

УДК 669.018.75

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ КОМПОЗИТА ПОСЛЕ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ

Л. М. Молчунова, О. В. Килина, С. Ф. Гнусов, С. Н. Кульков

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634021 Томск

Методами металлографии и рентгеноструктурного анализа исследованы на разных масштабных уровнях изменения структуры и фазового состава композита типа твердого сплава, подвергнутого динамическому удару. Динамическое воздействие на композит стальным ударником привело к перераспределению структурных составляющих с образованием отдельных областей с различным содержанием упрочнителя, формированию локальных участков с измененной по отношению к исходной структурой, а также появлению новых фаз.

Широкое использование гетерофазных материалов в условиях высокоскоростного нагружения (ковка, штамповка, удар и т. п.) требует детального изучения эволюции их структуры и фазового состава.

Целью настоящей работы является изучение изменения микроструктуры композита типа твердого сплава после его динамического разрушения. Композит имел следующий состав: 54 % (здесь и далее объемные доли) карбида вольфрама (WC) и высокомарганцовистая сталь 110Г13 (сталь Гадфильда). Связующая фаза находилась в метастабильном состоянии аустенита (γ -твердый раствор), которое формировалось закалкой от 1370 К в селитре [1].

Данная работа является логическим продолжением ранее начатых исследований [2], отражающих эволюцию структуры композита на разных масштабных уровнях (микро-, мезо- и макроуровнях) в поперечном сечении мишени, в исходном состоянии представляющей собой диск диаметром 60 мм и толщиной 4,5 мм, которая пробивалась стальным цилиндрическим ударником, летящим со скоростью 1200 м/с.

Образцами для исследований являлись фрагменты мишени после ее разрушения, из которых готовились как поперечные, так и продольные шлифы. Исследования продольных плоскостей мишени проводились послойно последовательной шлифовкой на толщину, равную 10 мкм, которая соответствовала четырем средним размерам исходного зерна WC ($d = 2,5$ мкм) [3]. Изучение структуры и фазового состава материала проводилось на оптическом микроскопе НЕОРНОТ-21 и рентгеновском дифрактометре ДРОН-УМ1 с фильтрованным медным излучением.

Металлографические исследования области, прилегающей к месту перехода пробойного отверстия к откольной воронке, выявили необычную структуру, которая состояла из нескольких чередующихся между собой участков (рис. 1).

Участок 1 представлял собой структуру, имеющую свободную от карбидного зерна связующую фазу (рис. 2,а). Лишь у самого края поверхности откола имелось незначительное количество зерен карбида вольфрама, средний размер которых был меньше, чем в исходном состоянии ($d = 1,9$ мкм), и составлял 11 % от общего состава композита. Рентгеноструктурный анализ поверхности откола позволил определить структуру этих карбидных выделений. Они имели кубическую ГЦК-кристаллическую решетку с параметром a , равным $4,965 \cdot 10^{-10}$ м. Отметим, что в исходном состоянии карбид с ГЦК-решеткой

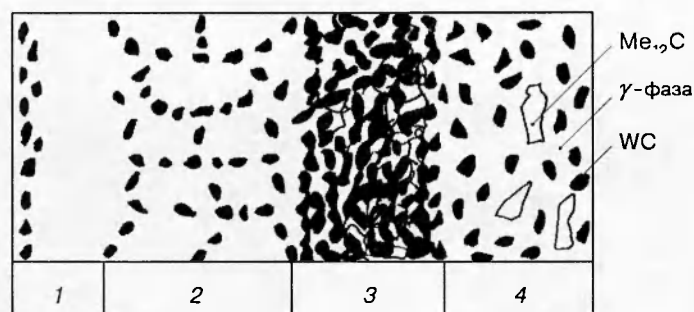


Рис. 1

отсутствовал. Участок 2 представлял собой отдельные образования связующей фазы, расположенные в ячейках «карбидной сетки» (рис. 2,б). При этом происходило существенное уменьшение среднего размера карбидного зерна по сравнению с исходным почти в два раза — до $d = 1,3$ мкм. Участок 3, в отличие от предыдущих участков, характеризовался большим содержанием упрочняющей фазы (рис. 2,в). Карбиды не имели четкой огранки и располагались настолько близко друг к другу, что, сливаясь, образовывали каркас. Гистограмма распределения карбидных зерен свидетельствовала об увеличении их размеров до 3,6 мкм. Связка располагалась между карбидами в виде отдельных включений, и содержание ее составляло лишь 20%. Структура участка 4 почти не отличалась от исходной. Единственное ее отличие состояло в том, что внутри связующей фазы можно было наблюдать светлые выделения, представляющие собой сложные карбиды типа $Me_{12}C$ (Fe_6W_6C), идентифицируемые посредством химического травления. Количество выделившегося карбида $Me_{12}C$ было существенно больше, чем в исходном материале (1%), и составляло 5%.

Анализ структуры по краю профиля откольной воронки свидетельствовал о существовании подобных неоднородностей в виде отдельных нетравящихся участков, фазовые составляющие которых распределены достаточно равномерно по всей их площади (рис. 3,а). Форма этих выделений была как вытянутой по профилю откольной воронки, так и близкой к равноосной.

Более удаленные от пробойного отверстия и откольной воронки объемы материала характеризовались наличием области перехода от основной структуры к зонам чашечной формы (в поперечном сечении образца) или тороидальной (в продольном сечении), в которых были обнаружены «мезотрещины», ориентированные особым образом [2, 4]. Динамическое нагружение не внесло значительных изменений в морфологию карбида вольфрама в данной переходной области, он сохранил свою первоначальную форму. Однако в связи зафиксирована мартенситная ϵ -фаза в довольно узких межкарбидных прослойках и в виде мелких включений в самой матрице (рис. 3,б). Кроме того, наблюдалось появление мартенситной α -фазы, металлография которой представлялась в виде темных участков различной формы, расположенных между карбидными частицами. Количество ее было невелико и составляло не более 5%.

Металлографические и рентгеноструктурные исследования тороидальных зон позволили так же, как и в переходной области, зафиксировать в матрице α - и ϵ -фазы. В этих зонах пластины ϵ -мартенсита более грубые, и на металлографическом снимке они представлены в виде игл, достигающих длины 100 мкм и ширины 1,5 мкм (рис. 3,в). Морфология и количество мартенситной α -фазы оставались здесь такими же, как и в переходной области.

Таким образом, появление в предоткольной области неоднородных структур в виде отдельных нетравящихся выделений белого цвета в районе откольной воронки, образо-

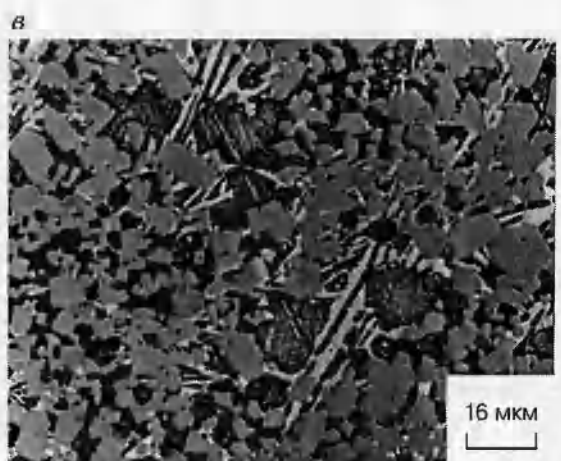
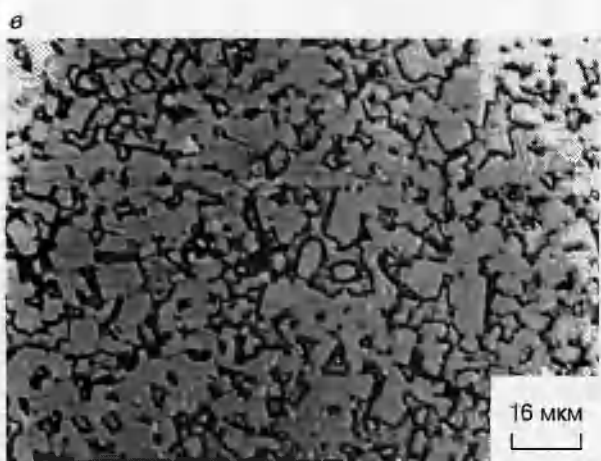
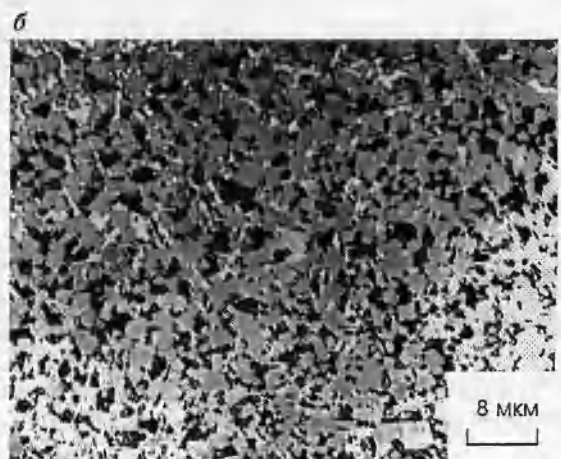
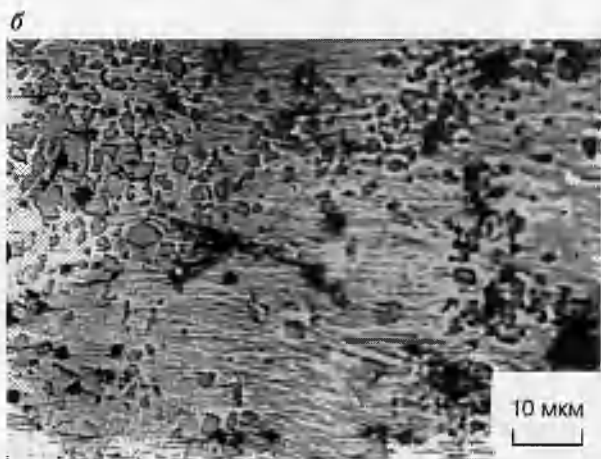
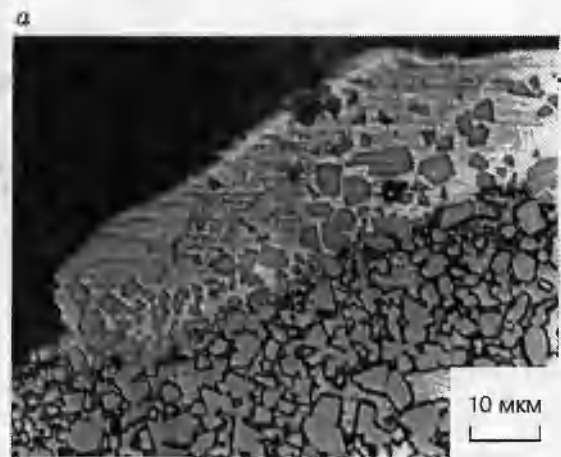
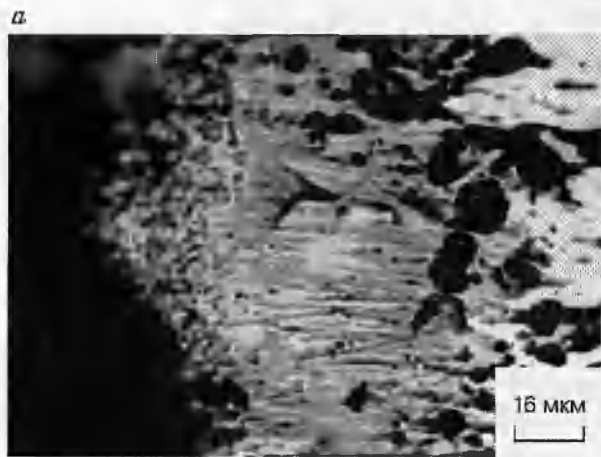


Рис. 2

Рис. 3

вание участков с упорядоченным перераспределением структурных составляющих и возникновение новых фаз свидетельствуют о значительных структурно-фазовых изменениях, происшедших в композите после воздействия на него стальным ударником. Регулярность перераспределения структурных составляющих композита выражается в появлении чередующихся участков с различной микротвердостью, что обусловлено наличием участков как свободных от карбидных зерен, так и с большим их содержанием. Кроме того, перегруппировка зерен упрочнителя приводит к возникновению особой карбидной структуры, напоминающей сетку, в ячейках которой располагается свободная от карбида связующая фаза. Наряду с этим происходит дробление карбидного зерна, приводящее к резкому (почти в два раза) уменьшению его размера. Образование отдельных нетравящихся выделений, по-видимому, связано с тем, что в процессе формирования откольной воронки образуется откольный импульс, который, претерпевая многократные отражения от тыльной поверхности, приводит к полному прекращению распространения пластической волны и в итоге к локализации деформации на отдельных участках.

Рентгеноструктурный анализ позволил выявить карбидную фазу, отличную от исходной и имеющую кубическую ГЦК-решетку. Вероятно, образование подобного карбида связано с формированием его неравновесного состояния во время удара. Действительно, установлено, что при ступенчатом нагреве он переходит в карбид вольфрама с ГПУ-решеткой, имеющей параметры $a = 2,9163 \cdot 10^{-10}$ м и $c = 2,8371 \cdot 10^{-10}$ м, что достаточно хорошо согласуется с литературными данными. При этом температура полного ГЦК \rightarrow ГПУ-превращения равна 720 К.

Изменение морфологии и дисперсности ϵ -мартенсита связано с условиями распространения и взаимодействия волн сжатия и растяжения. При отражении упругопластических волн от тыльной поверхности мишени появляются волны разрежения, взаимодействующие с первичной волной. В области этих взаимодействий (области откольной воронки) материал мишени испытывает сложные пространственно-временные нагрузки, что и создает условия для образования мелкодисперсного ϵ -мартенсита.

Таким образом, в работе показано, что при динамическом разрушении композита наблюдаются кардинальные изменения, связанные со структурой и фазовым составом материала на макро-, мезо- и микромасштабных уровнях. Эти изменения распределены в материале неоднородно вследствие неоднородности внутренних напряжений. В подобных материалах одновременное вовлечение всех структурных уровней в процесс динамического деформирования, по-видимому, позволит повысить стойкость материала к ударному разрушению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гнюсов С. Ф., Кульков С. Н. Фазовые превращения в стали Г13 при добавлении карбида вольфрама // Изв. вузов. Чер. металлургия. 1990. № 8. С. 61–63.
2. Гнюсов С. Ф., Молчунова Л. М., Кульков С. Н. Иерархия формирующихся структур при динамическом нагружении композиционного материала // ПМТФ. 1996. Т. 37, № 3. С. 109–114.
3. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1970.
4. Кульков С. Н., Гнюсов С. Ф. Ударно-волновое разрушение композитов со структурно-неустойчивой связкой // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 4. С. 43–47.