

ОСОБЕННОСТИ УПРОЧНЕНИЯ СТАЛИ Ст. 3 ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

А. А. Букаемский, В. И. Кирко, Д. Е. Талабуев

Научно-исследовательский физико-технический институт КрГУ, 660036 Красноярск

Разработан метод исследования прочностных свойств многофазных сред, основанный на построении гистограмм микротвердости. Показано, что для стали Ст. 3 в зависимости от типа применяемого взрывчатого вещества гистограммы микротвердости исследуемых образцов бывают двух типов: с одним и двумя максимумами. По данной методике для Ст. 3 определен вклад областей с преобладанием ферритных и перлитных зерен и зон множественного искажения в упрочнение материала. Исследовано поведение этих областей при отжиге, различных импульсных воздействиях и длительном хранении. Показано, что при ударно-волновом воздействии области с преобладанием перлитных и ферритных зерен упрочняются синхронно.

Научные и прикладные аспекты упрочнения металлов с использованием энергии взрыва в настоящее время изучены достаточно полно [1, 2]. Наиболее подробно исследовано влияние импульсного воздействия на изменение прочностных характеристик материалов, например на микротвердость. Однако большинство авторов оперирует осредненными значениями, что приводит к снижению информативности исследований многофазных сред.

В данной работе предложен метод исследования прочностных характеристик многофазных сред. На примере стали Ст. 3 исследуется влияние ударно-волнового нагружения на изменение прочностных характеристик материала и вклад в них структурных составляющих (феррита и перлита).

ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СХЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследовалась сталь марки Ст. 3. Образцы размеров $65 \times 80 \times 10$ мм вырезали из прокатного листа толщиной 10 мм.

Образцы нагружали двумя типами взрывчатых веществ (ВВ): аммонитом 6ЖВ и гексопластом ГП-87к. Использовались классические схемы упрочнения металлов: в режиме скользящей детонации от контактного заряда ВВ и ударными волнами от соударения с метаемой пластиной [3]. В качестве метаемых пластин использовалось обычное стекло и пеностекло плотностью $0,22 \text{ г/см}^3$. Толщина стеклянной пластины 1,3 мм, толщину пеностекла подбирали из условия равенства масс метаемых пластин.

В работе обсуждаются результаты четырех экспериментов (Э1–Э4), проведенных при различных начальных условиях. В первых трех экспериментах нагружение осуществлялось аммонитом 6ЖВ с начальной плотностью $1,1 \text{ г/см}^3$. Толщина слоя ВВ 15 мм. В первом эксперименте на исследуемый образец металась пластина из пеностекла, во втором — из стекла. Величина зазора между метаемой пластиной и образцом 2,5 мм. В третьем и четвертом экспериментах применялась схема упрочнения в режиме скользящей детонации с использованием в качестве контактного заряда ВВ аммонита 6ЖВ (Э3) и ГП-87к (Э4). Толщина заряда составляла 20 и 8 мм для аммонита и гексопласта соответственно.

Из исследуемых образцов изготавливали поперечные шлифы. Плоскость разреза полировали и протравливали 4 %-м раствором азотной кислоты. Микротвердость H_V измеряли по стандартной методике вдавливанием в поверхность образца алмазной пирамиды Виккерса [4] при нагрузке 0,1 кг. Образцы исследовали непосредственно после ударно-волнового воздействия и после хранения в течение одного года в нормальных условиях. Основные измерения проводили на глубине 7 мм от нагружаемой поверхности.

Для каждого образца строили зависимость микротвердости от количества отпечатков n , попадающих в определенный интервал значений H_V . Полученные гистограммы обрабатывали методом скользящего среднего. Было показано, что для корректного определения среднего значения $\langle H_V \rangle$ и определения вклада раз-

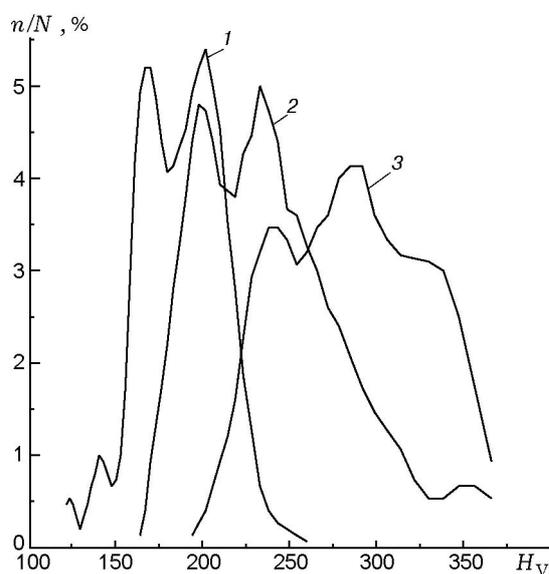


Рис. 1. Гистограммы микротвердости образцов:

1 — исходный образец; 2 — Э4, $h = 7$ мм; 3 — Э4, $h = 1$ мм

личных фаз в упрочнение материала необходимо не менее 100 измерений микротвердости.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гистограммы H_V можно условно разделить на два типа: с одним выраженным максимумом и с двумя (рис. 1, 2, N — количество измерений).

Гистограммы с двумя максимумами характерны для исходного материала и для образца, упрочненного гексопластом ГП-87к (см. рис. 1). Характер гистограммы микротвердости позволяет утверждать, что в исходном образце существуют области с преобладанием ферритных или перлитных зерен. Это и определяет наличие двух максимумов. Следует отметить, что величины микротвердости, соответствующие левому и правому максимуму, не определяют значений H_V для феррита и перлита соответственно. Значение микротвердости феррита, по-видимому, находится левее, а перлита — правее значений соответствующих максимумов.

Для образца, упрочненного гексопластом ГП-87к, наблюдается уширение правого крыла гистограммы в область высоких значений H_V . Это связано с тем, что при использовании в качестве ВВ гексопласта реализуемый уро-

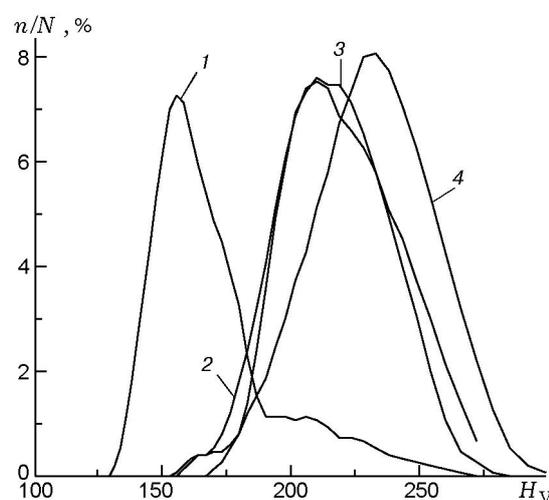


Рис. 2. Гистограммы микротвердости образцов:

1 — исходный образец после отжига; 2 — Э3; 3 — Э1; 4 — Э2

вень давления во фронте ударной волны достаточен для протекания в железе фазового перехода, приводящего к множественному искажению структуры [1].

Таким образом, для эксперимента Э4 применяемый способ исследования микротвердости позволяет условно разделить полученные гистограммы на три области, из них две соответствуют областям с преобладанием ферритных и перлитных зерен, третья — зонам множественного искажения структуры. Соотношение площадей этих областей определяет вклад отдельных структурных составляющих в измеряемую микротвердость образца.

Полученные гистограммы обрабатывались статистическими методами [5]. Было показано, что для гистограмм с одним максимумом характер распределения микротвердости логарифмически-нормальный. Для описания гистограмм с двумя максимумами строились усеченные логарифмически-нормальные распределения независимо для каждого максимума по методике, приведенной в [5]. Значения параметров распределения $H_{V0,5}$ и σ для всех экспериментов приведены в таблице.

В экспериментах с использованием гексопласта в областях с преобладанием ферритных и перлитных зерен на глубине 7 мм происходит упрочнение материала на $17 \div 18\%$. Увеличение средних значений микротвердости $\langle H_V \rangle$ на 27% по сравнению с исходным материалом происходит за счет областей с мно-

Образец	$\langle H_V \rangle$	Область	$H_{V_{0,5}}$	σ	H_V/H_V^{nc}
Исходный	182,6	Феррит	168,5	1,074	1,00
		Перлит	207,7	1,073	1,00
Э4 (0,5 мм)	309,7	Феррит	259,0	1,081	1,54
		Перлит	311,6	1,083	1,50
Э4 (7 мм)	231,7	Феррит	197,7	1,075	1,17
		Перлит	244,4	1,087	1,18
Э1 (7 мм)	217,1	—//—	216,4	1,112	1,18
Э2 (7 мм)	228,5	—//—	227,8	1,110	1,18
Э3 (7 мм)	211,3	—//—	213,3	1,108	1,18
Отжиг	165,5	—//—	160,7	1,087	1,18

жественным искажением структуры. На глубине $h = 0,5$ мм наблюдается упрочнение ферритных и перлитных зерен на 54 %, а среднее упрочнение достигает 70 %.

Следует отметить, что области с преобладанием ферритных и перлитных зерен упрочняются синхронно в 1,52 и 1,17 раза для $h = 0,5$ и 7 мм соответственно. Дисперсии для этих областей близки ($\sigma = 1,080 \pm 0,007$).

Гистограммы микротвердости с одним максимумом характерны для образцов, упрочненных в экспериментах Э1–Э3, где в качестве ВВ использовался аммонит 6ЖВ (см. рис. 2). В данных экспериментах упрочнение материала незначительное — на $15 \div 25$ %. Дисперсии распределений микротвердости близки ($1,108 \div 1,112$) и больше определенных ранее для отдельных областей.

Различие типов гистограмм в зависимости от применяемого ВВ, по-видимому, связано с продолжительностью ударно-волнового воздействия на исследуемый материал. Применение аммонита 6ЖВ характеризуется длительным импульсным воздействием. Использование пеностекла и стекла в качестве метаемой пластины также способствует возрастанию времени ударного и теплового воздействия на исходный образец, тем более что пеностекло в ударной волне сжимается до плотности, близкой к монолитной, и прогревается до высоких температур.

Ударно-волновое нагружение и значительные пластические деформации уменьшают размеры зерен и перераспределяют углерод в материале. Выход углерода из перлита в феррит и на межзеренные границы сопровождается

увеличением их прочностных характеристик. С другой стороны, при понижении содержания углерода в перлитных зернах их микротвердость уменьшается. Эти эффекты (упрочнение феррита, разупрочнение перлита, дробление зерен) приводят к слиянию двух максимумов, характерных для исходного материала, в один. Косвенно это подтверждается возрастанием дисперсии распределения H_V по сравнению со значениями σ для отдельных фазовых областей (см. таблицу).

В работе [6] исследовался процесс импульсного термопластического упрочнения различных сталей, который по реализуемым параметрам близок к упрочнению аммонитом. Совместное использование электронной микроскопии и изотопного метода (C^{14}) позволило установить, что реализуемая сдвиговая деформация вызывает дробление зерен перлита и инициирует частичный распад цементита. Вследствие этого происходит «вытягивание» углерода из решетки цементита и перенос атомов С в дефекты кристаллического строения феррита: скопления дислокаций, полосы скольжения, границы зерен. Упрочнение стали происходит за счет повышения (сверх равновесной) концентрации углерода в феррите.

Кратковременное импульсное воздействие (ВВ–ГП-87к) не приводит к перераспределению углерода внутри материала. При этом происходят упрочнение каждой фазы и образование зон множественного искажения структуры.

На рис. 1, 2 приведены гистограммы микротвердости исходного образца после отжига при температуре $T = 900$ °С в течение 2 ч и по-

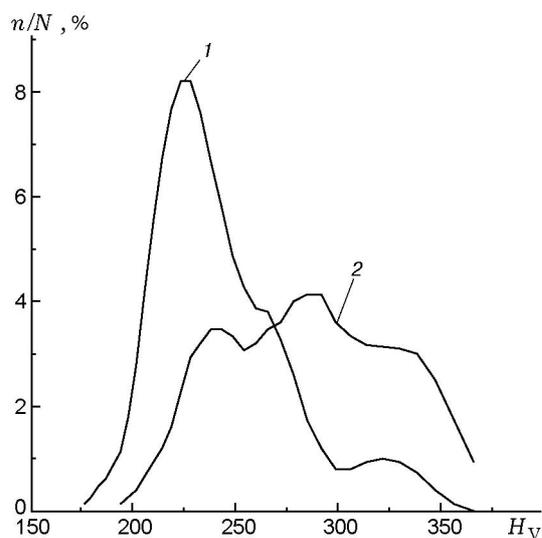


Рис. 3. Гистограммы микротвердости образца Э4:

1 — после хранения; 2 — непосредственно после нагружения

следующего медленного остывания в закрытой печи. Видно, что отжиг приводит к уменьшению $\langle H_V \rangle$ по сравнению с исходным образцом. Из-за наличия уширенного в область высоких значений H_V правого крыла гистограммы диапазон значений микротвердости не изменяется.

Данное температурное воздействие относится к отжигу второго рода и сопровождается полной перекристаллизацией материала и значительным измельчением зерна [7]. Отжиг при $T = 900$ °С переводит материал в γ -фазу. При медленном охлаждении сначала образуются зерна феррита, в котором растворимость углерода очень мала. При $T \approx 700$ °С появляются мелкие зерна крупнопластинчатого перлита, который мягче, чем мелкопластинчатый перлит исходной стали.

Известно, что материалы, подвергшиеся упрочнению, со временем частично теряют приобретенные прочностные свойства [2]. После хранения в течение одного года образца, упрочненного гексопластом, наблюдалось значительное уменьшение микротвердости материала. Например, на глубине 1 мм значение $\langle H_V \rangle$ становится сравнимым со значениями микротвердости для $h = 7$ мм, измеренной непосредственно после проведения эксперимента.

Для упрочненного образца четко различается вклад в значение $\langle H_V \rangle$ областей с преобладанием ферритных и перлитных зерен и зоны множественного искажения структуры (рис. 3). На гистограмме H_V для образца после хранения наблюдается заметное уменьшение интенсивности области множественного искажения структуры, область с преобладанием перлитных зерен выражена слабо. По-видимому, в процессе длительного хранения количество дефектов кристаллической решетки в материале уменьшается за счет выхода их на субграницы зерен и частичной аннигиляции [7]. Это характерно для феррита, ферритной составляющей перлита и, по-видимому, для зон множественного искажения структуры.

ВЫВОДЫ

- Предложен метод исследования прочностных характеристик многофазных сред, основанный на построении гистограмм микротвердости. Показано, что по гистограммам для каждой фазы можно оценить ее вклад в микротвердость и способность упрочняться при различных воздействиях.

- На примере стали Ст. 3 определен вклад в прочностные характеристики областей с преобладанием ферритных и перлитных зерен и зон множественного искажения.

- Исследовано поведение областей с преобладанием ферритных и перлитных зерен и зон множественного искажения структуры при отжиге, различных импульсных воздействиях и длительном хранении.

Авторы благодарны Т. С. Тесленко за ее внимание к данной работе, полезные советы и замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дерибас А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1980.
2. Бекренев А. Н., Эпштейн Г. Н. Последеформационные процессы высокоскоростного нагружения. М.: Металлургия, 1992.
3. Деформация металлов взрывом / А. В. Крупин, В. И. Соловьев и др. М.: Металлургия, 1975.
4. Геллер Ю. А., Рахштадт А. Г. Материаловедение. М.: Металлургия, 1984.

5. **Коузов П. А.** Основы анализа дисперсионного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Л.: Химия, 1974.
6. **Максимишин М. Д., Бабей Ю. И., Зима Ю. В.** Импульсное термопластическое упрочнение стальных деталей // Научно-технический прогресс в машиностроении. Вып. 17. Проблемы прочности в машиностроении. М.: МЦНТИ, 1989. С. 26–40.
7. **Лахтин Ю. М.** Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallorv. M.: Metallurgiya, 1976.

Поступила в редакцию 13/X 2000 г.
