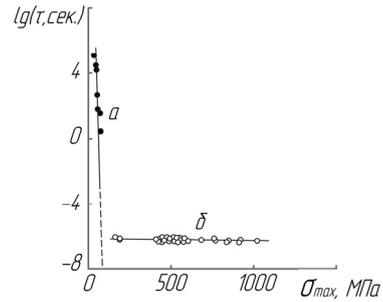


Рис. 2. Зависимость статической (а) и динамической (б) прочности алюминия от времени

Существующие временные схемы откола не допускают корреляцию откольной и квазистатической прочности. Процесс разрушения, возникающий при взаимодействии встречных волн разряжения, характеризуется сверхмалыми временами (≤ 1 мкс) и высокими разрушающими напряжениями в много раз, превышающими статический предел прочности (табл.1). Анализируя экспериментальные исследования разных авторов [10-12] для стали (табл.1), можно установить тенденцию увеличения разрушающего напряжения с увеличением скорости нагружения и стремление его значения до теоретической прочности. Несмотря на это, можно установить, что откольное разрушение имеет особенности похожие квазистатическому разрушению. Оно также начинается с появления зародышевых дефектов и заканчивается ростом микро и макротрещин [9, 10].

Таблица 1

Результаты исследований динамической прочности

№ п/п	Материал	Статический предел прочности, МПа	Откольная прочность, МПа	Время нарастания нагрузки до максимума, мкс	Источник
1	Сталь Ст.3	400	1600	2,18	[11]
2	Сталь Ст. 3	400	2700	0,66	
3	Сталь 08 кп	400	3810- 4280	0,67	[10]
4	Сталь 08 кп	400	4870 - 5480	0,34	
5	Сталь 08 кп	400	5940	0,17	

На основании экспериментальных данных [9] сделан вывод о процессе откольного разрушения как многоочагового, когда в зоне растягивающих усилий происходит зарождение большого числа микротрещин, которые в дальнейшем развитии сливаются в единую магистральную, разделяющую образец на две части. Однако при быстром росте растягивающих напряжений в волнах с напряжениями порядка 8000 МПа, как показывают результаты [11], откольные разрушения удовлетворительно описывает схема мгновенного откола. Эффект мгновенного откола наиболее ярко проявляется для пластичных металлов, поскольку для этих металлов предел прочности на растяжение значительно превышает предел текучести, в условиях одноосной деформации разрушение происходит при напряженном состоянии, близком к всестороннему растяжению. Подобное состояние реализуется также вблизи вершины растущей трещины отрыва.

Так как скорости зарождения и роста несплошностей не могут быть сколь угодно большими, то чем выше скорость приложения нагрузки, тем больше значения растягивающих напряжений могут быть реализованы в материале. В свою очередь, чем больше величина перенапряжения в материале, тем более мелкие и более многочисленные центры разрушения активизируются и дают вклад в увеличение скорости процесса. В настоящее время нет прямых методов, позволяющих измерять напряжения или деформации в области разрушения, и о процессе откольного разрушения судят по экспериментально фиксируемой скорости $w(t)$ свободной поверхности [2]. Для материалов имеет место значительный разброс вычисленных значений разрушающих откольных напряжений, которые меняются в зависимости от условий эксперимента. Они в значительной мере зависят от толщины, материала и скорости пластины, толщины образца и плохо сопоставляются.

Исследования изменений микроструктуры в результате динамического нагружения является одним из наиболее эффективным методом изучения физических процессов в материале при прохождении ударных волн [13]. Испытания в плоских волнах нагрузки образцов диаметром 40 мм и толщиной 20 мм из армо железа и сталей (Ст 10, Ст 20, Ст 45, У8), запрессованных в кольца из малоуглеродистой стали с внешним диаметром 120 мм, при длительности импульса 4-8 мкс показали, что фазовый переход ОЦК – ГПУ ($\alpha - \epsilon$) происходит при давлении 13 ГПа. В структуре деформированных сталей после воздействия ударной волны при давлениях $p > 13$ ГПа возникает также интенсивное образование двойников. Рентгеноструктурный анализ образцов, подвергнутых сжатию давлением выше 13 ГПа, показал наличие остаточной $\epsilon -$ фазы (ГПУ-фазы) не более 5..10%. Фазовые превращения при ударном нагружении являются уникальными с точки зрения влияния на микроструктуру и на диссипацию энергии. Изучение таких процессов проводят на высоколегированных сплавах, в которых в отличие от нелегированных сохраняются остаточные фазовые превращения. Превращение ОЦК-ГПУ при динамическом нагружении сплава железа с 32% никеля (Н32) происходит путем образования узких полос аустенита, начинающихся на границах мартенситных кристаллов (рис. 3) из большого числа центров зарождения.

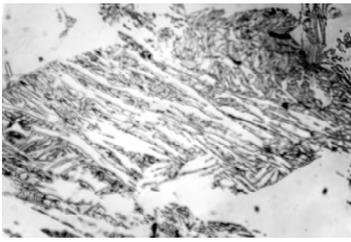


Рис. 3. Превращение ОЦК-ГПУ в сплаве N32 при динамическом нагружении давлением 13ГПа

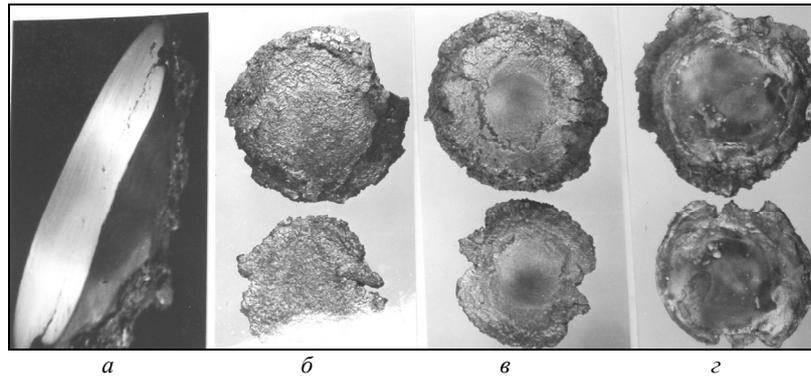


Рис. 4. Откольное разрушение Ст 20:
а- повреждение при $V=635$ м/с, б- вязкий откол при $V=670$ м/с, в – гладкий откол при $V=693$ м/с, г –гладкий откол при $V=764$ м/с

Исследования откола, которые проводили при плосковолновом нагружении образцов диаметром 120 мм толщиной $h_2=14,7$ мм из стали 20 пластинами диаметром 88 мм, толщиной $h_1=9,4$ мм из стали 20 со скоростями 600-800 м/с показали следующие результаты. Без полиморфных превращений $\alpha - \epsilon$ давление в волне разряжения уменьшается плавно, поэтому при взаимодействии волн разряжения малой крутизны нарастания реализуются отрицательные напряжения, достаточные для зарождения, развития и слияния трещин и приводящие к вязкому отколу (рис.4 б). Гладкий откол соответствует кратковременному действию (< 1 мкс) высоких растягивающих напряжений, связанных с существованием фазовых переходов (рис. 4 в,г). Чем больше крутизна фронта нарастания волны разряжения, тем меньшую шероховатость имеет поверхность откола.

Разрушение и трещиностойкость сталей в микросекундном диапазоне нагрузки

Разработка новой методики исследования разрушения отрывом при испытании кольцевых образцов при импульсном нагружении позволила расширить представления о природе разрушения. Испытания проводили на пневмопороховом копре со скоростями ударника 140...600 м/с (рис.5), что обеспечивает нагружения с кинетической энергией, превышающей энергию, которая идет на разрушение образца в десятки раз [1]. Эксперименты проводились при нагружении длинными импульсами большой интенсивности, когда время нарастания нагрузки в импульсе T больше времени до начала движения трещины t_c , $T \geq t_c$. При этом образец 3 крепился перед дульным срезом ствола копра на фланце 5 и нагружался внутренним импульсным давлением, возникшим при сжатии алюминиевого диска 4 стальным ударником 6, который разгоняется в стволе, и неподвижным диском 2.

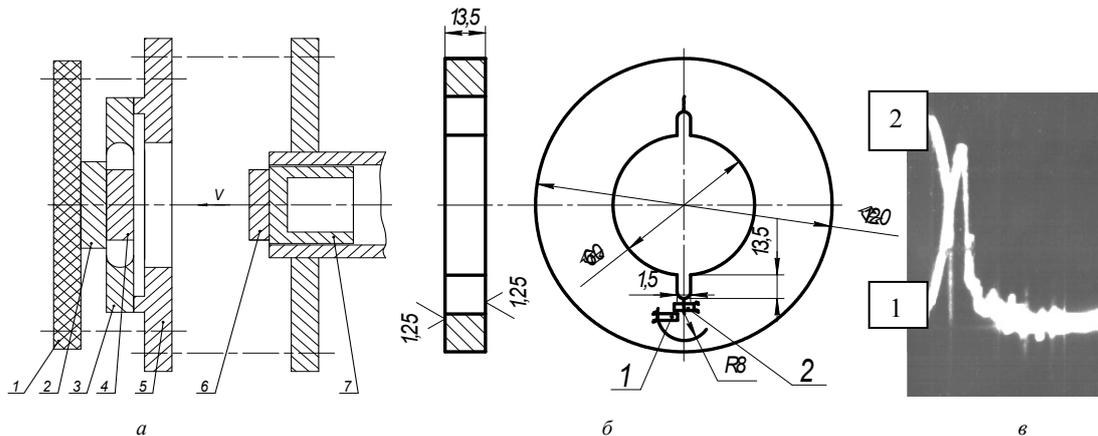


Рис. 5. Схемы испытания кольцевых образцов (а), наклейки на них датчиков (б) и типовые осциллограммы сигналов от датчиков (в): 1-упругой деформации, 2- датчика розрыва

В качестве характеристики разрушения принята трещиностойкость (критический коэффициент интенсивности напряжений в устье трещины в момент ее страгивания K_{1d}). В экспериментальных исследованиях использованы образцы с предварительно наведенными усталостными трещинами (рис.5а) с измерением упругой деформации непосредственно вблизи вершины трещины. Перед динамическими испытаниями проводилась предварительная статическая тарировка образцов [6]. В исследованиях установлен эффект возрастания критического коэффициента интенсивности напряжений при росте скорости изменения КИН (рис.6) [1, 6].

По результатам исследований динамической трещиностойкости построена зависимость времени приложения нагрузки до момента страгивания трещины (долговечности) от трещиностойкости K_{1d} (рис.7)

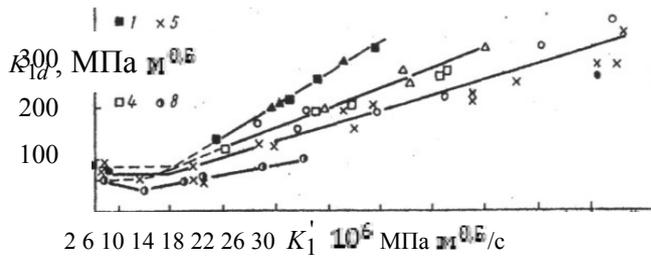


Рис.6. Зависимость динамической трещиностойкости сталей от скорости изменения КИН: 1 - Ст 3; T=293 К, B=15 мм, 2 -Ст 3;T=293 К, B=20 мм, 3 - Ст 3; T= 213 К, B=15 мм; 4 -Ст 3, T= 153 К, B=15 мм, 5-сталь 40X , T=293 К, B= 12,5 мм, (46...50 HRC); 6-сталь 40X , T=293 К, B= 25, 4 мм, (46...50 HRC)

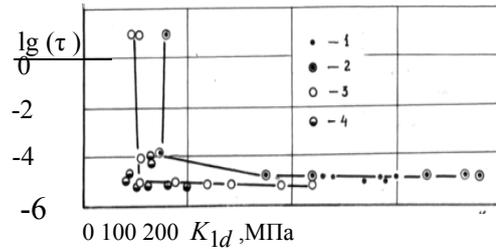


Рис. 7. Зависимость трещиностойкости сталей от времени: 1- 40X (46.50 HRC); 2 – сталь Ст3, T=293К, 3- сталь Ст3 T=150К; 4 - сталь X2NiCoMo

Характер изменения этой зависимости аналогичен зависимости долговечности от значений напряжений, вызывающих откольное разрушение. При временах порядка 10^{-6} с долговечность слабо зависит от уровня трещиностойкости.

При импульсном нагружении существует так называемый критерий минимального времени [8]. Временная задержка момента начала разрушения определяется конечностью распространения волны напряжений и запаздыванием текучести. Запаздывание текучести объясняется в основном с позиций теории дислокаций [14]. Предполагается, что вокруг дислокации образуется атмосфера (облако) из атомов, которая тесно с ней связана, возможность вырваться из атмосферы определяется приложенной нагрузкой и температурой. Это время уменьшается с увеличением напряжения и температуры. Когда освобожденная дислокация доходит до границы зерна, чтобы пройти границу нужна значительно сила, чем освободится. Тот момент, когда скопившиеся дислокации проходят границу считается началом пластического течения.

В экспериментах по разрушению кольцевых образцов с двумя трещинами с использованием схемы испытаний (см. рис. 5) [1,15] исследовалось влияние скорости нагружения и низкой температуры на динамическую долговечность, было определено время до наступления критического состояния t_c и инкубационное время t_{snc} (задержка разрушения). Время до страгивания трещины оценивали регистрацией сигналов от тензорезисторов, наклеенных вблизи вершины трещины (см. рис.5в), с помощью измерительного комплекса, который включает электронные осциллографы. Результаты испытаний показывают существование для разных сталей своего характерного инкубационного времени, которое определяется по формуле

$$t_{snc} = \frac{K_{1d} - K_{1c}}{K_1'} \quad (1)$$

где K_{1c} - критическое значение КИН при статическом нагружении, K_{1d} - критическое значение КИН при динамическом нагружении, K_1' - скорость изменения КИН.

Подтверждается гипотеза Кальтхофа [8], согласно которой вершина трещины при импульсном нагружении должна испытывать действие сверхкритического КИН, которое значительно больше статического $K_{1d} \geq K_{1c}$, начиная с определенного минимального времени до начала быстрого распространения трещины (рис.5). Не установлено то, что страгивание трещины происходит на ниспадающей ветви КИН, т.е. при снижении КИН после достижения его максимума.

Таблица 2

Результаты исследований трещиностойкости и времени до разрушения стали

п / п	Марка стали	КИН, МПа м ^{0,5}	Скорость Изменения КИН, МПа м ^{0,5} с ⁻¹	Температура испытаний	Время до страгивания t_c , мкс	Инкубационное время, t_{inc} , мкс	Источ-ник
1.	Сталь 40X	117...141	1,2...2 10 ⁷	293 К	8,83	5,34	[15]
2.	Сталь 40X	193...219	2,1...3 10 ⁷	293 К	8,4	6,4	[15]
3.	Сталь Ст.3	336...380	2,3...2,8 10 ⁷	293 К	14,3	11,4	[15]
4.	Сталь Ст. 3	240...300	1,6...2,2 10 ⁷	153 К	9,6	5,2	[15]
5.	X2NiCoMo 1895	93...97	1,4 10 ⁷	293 К	6,8	2,6	[8]

Причем принято, что если КИН медленно увеличивается во времени, то задержка разрушения мала. В таблице 2 приведены результаты испытаний разных классов сталей с измерением времени от начала нагружения до страгивания трещины и инкубационного времени, определенного по формуле (1), с учетом влияния скорости изменения КИН и температуры испытаний. Эти исследования помогли созданию специальных низкоуглеродистых сталей, прочность и трещиностойкость которых в 2...3 раза превышает прочность и трещиностойкость известных низкоуглеродистых сталей. При этом время до страгивания трещины в зависимости от температуры также увеличивается в 2...3 раза.

Как показывают результаты испытаний, большому инкубационному времени отвечают большие значения трещиностойкости. Инкубационное время увеличивается с увеличением скорости нагружения. Оно снижается при отрицательных температурах, зависит от материала и его состояния. Время до страгивания трещины (долговечность) мало чувствительно к скорости нагружения, начиная с некоторого уровня, но с понижением температуры до 153 К уменьшается.

Разрушение при пробивании преград с большой скоростью

На проникание и пробой преграды влияет форма передней части ударника (рис.8), его твердость по отношению к преграде.

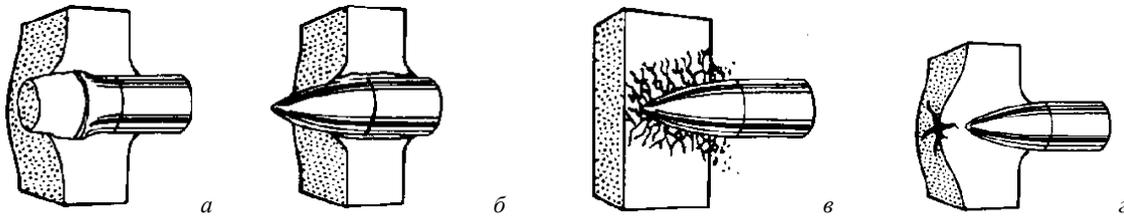


Рис. 8. Пробой преграды ударником:

а- с выбиванием пробки, б- прониканием, в- хрупким разрушением, з- с разрушением радиальными трещина [16]

Чем сильнее притуплена передняя часть, тем выше баллистическая скорость пробоя [16, 17]. Наиболее распространены 4 основные схемы пробоя преграды: а- с выбиванием пробки ударником, твердость которого близка к твердости преграды, б- прониканием более твердого ударника с конической частью в более пластичную преграду, в- хрупкое разрушение твердой преграды, г- разрушение с возникновением радиальных трещин.

Рассмотрим два случая пробоя преграды – стержнем с плоским торцом одинаковой твердости и коническим – более твердым чем преграда. Пробой листового элемента толщиной h стержнем одинаковой твердости с плоским торцом длиной L , если выполняется соотношение $h/L \geq 1/4$, осуществляется при определенной скорости стержня V с выбиванием части листа – пробки, поперечное сечение которой будет равно максимальному сечению стержня после соударения (рис.8а). Два процесса снижают скорость, когда он пробивает пластину: первый процесс сопровождается ускорением массы пробки за счет количества движения, передающего ей от стержня, второй за счет сопротивления сдвигу на периферии отверстия в листе замедляет систему стержень-пробка. В случае центрального неупругого удара скорость стержня и пробки, никак несвязанной с листом, будет одинаковой. Из закона сохранения количества движения находим скорость системы стержень-пробка:

$$V_2 = \frac{V_1 m_c}{m_c + m_{np}}, \quad (2)$$

где V_1 – скорость стержня, V_2 – скорость двух тел после удара, m_c – масса стержня, m_{np} – масса пробки.

При пробивании пластины будет также происходить потеря кинетической энергии вследствие возникновения зоны сдвига на границе между пробкой и остальным листом. Удельная энергия сдвига мало чувствительна к изменению скорости нагружения довольно в широком диапазоне пока не возникнет адиабатический процесс скольжения. При этом она уменьшится до нового постоянного значения, которое сохраняется до исключительно высоких скоростей. Энергия сдвига G может быть определена по формуле:

$$G = \gamma F h, \quad (3)$$

где γ – удельная энергия сдвига, F – периметр сечения пробки, h – толщина листа.

Энергия при свободном соударении двух тел- стержня и пробки, не связанной с пластиной, расходуется на пластическое деформирование и переходит в тепло, равна разности кинетической энергии до и после соударения и определяется с учетом (2)

$$Q = \frac{m_c V_1^2}{2} - \frac{m_c^2 V_1^2}{2(m_c + m_{np})} = \frac{m_c V_1^2}{2} \frac{m_{np}}{(m_c + m_{np})} \quad (4)$$

В реальных условиях, пробка связана с листом, эта энергия с учетом влияния сдвига увеличивается в n раз, $n > 1$.

Уравнение баланса энергии, когда стержень не пробивает листовой элемент можно записать в следующем виде

$$\frac{m_c V_1^2}{2} \leq \frac{m_c V_1^2}{2} \frac{m_{np}}{(m_c + m_{np})} n + G, \quad (5)$$

При выбивании пробки со скоростью V_2 уравнение баланса примет вид:

$$\frac{m_c V_1^2}{2} = \frac{m_c V_1^2}{2} \frac{m_{np}}{(m_c + m_{np})} n + G + \frac{(m_c + m_{np}) V_2^2}{2} \quad (6)$$

В случае взаимодействия с преградой стержня с конической передней частью, твердость которого больше твердости преграды, происходит значительное проникание его в преграду, при этом снижается скорость пробития преграды. Пробка в преграде не формируется. Конический стержень смещает, деформирует или разрушает материал в боковых направлениях (рис.8 б-г). Уравнение энергетического баланса может быть записано

$$\frac{m_c V_1^2}{2} = \frac{m_c V_2^2}{2} + W, \quad (7)$$

где V_1, V_2 – скорость стержня до и после пробивания, W – работа пробивания.

Работа, необходимая для деформирования и разрушения материала в боковом направлении зависит от динамических прочности и трещиностойкости материала, а также от давления, вызванного инерцией материала в боковом направлении. С увеличением скорости влияние на пробой прочности и трещиностойкости менее существенно, чем давления вызванного боковой инерцией.

При ударно-волновом нагружении необходимо считаться с локализацией пластической деформации, определяющей пробой преграды. Неустойчивость пластической деформации при высокоскоростном пробое связывают с образованием полос адиабатического сдвига (ПАС) размерами до нескольких сотен микрон. Для описания процесса формирования ПАС в различных материалах применимо адиабатическое приближение. Считается, что тепло не успевает отводиться из области локализации, что приводит к существенным структурным изменениям, к термическому локальному разупрочнению и в последующем – к разрушению. При этом уменьшается удельная энергия сдвига γ . Если при плоско-волновом нагружении (рис.1) ведущим механизмом разрушения является откол, сопровождающийся образованием микроразрушений на различных несовершенствах структуры (рис.4), то, как правило, полосы адиабатического сдвига образуются при высокоскоростном сдвиге – пробое (рис.9). Сквозное пробитие пластин сопровождается появлением полос адиабатического сдвига, количество которых увеличивается с ростом скорости и вдоль которых происходит разрушение (рис.9).

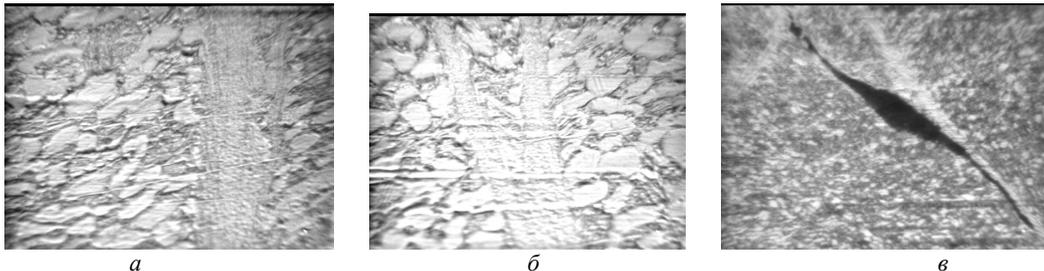


Рис. 9. Образование ПАС и трещин ПАСах в титановом сплаве при внедрении конического ударника со скоростью $V=400$ м/с : а-одной полосы, б – двух пересекающихся, в-образование и переход трещины от одной полосы к другой

Выводы

1. Нагружение сталей плоскими волнами сжатия при давлении больше 13 ГПа сопровождается интенсивным образованием двойников и фазовыми превращениями ОЦК-ГЦК. При разрушении образуется гладкий откол. Разрушение отколом происходит при возрастании разрушающего напряжения со стремлением его значения к теоретической прочности с увеличением скорости нагружения и уменьшением времени нарастания нагрузки до значений, меньших 10^{-6} с.
2. Эффект возрастания коэффициента интенсивности напряжений при срагивании трещины с ростом скорости его изменения сопровождается временной задержкой разрушения.
3. Разрушение при высокоскоростном пробое сопровождается образованием локализованных полос адиабатического сдвига, приводящих к снижению сопротивления пробивания преграды.

Список литературы

1. Степанов Г.В. Динамическая трещиностойкость конструкционных материалов / Степанов Г.В., Маковой В.А. – К.: Наукова думка, 1993. – 143 с.
2. Каннель Г.И. Субмикросекундная прочность материалов / Каннель Г.И., Разоренов С.В., Фортвов В.Е. // Механика твердого тела. – 2005. - №4. - С. 86 - 113
3. Нотт Дж.Ф. Основы механики разрушения. – М.: Металлургия, 1978. - 256 с
4. Журков С.Н. О физических основах температурно-временной зависимости прочности твердых тел / Журков С.Н., Петров В.А. // Доклады АН СССР. – 1978. – Т. 239, №6. - С.1316-1319.
5. Морозов Н.Ф. О концепции структурного времени в теории динамического разрушения хрупких материалов / Морозов Н.Ф., Петров Ю.В. // Доклады Академии наук. – 1992. – Т. 324, №5. – С. 964 - 967.
6. Степанов Г.В. Влияние скорости нагружения на трещиностойкость закаленной стали / Степанов Г.В., Маковой В.А. // Проблемы прочности. – 1984. - №6. – С.31-35.
7. Kalthoff J.F. Instability of cracks under impulse loads / Kalthoff J.F., Shockey D.A. // Journal of Applied Physics. - 1977. – Vol. 48, № 3. – P. 986-993.
8. Kalthoff J.F. Fracture behavior under high rates of loading // Engineering fracture mechanics. – 1986. – Vol.23, №1. – P. 289-298.
9. Златин Н.А. Временные закономерности процесса разрушения металлов при интенсивных нагрузках / Златин Н.А., Мочалов С.М., Пугачев Г.С., Брагов А.М. // ФТТ. – 1974. – Т.16, №6. – С. 1752 - 1755.
10. Тарасов Б. А. Сопротивление разрушению пластин при ударном нагружении // Проблемы прочности. – 1974. - № 3. – С. 121 – 122.
11. Ахмадеев Н.Х. Моделирование откольного разрушения при ударном деформировании. Анализ схемы мгновенного откола / Ахмадеев Н.Х., Нигматулин Р.И. // ПМТФ. – 1981. - №3. - С.120 – 128.
12. Дремин А.Н. Кинетические характеристики откольного разрушения / Дремин А.Н., Молодец А.М. // ПМТФ. – 1980. - №6. - С.85 – 95.
13. Бакалинская Н.Д. Структура стали 15кп после нагружения плоской ударной волной, вызывающей фазовый переход / Бакалинская Н.Д., Зубов В.И., Надеждин Г.Н., Петров Ю.Н., Свечников В.Л., Степанов Г.В. // Проблемы прочности. – 1988. - №9. – С.63-66.
14. Суворова Ю.В. Запаздывание текучести в сталях // ПМТФ. – 1968. - №3. - С. 55- 62.
15. Маковой В.О. Природа руйнування сталей при імпульсному навантаженню // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2009. - №4. – С. 85-92.
16. Зукас Дж. А. Проникание и пробивание твердых тел // В кн. Динамика удара . Под редакцией С. Григоряна. – М.: Мир, 1985. – С. 110-172.
17. Степанов Г.В., Зубов В.И. Анализ сопротивления алюминиевого сплава внедрению стального цилиндра со скоростью до 500 м/с / Степанов Г.В., Зубов В.И. // Проблемы прочности. – 1998. - №5. – С.106-110.