

05;12

Влияние высокоскоростного удара кумулятивной струи на прочность титановых сплавов

© В.Н. Минаков, Н.В. Минаков, В.Ю. Пучкова, Н.Д. Рудык, Г.Е. Хоменко

Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, Киев, Украина
e-mail: altifer@ipms.kiev.ua

(Поступило в Редакцию 5 сентября 2005 г. В окончательной редакции 10 мая 2006 г.)

Изучено влияние высокоскоростного удара кумулятивной струи на структуру и прочность технического чистого титана VT1 и титановых сплавов VT22, VT3-1, ПТ-3В в сравнении с алюминиевым сплавом АК6 и бронзой Бр ОЦС. В качестве характеристики прочности в работе использована микротвердость. Анализ изменения микротвердости во взаимосвязи со структурными изменениями проведен в приповерхностном слое материала мишени вдоль всего канала, образующегося в результате воздействия кумулятивной струи, что позволило качественно оценить изменения структуры, характера разрушения и прочности в мишенях из разных сплавов.

PACS: 81.70.Bt

В последнее время повысился интерес к сплавам титана с точки зрения перспективности использования их для защиты от воздействия высокоскоростного удара. Имеется ряд работ, посвященных изучению воздействия кумулятивной струи на мишень из различных металлов и их сплавов [1–4], а также керамики [5,6] с анализом различия поведения этих материалов в условиях воздействия высокоскоростного удара. Кроме того, часть опубликованных работ посвящена расчету глубины проникновения кумулятивной струи в материал мишени и проверке соответствия расчетных данных экспериментальным [7,8].

В настоящей работе проведено исследование влияния высокоскоростного удара кумулятивной струи на структуру и прочность мишеней из технического чистого титана VT1 и титановых сплавов VT22, VT3-1, ПТ-2В, а также из алюминиевого сплава АК6 и бронзы Бр ОЦС. В качестве характеристики прочности используется микротвердость. Химический состав исследуемых материалов мишени приведен в табл. 1, 2. Термодинамические характеристики кумулятивного заряда с медной облицовкой имеют следующие значения: скорость детонации — 8.3 km/s, теплота взрыва ~ 5500 kJ/kg, температура взрыва $\sim 3850^\circ\text{C}$ [9].

Физико-механические характеристики исследуемых в данной работе сплавов приведены в табл. 3.

Для структурных исследований и измерения микротвердости делали продольный разрез мишени вдоль образовавшегося канала, затем образцы механически шлифовались и подвергались электролитической полировке с последующим травлением для выявления микроструктуры. На подготовленных шлифах проводили измерения микротвердости вдоль канала на расстоянии $\sim 30\text{--}50\ \mu\text{m}$ от стенки канала, расстояние между отпечатками составляло $\sim 90\text{--}100\ \mu\text{m}$. Также были проведены измерения микротвердости в направлении, перпендикулярном оси канала, — от стенки канала к поверхности образца и придонной части в направлении

оси канала к поверхности образца без проникновения кумулятивной струи.

Для кинетики микротвердости приповерхностного слоя вдоль образовавшегося канала характерно немонотонное увеличение и уменьшение ее значений по сравнению со значениями микротвердости материалов мишени в исходном состоянии. Исходя из этого статистическое распределение значений микротвердости по глубине канала можно условно разбить на интервалы, где средние значения микротвердости существенно отличаются и соответствуют определенной зоне канала: лунке I, образовавшейся при взаимодействии кумулятивной струи с поверхностью мишени, цилиндрической (конусной) части канала II, области локального расширения III и донной части канала IV. Относительная глубина указанных зон канала приведена в табл. 4, а изменения средних значений микротвердости вдоль канала для исследуемых сплавов представлены на рис. 1.

Сплав VT22 исследовался в двух состояниях — отожженный (1) и неотожженный (2). Полученные значения микротвердости в зависимости от относительной глубины канала представлены на рис. 1 (кривые 1, 3).

Следует отметить, что если для неотожженного сплава VT-22 (2) микротвердость приповерхностного слоя в зонах расширения канала возрастает, то для отожженного VT-22 (1) наблюдается разупрочнение и существенное повышение микротвердости в придонной части канала при $n > 1$ (рис. 1, кривая 3).

Сильнолегированные высокопрочные ($\alpha + \beta$) титановые сплавы VT22 и VT3-1 имеют одинаковый характер изменения значений микротвердости приповерхностного слоя вдоль канала: наибольшее разупрочнение — в области расширения канала (рис. 1, $n = 0.3\text{--}0.5$), а упрочнение — в донной части канала (рис. 1, $n \sim 0.68$). В то же время для однофазного сплава VT1 наблюдается разупрочнение по всей длине канала, а в зоне локального расширения канала микротвердость поверхностного

Таблица 1. Химический состав титановых сплавов

Сплав	Al, wt.%	Fe, wt.%	V, wt.%	Mo, wt.%	Cr, wt.%	Si, wt.%	Mn, wt.%
BT22	4.0–5.7	0.5–0.7	4.0–5.5	4.5–5.0	0.5–2.0	–	–
BT3-1	5.5–7.0	0.2–0.7	–	2.0–3.0	1.0–2.5	0.15–0.4	–
ПТ-3В	3.79–3.62	0.08–0.11	2.6	–	–	–	0.06

Таблица 2. Химический состав сплавов

Сплав	Al, wt.%	Cu, wt.%	Mg, wt.%	Mn, wt.%	Si, wt.%	Sn, wt.%	Pb, wt.%	Zn, wt.%
АК-6	95.4	1.8–2.6	0.4–0.8	0.4–0.8	0.7–1.2	–	–	–
Бр ОЦС	–	88.7	–	–	–	3.07	3.2	4.25

Таблица 3. Физико-механические характеристики исследуемых сплавов

Характеристика	Сплав					
	BT1	BT22	BT3-1	ПТ-3В	АК-6	Бр ОЦС
Плотность ρ , g/cm ³	4.5	4.5	4.5	4.5	2.7	8.9
Скорость продольной волны C_l , m/s	6000	6000	6000	6000	6260	4700
Скорость сдвиговой волны C_k , m/s	3500	3500	3500	3500	3080	2260
Предел точности σ_s , МПа	400–550	1100–1250	1000–1200	700	425	300
Вязкость разрушения K_{1C} , МПа · mm ^{1/2}	–	72	165	–	30	–

слоя составляет ~ 3.2 GPa ($n = 0.4–0.5$), что меньше, чем в исходном состоянии (~ 3.4 GPa).

Несколько иная зависимость микротвердости приповерхностного слоя для псевдо α -сплава ПТ-3В. Микротвердость приповерхностного слоя сплава ПТ-3В возрастает в зонах канала при $n = 0.2–0.6$ и достигает максимальных значений в зоне расширения — 3.2 GPa, при $n = 0.45$ (рис. 1). В придонной части канала микротвердость повышается до ~ 3.8 GPa (рис. 1, $n > 1.0$).

Существенное упрочнение при воздействии кумулятивной струи наблюдается в приповерхностном слое для бронзы Бр ОЦС: микротвердость возрастает в 1.5 раза по сравнению с исходным значением и сохраняется по всей длине канала. В придонной части канала ($n > 1.0$)

упрочнения не наблюдается. Для алюминиевого сплава характерно снижение уровня упрочнения приповерхностного слоя по длине канала от 1.0 ($n \sim 0.2$) до 0.75 GPa ($n \sim 0.65$) и незначительное упрочнение в придонной части канала ~ 0.85 n ($n > 1.0$) по сравнению с исходным состоянием ~ 0.7 GPa.

Изменения значений микротвердости приповерхностного слоя вдоль канала, образующегося при воздействии кумулятивной струи на мишень сплава АК-6 и бронзы Бр ОЦС, приведены на рис. 1 (кривые 6, 7).

Наблюдаемые различия в значениях микротвердости для мишеней из разных сплавов можно объяснить исходя из результатов структурных исследований.

При воздействии кумулятивной струи на мишень из сплава BT22 (1) в канале при $n = 0.35$ образуются адиабатические полосы сдвига, распространяющиеся в глубь образца под углом $\sim 45^\circ$ по отношению к оси канала. Это свидетельствует о том, что в данной зоне канала происходит локализация пластической деформации при уровне сдвиговых напряжений, превышающих некоторое критическое значение τ_{cr} . Адиабатические полосы шириной $\delta \approx 5–10 \mu\text{m}$ разветвляются во внутреннем объеме материала, а протяженность зоны с адиабатическими полосами составляет 1.5–2.0 mm (рис. 2, а). В канале при $n \sim 0.7$ плотность адиабатических полос возрастает, ширина их в приповерхностном слое канала достигает 20–30 μm (рис. 2, а). Вероятно, кратковременные тепловые эффекты в этой области канала уменьшают уровень деформационного упрочнения приповерхностного слоя канала, что подтверждается уменьшением значения

Таблица 4. Относительная глубина зон канала мишени исследуемых сплавов

Сплав	Относительная глубина зон канала $n = h_{meas} / h_{canal}$			
	I	II	III	IV
BT1	0.08	0.68	0.85	1.0
BT22 (1)	0.08	0.46	0.8	1.0
BT22 (2)*	0.11	0.44	–	–
BT3-1*	0.11	0.4	–	–
ПТ-3В	0.14	0.73	–	1.0
АК-6	0.08	0.52	0.62	1.0
Бр ОЦС	0.06	0.44	0.78	1.0

* Образец разрушения.

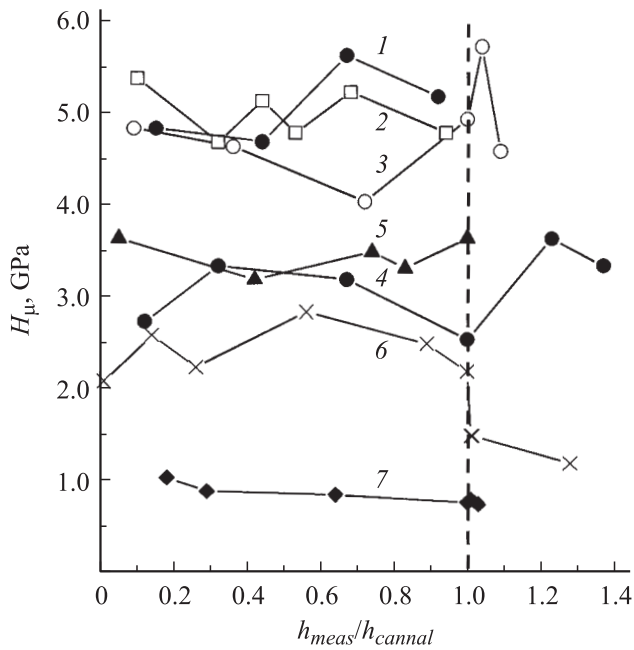


Рис. 1. Зависимость средних значений микротвердости приповерхностного слоя от относительной глубины канала: 1 — титановый сплав ВТ22 (2); 2 — титановый сплав ВТ3-1; 3 — титановый сплав ВТ22 (1); 4 — титановый сплав ПТ-3В; 5 — технически чистый титан ВТ1; 6 — бронза Бр ОЦС; 7 — алюминиевый сплав АК6.

микротвердости в зоне при $n = 0.7$ по сравнению с $n \sim 0.35$ (рис. 1, кривая 3).

Для адиабатических полос сдвига характерно образование внутренних „разрывов“. В зонах канала мишени при $n = 0.7$ и 1.0 в целом плотность полос сдвига увеличивается. Причем в канале при $n = 0.7$ в приповерхностном слое в результате пересечения адиабатических полос образуется сетка (рис. 2, *b*). Возможно, в данной зоне канала происходит пластическое разрушение кумулятивной струи на отдельные элементы, и доминирующим становится радиальное движение струи [10]. Это приводит к локальному расширению канала и повышению плотности адиабатических полос с внутренними разрывами в поверхностном слое материала канала. Длина внутренних разрывов — $1-2$ мм, а в поперечном сечении — $0.3-0.4$ мм. В объеме материала линейные размеры внутренних разрывов уменьшаются. Для внутренней поверхности канала при $n = 0.7$ характерна шероховатость в виде выступов под углом $\sim 45^\circ$, которые образуются в результате локального разрушения материала сколом в зоне действия максимального давления ударной волны кумулятивной струи. Рост плотности полос сдвига в зонах при $n = 1.0$ и $n > 1.0$ (рис. 2, *c*) приводит к значительному упрочнению, о чем свидетельствует увеличение значений микротвердости в придонной части канала без проникновения кумулятивной струи (рис. 1, кривая 3).

В отличие от сплава ВТ22 (1) плотность полос сдвига в канале при $n = 0.2$ сплава ВТ22 (2) значительно выше, а пересечение их между собой в приповерхностном слое приводит к образованию внутренних разрывов в объеме материала. Плотность таких разрывов в полосах сдвига возрастает в зоне канала при $n = 0.45$. Адиабатические полосы от стенки канала в глубь образца распространяются в направлении, параллельном фронту ударной волны кумулятивной струи, огибая внутренние препятствия, что приводит к многочисленным перегибам полос сдвига. Такое распределение сдвиговых полос вдоль стенки канала определяет характер изменения упрочнения приповерхностного слоя: пик на кривой значений микротвердости с последующим спадом (рис. 1, кривая 1).

Для внутренней поверхности канала так же характерна шероховатость, как и для сплава ВТ22 (1), однако в

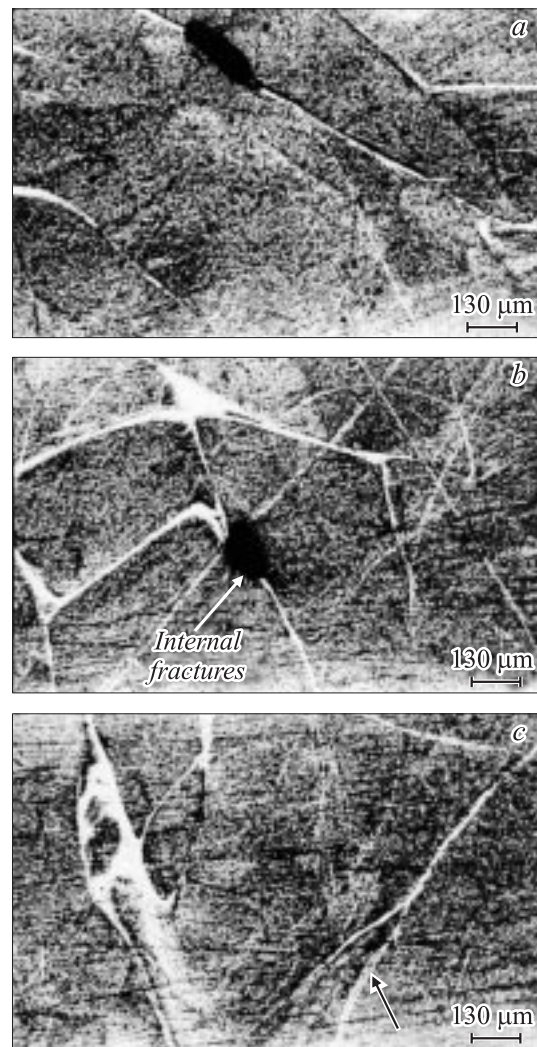


Рис. 2. Изменение плотности полос адиабатического сдвига и характера их распространения вдоль канала для сплава ВТ22 (1): *a* — область канала при $n \sim 0.35$; *b* — при ~ 0.7 ; *c* — при $n > 1.0$ (стрелкой указаны полосы адиабатического сдвига).

зоне канала при $n \sim 0.7$ площадь выступов локального расширения сколом значительно возрастает, что в итоге приводит к магистральному разрушению образца. Поэтому в канале при $n > 0.65$ упрочнения материала не наблюдается.

Исходная структура сплава ВТ3-1 имеет волокнистую деформационную структуру. При воздействии кумулятивной струи полосы адиабатического сдвига, которые распространяются вдоль границ вытянутой полосчатой структуры, наблюдаются в канале при $n > 0.65$ в плоскости фронта ударной волны кумулятивной струи. При распространении полос в объеме образца наблюдается их разветвление и образование внутренних разрывов. Протяженность зоны с адиабатическими полосами шириной $\delta \sim 20 \mu\text{m}$ достигает 3–4 мм. График изменения микротвердости приповерхностного слоя этой зоны имеет пик и спад (рис. 1, кривая 2). Ниже области канала при $n > 0.65$ упрочнения приповерхностного слоя не наблюдается, а происходит, как и для сплава ВТ22 (2), магистральное разрушение. Внутренняя поверхность этого участка канала имеет рельефный вид, не характерный для разрушения сколом.

Структура сплава ПТ-3В имеет полиэдрическую структуру с ребристыми границами и рельефными признаками мартенситного превращения. Мартенситное превращение в объеме неоднородно как по плотности пластин α' -фазы, так и по их количеству. Адиабатические полосы сдвига с мелкими внутренними разрывами в канале при $n > 0.1$, а также при переходе в зону при $n = 0.3$, распространяются в основном параллельно оси канала с разветвлениями внутрь образца до 3 мм от края канала. В полосах сдвига образуются внутренние трещины длиной до 0.15 мм, распространяющиеся в плоскости фронта ударной волны кумулятивной струи. В конце канала при $n = 0.3$ плотность адиабатических полос уменьшается. В зоне при $n = 0.68$ возрастает количество полос сдвига, пересекающихся между собой в приповерхностном слое канала на расстоянии до 300 μm от стенки канала. В зонах при $n = 1.0$ и $n > 1.0$ образуются полосы сдвига шириной до 30–50 μm и длиной 2–3 мм без внутренних разрывов. Характерной особенностью образующихся адиабатических полос является их криволинейность при распространении в глубь образца, а также изменение их плотности вдоль стенки канала, что соответствует характеру изменения микротвердости в приповерхностном слое (рис. 1, кривая 4). Наибольшее упрочнение наблюдается в придонной части канала при $n > 1.0$ за счет повышения плотности полос сдвига и увеличения их ширины. На внутренней поверхности канала образования шероховатости не наблюдается.

Суммируя результаты, можно отметить следующее.

1. В отожженном рекристаллизованном сплаве ВТ22 (1) высокоскоростное воздействие металлической кумулятивной струи вызывает течение материала, что приводит к образованию адиабатических полос сдвига,

имеющих кристаллографическую направленность и распространяющихся прямолинейно под углом 45° к оси канала от стенок канала в глубь образца. В неотожженном сплаве ВТ22 (2) полосы сдвига распространяются в основном по границам зерен в плоскости фронта ударной волны кумулятивной струи, что приводит к их многочисленным изгибам. Такие полосы имеют значительно больше внутренних разрывов (трещин) как по количеству, так и по линейным размерам. Зарождение таких трещин на внутренней поверхности канала является источником скола материала, что приводит к разрушению ВТ22 (2) и увеличению линейных размеров адиабатических полос сдвига в сплаве ВТ22 (1).

2. Границы раздела полосчатой структуры, имеющие высокий уровень напряжений, являются источником образования внутренних трещин в приповерхностном слое канала сплава ВТ3-1 при прохождении полос сдвига. Линейные размеры трещин возрастают вдоль канала при $n > 0.65$, что приводит к разрушению материала.

3. Количество и размеры мартенситных пластин в сплавах ВТ1 и ПТ-3В определяют особенности образования и распределения полос сдвига вдоль канала. В сплаве ПТ-3В с меньшей плотностью мартенситных пластин адиабатические полосы распределяются вдоль приповерхностного слоя в виде сетки с разветвлениями в глубь образца, особенно в зонах при $n = 0.7$ –0.8. Внутренние разрывы (трещины) наблюдаются только в зонах при $n = 0.3$ и 0.7, в то время как для сплава ВТ1 плотность полос сдвига в материале значительно меньше вдоль всей длины канала и источником их являются в основном вершины трещин. Распространение полос сдвига в материале происходит в плоскости фронта кумулятивной струи.

4. Для неотожженных сплавов с внутренним напряженным состоянием (ВТ22 (2), ВТ3-1) адиабатические полосы сдвига способствуют образованию в материале приповерхностного слоя канала магистральных трещин, что приводит к разрушению образцов.

Таким образом, можно сделать вывод, что в процессе воздействия кумулятивной струи на мишень из сплавов на основе титана (ВТ22 (1), ВТ22 (2), ВТ3-1) в приповерхностном слое канала происходит как упрочнение, так и динамический возврат свойств. При воздействии кумулятивной струи деформация локализуется в отдельных объемах материала вдоль канала и на границах их раздела, происходит пластический сдвиг с образованием адиабатических полос, ширина и протяженность которых свидетельствует о степени деформационного упрочнения. В зоне расширения канала наблюдается динамический возврат свойств из-за повышения температуры в условиях адиабатического сдвига.

Следует отметить, что глубина внедрения кумулятивной струи при образовании канала в мишенях из разных материалов существенно зависит от их структуры и физико-механических свойств в исходном состоянии, определяющих динамику изменения упрочнения припо-

верхностного слоя вдоль канала и глубину проникновения кумулятивной струи в мишень.

Ввиду ограниченного объема экспериментального материала полученные результаты являются предварительными и имеют качественный характер анализа приповерхностного слоя канала, а более детальное изучение фазово-структурных изменений в канале является предметом проведения дальнейших исследований.

Список литературы

- [1] *Rupert N.L., Grace F.I., Huang W.* et al. // *Int. J. Imp. Eng.* 2003. Vol. 29. P. 685–696.
- [2] *Шиняев А.Я.* Фазовые превращения и свойства сплавов при высоком давлении. М.: Наука, 1973. 243 с.
- [3] *Ковтун В.И., Мазанко В.Ф.* // *ЖТФ.* 1988. Т. 58. Вып. 4. С. 25–31.
- [4] *Kozachuk A.I., Kozhushko A.A., Romyantsev D.V.* et al. *Int. J. Imp. Eng.* 2003. Vol. 29. P. 285–390.
- [5] *Кожушко А.А., Пугачев Г.С., Рыкова И.И.* и др. // *Письма в ЖТФ.* 1992. Т. 18. Вып. 5. С. 12–16.
- [6] *Власов А.С., Емельянов Ю.А., Зильбербранд Е.Л.* и др. // *Письма в ЖТФ.* 1997. Т. 23. Вып. 3. С. 68–73.
- [7] *Walters W., Gooch W., Burkins M.* // *Combustion, Explosion and Shock Waves.* 2000. Vol. 36. N 6. P. 745–750.
- [8] *Walters W., Gooch W., Burkins M.* // *Int. J. Imp. Eng.* 2001. Vol. 26. P. 823–830.
- [9] *Крупин А.В., Соловьев В.Я., Шефтель Н.И.* и др. Деформация металлов взрывом. М.: Металлургия, 1975. 416 с.
- [10] *Бабкин А.В., Ладов С.В., Маринин В.М.* и др. // *Химическая физика.* 1999. Т. 18. № 10. С. 26–36.