

05; 10; 12

© 1993

ОБЪЕМНЫЙ ХАРАКТЕР УПРОЧНЕНИЯ МАРТЕНСИТА
ПОД ДЕЙСТВИЕМ МЕГАВОЛЬТНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО
ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

А.М. Ефремов, Ю.В. Иванов,
В.И. Итин, Б.М. Ковальчук,
И.С. Кашинская, С.В. Лыков,
А.Б. Марков, Д.И. Проскуровский,
В.П. Ротштейн

В работах [1, 2] установлено, что при облучении предварительно закаленной стали 45 низкоэнергетичным микросекундным сильноточным электронным пучком (СЭП) с плотностью мощности $q \approx 5 \cdot 10^6$ Вт/см² формируется упрочненная зона толщиной до 300 мкм с двумя характерными максимумами, микротвердость в которых достигает значений $H_{\mu} \approx 1600$ кг/мм². Показано, что эта зона образуется в результате воздействия на мартенсит биполярной волны напряжений с амплитудой до 2 ГПа, возбуждаемой вследствие эффекта термоупругости. Под действием такой волны формируется сильно фрагментированная структура с высоким уровнем дефектности. Представляет интерес поведение мартенсита при воздействии более мощных ударных волн (УВ), инициируемых СЭП. Распространение таких волн приводит к интенсивным деформационным процессам, включая откольное разрушение тыльной стороны образца [3, 4].

В настоящей работе исследовали характер упрочнения, а также фазовые и структурные превращения в мартенсите стали 45 при воздействии мощных УВ, возбуждаемых мегавольтным СЭП с плотностью мощности до 10^{11} Вт/см².

Облучение проводили на сильноточном ускорителе электронов в режиме: ток пучка ≈ 65 кА, максимальная энергия электронов ≈ 1.5 МэВ, длительность импульса $\tau \approx 50$ нс. Исследуемые образцы диаметром 20 мм и толщиной 5–10 мм облучались приосевой частью пучка диаметром 12 мм. После облучения образцы исследовали с помощью оптической металлографии, просвечивающей электронной микроскопии и измерений микротвердости. Тепловой режим мишени находили из численного решения уравнения теплопроводности.

Тепловые расчеты (рис. 1) и эксперименты показали, что при $q \approx 5 \cdot 10^9$ Вт/см² плавится поверхностный слой толщиной ≈ 25 мкм. Время существования расплава ≈ 50 мкс, средняя скорость его охлаждения в процессе кристаллизации составляет $\approx 10^6$ К/с, а средняя скорость фронта кристаллизации ≈ 0.5 м/с. В результате быстрой закалки из расплава формируется белый нетравящийся слой,

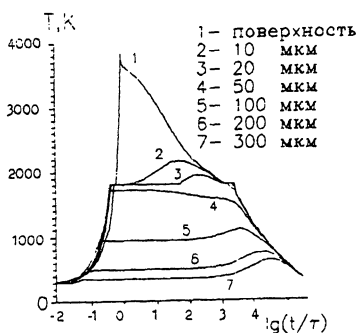


Рис. 1. Зависимость температуры от времени на различных расстояниях от поверхности образца из железа при $q \approx 5 \cdot 10^9$ Вт/см².

аналогичный белым слоям, образующимся при воздействии на стали интенсивных импульсных электронных пучков длительностью $\approx 10^{-5}$ с [5]. Общая толщина зоны теплового влияния не превышает 150 мкм. Амплитуда ударной волны, оцененная из соотношения $P = \Gamma E$ (Γ - параметр Грюнайзена, E - плотность поглощенной энергии), составляет ≈ 5 ГПа, что примерно в два раза выше, чем в работах [1, 2].

Измерения микротвердости показали, что в результате облучения в данном режиме, как и при воздействии низкоэнергетичного СЭП [1], формируется упрочненная зона толщиной 0,3-0,4 мм с двумя максимумами микротвердости (рис. 2, а). Степень упрочнения в первом максимуме заметно ниже, чем во втором из-за процессов отпуска.

При плотности мощности пучка $\approx 5 \cdot 10^{10}$ Вт/см² происходит объемный взрыв, приводящий к испарению поверхностного слоя толщиной ≈ 200 мкм. Толщина расплавленного слоя, расположенного на дне образовавшегося в результате испарения кратера, составляет ≈ 20 мкм. Амплитуда ударной волны составляет в этом режиме облучения ≈ 50 ГПа. Установлено, что в результате воздействия УВ периодически упрочненная структура формируется, в отличие от предыдущего режима облучения, по всей толщине образца, включая его тыльную сторону (рис. 2, б). При этом заметного снижения микротвердости в первом максимуме кривой $H_m(x)$ не происходит, несмотря на наличие в этом слое высоких температур. Это свидетельствует о том, что суммарное воздействие высоких температур и давлений приводит в конечном счете к формированию термически устойчивой высокопрочной структуры.

В первом слое с повышенной микротвердостью (рис. 2, б), как показали электронно-микроскопические исследования, структура стали представляет собой пакетный мартенсит (рис. 3, а) с размером кристаллов $d \approx 60$ нм ($d_{\text{исх}} \approx 60$ нм). Внутри этих кристаллов наблюдаются плотные дислокационные сетки, в которых

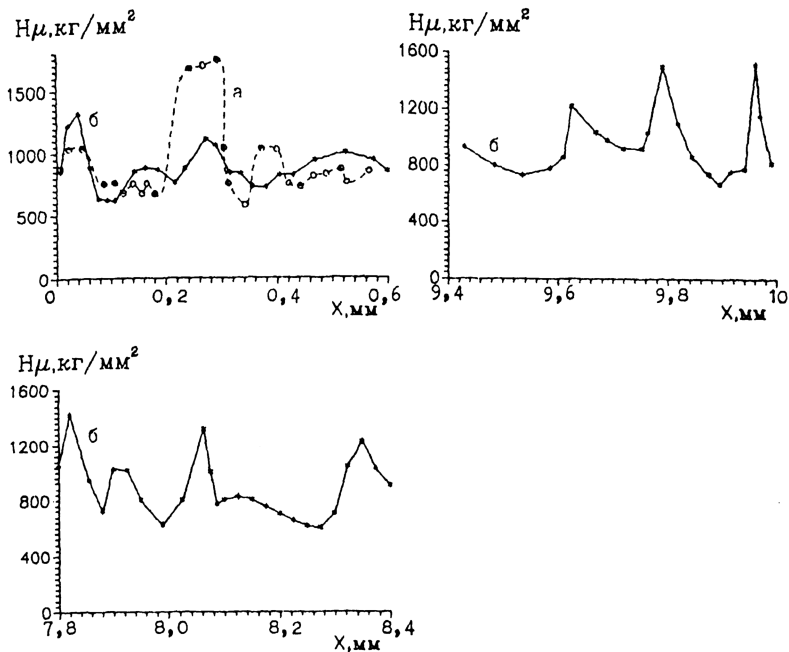


Рис. 2. Зависимость микротвердости от расстояния x до поверхности образцов из предварительно закаленной стали 45: а - $q \approx 5 \cdot 10^9$ Вт/см²; б - $q \approx 5 \cdot 10^{10}$ Вт/см² (толщина образца 10 мм).

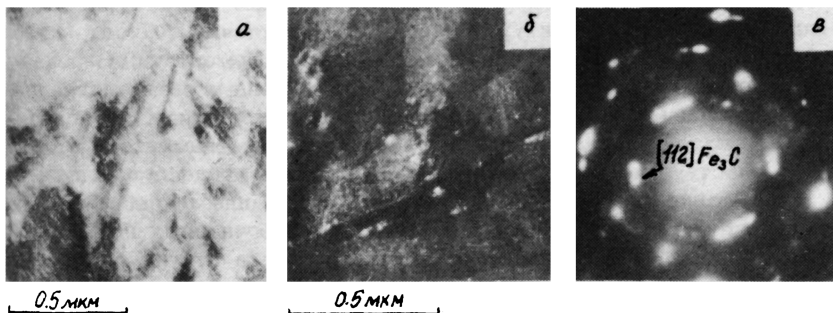


Рис. 3. Электронно-микроскопические изображения структуры предварительно закаленной стали 45 после облучения при $q \approx 5 \cdot 10^{10}$ Вт/см²: а - светлопольное изображение; б - темнопольное изображение в рефлексе $[112]_{\text{цементита}}$; в - микроэлектронограмма к (б) ($x \approx 50$ мкм).

скалярная плотность дислокаций $\langle \rho \rangle \approx 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ($\langle \rho \rangle_{\text{исх}} \approx 2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$). Кристаллы мартенсита фрагментированы, средние размеры фрагментов составляют $\approx 50 \text{ нм}$. Среднее значение азимутальной составляющей угла полной разориентации структуры внутри пакетов $\Delta\alpha \approx 7^\circ$ ($\Delta\alpha_{\text{исх}} \approx 6^\circ$). Весьма часто встречаются пакеты, имеющие заметно более высокие значения величин $\langle \rho \rangle$ и $\Delta\alpha$ ($6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и 14° соответственно), а также более ярко выраженную фрагментированность. Следует отметить, что подобные сильно фрагментированные структуры, формирующиеся локально в малых (единицы микрон) областях, наблюдались также в работе [6] при деформации стали 08Г2С в режиме электропластической стимуляции.

Наряду с мартенситной фазой в этом слое обнаружено присутствие остаточного аустенита в виде тонких прослоек по границам кристаллов мартенсита и частиц цементита, расположенных как внутри кристаллов в виде дисперсных выделений, так и по границам кристаллов в виде тонких пленок (рис. 3, б). Данная субструктура формируется поэтапно. Сначала воздействие УВ приводит к субструктурному упрочнению мартенситной фазы (образование фрагментов, увеличение степени дефектности и др.). После прохождения УВ в течение достаточно продолжительной (10^{-5} – 10^{-3} с) стадии нагрева и охлаждения происходит дисперсионное твердение стали путем упрочнения мартенситных кристаллов дисперсными частицами цементита. Это и определяет высокую микротвердость данной структуры.

За пределами зоны высоких температур структурно-фазовое состояние стали целиком определяется характером взаимодействия УВ с исходной мартенситной структурой. Электронно-микроскопические исследования показали, что микроструктура второго и последующих слоев с повышенной микротвердостью аналогична описанной выше микроструктуре первого слоя. Отличие состоит в том, что здесь отсутствуют дисперсные выделения цементита. В областях с пониженной микротвердостью, расположенных между соседними максимумами (рис. 2), структура мартенсита близка к исходной, происходит лишь небольшое увеличение доли цементита, что свидетельствует о протекании в этих областях процессов отпуска.

Сопоставление полученных результатов с данными работы [2] показывает, что, в целом, микроструктура упрочненных под действием мощной УВ слоев морфологически близка структуре, формирующейся в пиках микротвердости под действием волн напряжений сравнительно малой амплитуды. Следовательно, повышение микротвердости в максимумах кривой $H_m(x)$ обусловлено, как и в [2], в основном, субструктурным упрочнением материала под действием ударной волны.

Слабое влияние амплитуды УВ на структурно-фазовое состояние упрочненных слоев, по нашему мнению, связано с особенностями материала мишени. Действительно, мартенсит представляет собой высокопрочное состояние с высокой плотностью дефектов, малым размером пакетов и кристаллов, играющих роль зерен, и значитель-

ным уровнем дальнедействующих полей напряжений. Поскольку эти характеристики для данной структуры близки к своим предельным значениям, то при воздействии УВ, видимо, происходит блокирование таких известных каналов диссипации ее энергии, как увеличение плотности дефектов, фрагментация кристаллов и др. Вследствие этого, воздействие УВ приводит к развитию объемных процессов движения дислокаций и перестройке дефектной структуры в макрообъемах материала. Это, в свою очередь, приводит к накоплению в материале дополнительной упругой энергии вплоть до уровня, соответствующего пределу прочности. Очевидно, что микроструктурное состояние со столь высокой упругой энергией является неустойчивым. Таким образом, объемное накопление и последующая релаксация упругой энергии приводит к формированию в мартенсите экспериментально наблюдаемой периодически упрочненной структуры.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] И т и н В.И., Л ы к о в С.В., К а ш и н с к а я И.С. и др. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. № 5. С. 89-92.
- [2] И в а н о в Ю.Ф., И т и н В.И., Л ы к о в С.В. и др. // ДАН СССР. 1991. Т. 321. № 6. С. 1192-1196.
- [3] Д е м и д о в Б.А., И в к и н М.В., П е т р о в В.А. и др. // ЖТФ. 1980. Т. 50. В. 10. С. 2205-2208.
- [4] У ч а е в А.Я., Н о в и к о в С.А., Ц у к е р м а н В.А. и др. // ДАН СССР. 1990. Т. 310. № 3. С. 611-614.
- [5] Б е л ю к С.И., Г о н ч а р е н к о И.М., И т и н В.И. и др. Труды II Международной конф. по электронно-лучевым технологиям (ЭЛТ-88). Варна, Болгария. 1988. Т. 3. С. 595-600.
- [6] К о з л о в Э.В., Г р о м о в В.Е., П а н и н В.Е. и др. // Металлофизика. 1991. Т. 13. № 11. С. 9-13.

Институт сильноточной
электроники
РАН, Томск

Поступило в Редакцию
12 декабря 1992 г.