

МЕЗОМЕХАНИКА ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

*ГУ " НИИ импульсных процессов" БГНПК ПМ НАН Беларуси
Минск, Беларусь*

Введение

В процессе выполнения исследований по динамическому нагружению и высокоскоростному соударению частиц порошка с металлическими преградами установлено, что наряду с кратерообразованием происходит объемная перестройка структуры, изменение химического и фазового состава обрабатываемого материала.

Структурные изменения в металлической преграде (образце) происходят за счет ударно-волнового нагружения и проникания сравнительно небольшой доли (~ 1-1,5%) микрочастиц, ускоренных энергией взрыва. В результате на материал образца оказывают действие два фактора: ударная волна и поток ускоренных частиц. В работе сделана оценка влияния каждого из этих факторов на структурные изменения обрабатываемых материалов. Целесообразность такой оценки обусловлена следующими соображениями. По-видимому, опережающее воздействие ударных волн создает в материале преграды необходимые условия для проникания частиц. Поэтому логично сначала исследовать микроструктурные изменения, вызванные ударно-волновым нагружением, так как действие ударных волн распространяется на весь объем образца, а затем проникающих частиц, которые изменяют структуру только на пути, по которому движутся, и в прилегающих зонах. Исследование структурных изменений, вызванных действием ударных волн, позволяет выполнить оценки термодинамических параметров нагружения. Так, изменение фаз в структуре материала за счет высокого давления (при известном значении критического давления фазового перехода) даст величину давления в ударной волне. По остаточной температуре, которую можно определить из исследования микроструктуры, и по ударной адиабате можно установить давление и температуру Гюгонио в ударной волне[1].

Исследование влияния ударно-волнового нагружения на процессы деформации и изменения микроструктуры образцов проводили на основе физической мезомеханики. Согласно теории мезомеханики нагружаемое твердое тело можно рассматривать как многоуровневую самоорганизующуюся систему, где пластическая деформация развивается на микро-, мезо- и макромасштабных уровнях как последовательная потеря сдвиговой устойчивости [2]. Носителями пластического течения на мезоуровне являются трехмерные структурные эле-

менты: зерна, конгломераты зерен, субзерна, ячейки дислокационной структуры, деформационные домены, частицы второй фазы, поры, движение которых характеризуется схемой "сдвиг - поворот", что хорошо проявляется при динамической обработке материалов.

Материалы и методика исследований

В качестве модельных материалов металлических преград были выбраны сталь 10 и сталь 40. Выбор материалов обусловлен тем, что конструкционные стали имеют много общего и различаются содержанием перлита и феррита. Поэтому такой выбор преследовал цель выявить по изменениям микроструктуры степень деформации и фазовых превращений, вызванных ударно-волновым нагружением и прониканием частиц в стальную преграду. Образцы имели длину 100 мм и поперечное сечение диаметром 20 мм. Динамическую обработку осуществляли по схеме [3] при следующих стандартных параметрах: средняя скорость частиц – 800 м/с, время воздействия \approx 40 мкс. В качестве материала микрочастиц использовали порошок SiC + Ni (30%) фракции 63 - 70 мкм. Выбор фракции порошка обусловлен результатами исследований по оценке влияния фракционного состава микрочастиц на их проникание и изменение структуры обрабатываемого материала. Было установлено, что при одинаковых параметрах обработки максимальная глубина проникания и объем зоны измененной микроструктуры в конструкционной стали наблюдается при использовании порошка SiC+Ni фракции 63-70 мкм.

Исследование параметров структуры обработанных материалов проводили методами металлографического (микроскоп "Polivar"), микрорентгеноспектрального анализом (анализатор фирмы "Links"), сканирующей (СЭМ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) (микроскопы "Comscan" и ЭМ-125 соответственно).

Влияние ударных волн на механизм деформации сталей

Действие ударной волны и соударение высокоскоростного сгустка микрочастиц с металлическими преградами приводит к целому ряду изменений в структуре обрабатываемого материала, наблюдаемых на макро, -мезо,- и микроуровнях.

К наблюдаемым макроизменениям относятся:

- формирование на поверхности преграды макрократеров;
- осадка заготовок;
- образование микротрещин.

На мезомасштабном уровне наблюдается:

- деформация зерен, двойникование;
- изменение структуры на глубине до 80 мм, вызванного прониканием частиц, ускоренных энергией взрыва;

Для микроуровня характерно:

- изменение дислокационной структуры;
- протекание фазовых превращений.

Все приведенные выше уровни структурообразования наблюдаются при динамической обработке материалов. Рассмотрим некоторые из них более подробно.

Изменения макроструктуры

Характерной особенностью изменения структуры на макроуровне при динамическом нагружении потоком частиц порошка, ускоренным взрывом, является образование макрократеров на поверхности образца. Для преград из конструкционной стали такие кратеры относительно невелики. В выбранном диапазоне режимов воздействия объем кратера в стали 40, $V=0,98 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$. В этом случае энергия кратерообразования, рассчитанная на основании экспериментальных результатов (для удельной энергии кратерообразования равной $E=2,6 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/м}^3$), составляет $E=2548 \text{ Дж}$.

Исследование структуры образцов на разных расстояниях от поверхности нагружения показало, что воздействие потока частиц характеризуется значительной неоднородностью в зависимости от глубины проникания частиц. Наибольшая плотность дефектов, вызванных прониканием частиц, как правило, наблюдается в центральной части преграды (диаметр 10 мм). Вблизи зон проникания частиц присутствуют участки локализованной деформации (рис. 1).

Структурная неоднородность является причиной изменения и механических свойств по высоте образца. В таблице 1 приведены результаты измерения твердости по методу Бринелля (диаметр стального шарика 5 мм, нагрузка 250 кгс, время нагружения 15 с ...) для образца из стали 40 и стали 10.

Таблица 1-Твердость образцов из стали 40 и стали 10

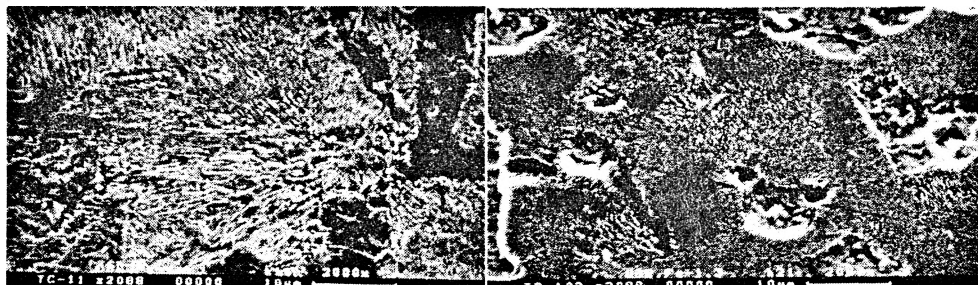
Глубина обработки, мм	Твердость НВ (центр образца,)	Твердость НВ (расстояние от центра образца 10-15 мм)
сталь 40		
исходный образец	175	175
5	200	185
20	185	180
40	185	175
60	185	175
80	185	175
сталь 10		
исходный образец	121	120
5	163	160
20	145	138
40	145	138
60	145	138

Существенное повышение твердости поверхностного слоя глубиной до 5 мм, можно объяснить пластической деформацией и увеличением плотности

дислокаций, почти вдвое. Твердость образцов после динамического нагружения складывается из исходной твердости феррито-цементитной смеси и прираще- ния твердости за счет объема металла с искаженной решеткой, которая пропор- циональна суммарной площади поверхности раздела фаз. Таким образом, реги- стрируемое повышение твердости обработанного материала можно считать ре- зультатом увеличения поверхности раздела фаз за счет металлографически за- регистрированных:

- дробления зерен;
- измельчения феррито-цементитной смеси;
- формирования новых поверхностей раздела вблизи проникших частиц.

В стали 10 наблюдается более существенное повышение твердости, чем в стали 40. Это связано с тем, что в конструкционных сталях с феррито- перлитной структурой при приложении нагрузки деформация начинает разви- ваться в феррите, а перлитные колонии являются "барьерами" для такой де- формации. В стали 10 количество перлитной составляющей меньше, чем в ста- ли 40.



а)

б)

Рис. 1. Микроструктура образцов из стали 40

а) исходный образец;

б) после динамического нагружения

высокоскоростным потоком микрочастиц SiC, x2000

Мезомасштабный уровень изменения структуры

Обработка высокоскоростным потоком частиц приводит к изменению микроструктуры исходных материалов и формированию локальных микрокри- сталлических и аморфных зон в объеме металлического образца. В результате проникания частиц происходит микролегирование материала с образованием зон сложного состава, диаметром 5-10 мкм и длиной до нескольких десятков миллиметров. В этих зонах микрорентгеноспектральным анализом, зарегист- рировано наличие частиц SiC, окруженных областями, с химическим соста- вом вводимого и основного материала. В зонах количество вещества микро- частиц составляет 25 - 30%, остальное – обрабатываемый материал.

Варьирование режимами обработки позволяет достигать плотности обра- зовавшихся зон до 1500 шт/мм². В результате проникания частиц порошка SiC в стальной образец происходит деформация микроструктуры образца, изменяю-

щаяся по глубине проникания. Степень деформации, определенная по изменению формы зерен, достигает 40% [1]. Степень деформации зависит от твердости материала: чем ниже твердость материала, тем более значительна степень деформации.

Установлено, что в идентичных условиях динамического нагружения структурные и механические характеристики более существенно изменяются в стали 10, чем в стали 40 (таблица 1,2).

Изменения структуры, наблюдаемые на микроуровне

Согласно теории мезомеханики пластическая деформация нагружаемого твердого тела связана с потерей его сдвиговой устойчивости и протекает как многоуровневый релаксационный процесс.

В начале пластической деформации потеря сдвиговой устойчивости в материале происходит на микроуровне в локальных зонах кристаллической решетки. В первую очередь такое структурное изменение наблюдается в зарождении и движении дислокаций, которые формируют субструктуру в рамках исходной структуры образца и вносят дополнительный вклад во внутреннюю энергию системы за счет выделения энергии дислокаций.

Методом рентгенофазового анализа установлено, что в рассматриваемых условиях обработки плотность дислокаций, генерируемых ударно-волновым нагружением имеет значение, в стали 40 $\rho = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, в стали 10 $\rho = 2,4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ (таблица 2).

Изменение свободной энергии системы, рассчитанное по методике [4] в зависимости от числа дислокаций и скорости их перемещения, составляет: для образцов из стали 40 $-E = 2,4 \cdot 10^5 \text{ Дж/м}^3$, для образцов из стали 10 $-E = 2,8 \cdot 10^5 \text{ Дж/м}^3$.

Исследование микроструктуры показывает, что при достигнутом значении плотности дислокаций теряется сдвиговая устойчивость в локальных зонах образца (рис.3). На этом уровне при ударно-волновой деформации образцов сталей 10 и 40 зарегистрировано возникновение новых типов дефектов: микрополос и микродвойников (рис. 3в,г).

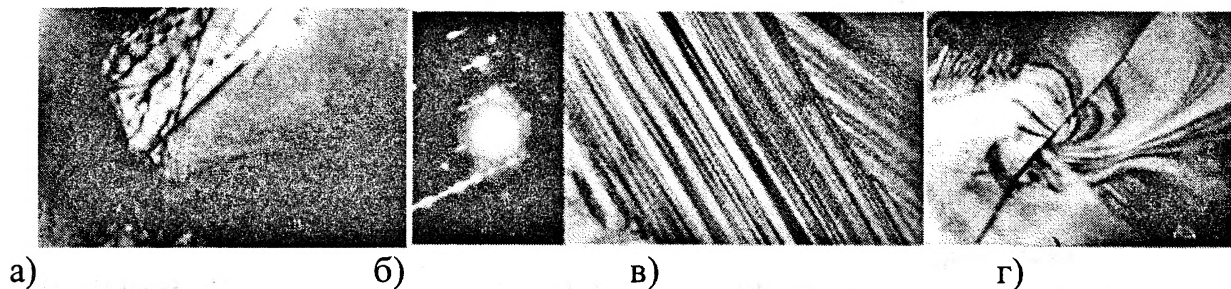


Рис. 3. Результаты исследования микроструктуры стали 40 на ПЭМ, х60000, а) формирование дислокационного ансамбля на границе зерна; б) электронограмма; в) микродвойники в теле зерна, х100000; г) сдвиговая деформация фрагментов субструктуры.

Можно предположить, что эти типы дефектов зарождаются на концентраторах напряжений мезоуровня и распространяются на большие расстояния через структурные элементы, независимо от их кристаллографической ориентации. Это дает возможность перемещения в деформируемом твердом теле объемных элементов типа: субзерен, зерен, их конгломератов (рис.3г). Формирование такой дислокационной структуры обеспечивает переход на уровень макродеформации.

Под действием ударной волны в материале локализуются области высокого давления, в которых реализуются динамические фазовые переходы, обнаруженные при выполнении совместных работ с Институтом физики металлов УРО РАН. При исследовании образцов из конструкционной стали и железоникелевых сплавов были зарегистрированы α - ϵ - α и α - γ превращения. Объем материала, претерпевший фазовое превращение, составляет 5 - 6% от объема обрабатываемого образца. Методом электронной микроскопии зарегистрировано образование плотной двойниковоподобной слоистой структуры, которая рассматривается как признак фазового перехода (рис.3в). Заметное изменение микроструктуры в сталях происходит в том случае, если ударное давление превышает давление перехода.

После разгрузки ϵ -фаза не сохраняется, однако металлографическим и рентгеноструктурным анализами зарегистрированы следы произошедшей перестройки структуры. Рентгеноструктурным анализом было установлено уменьшение параметров решетки стали 10 и стали 40 (таблица 2).

Таблица 2

Результаты рентгеноструктурного анализа образцов из ст. 40 и ст. 10

Образец	a, Å	$\rho \times 10^{11}$, см ⁻²
Сталь 40 исходный образец	2,867395	0,15
Сталь 40 обработанный образец	2,866601	2,10
Сталь 10 исходный образец	2,866111	0,30
Сталь 10 обработанный образец	2,865310	2,40

На глубине 3-5 мм от поверхности соударения микрочастиц SiC с образцами из стали, зарегистрировано повышение дисперсности ферритоцементитной смеси. В результате ударно-волнового нагружения, происходит измельчение структуры матричного материала. Перлит преобразуется в структуру типа троосто-сорбит.

В условиях реализации динамического фазового перехода в металлах формируется субструктура с различной степенью деформации. В объеме материала, окружающем остатки проникших микрочастиц, наблюдаются существенные пластические сдвиги и повороты, свойственные сильно деформированному состоянию.

Значение деформации для объема, претерпевшего фазовое превращение, для стали 40 составляет $3,0 \cdot 10^{16}$, для стали 10 - $3,4 \cdot 10^{16}$

$$\varepsilon = 5\sigma_a (\Delta V/V) 6\sigma_T \quad \text{для полуцикла,} \quad (1)$$

где ε - деформация при превращении;

σ_a - приложенное напряжение при протекании фазового превращения;

$(\Delta V/V)$ – относительное изменение объема;

σ_T – предел текучести.

Анализ результатов исследований позволяет сделать вывод о том, что при динамическом нагружении потоком ускоренных микрочастиц их проникание происходит преимущественно в зонах протекания динамического фазового перехода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович В. И. [и др.] Структурные изменения в железоникелевых сплавах, вызванные действием высокоскоростного потока порошковых частиц ФММ. - 2001. - Т. 91, № 6. - 72 -79 с. 2. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов: в двух томах/ Под ред. Панина В.Е.- Новосибирск: Наука, 1996. -Т.1.- 297с. - Т.2. - 320с. 3. Динамическая перестройка структуры материалов: Коллективная монография под ред. С.М.Ушеренко. – Мн.: НИИ ИП с ОП, 2000. – 186 с. 4. Бокштейн Б.С., Копецкий Ч.В., Швиндлерман Л.С. Термодинамика и кинетика границ зерен в металлах. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.

УДК 621.793.7

Соколов И.О., Спиридонов Н.В., Володько А.С.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРЕССОВЫХ ВАЛОВ БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНЫХ МАШИН

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В данной работе были проведены исследования физико-механических свойств наносимых газотермических покрытий из четырех композиций: ПГ-С27, ПТ-Ю10Н, ПТ-19Н-01, ПТ-19М-01 в разном объемном составе в зависи-