

Поступило в Редакцию
18 ноября 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 10

26 мая 1990 г.

05.1; 07; 12

© 1990

ЭВОЛЮЦИЯ НАНОСЕКУНДНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН И ВРЕМЯ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА В АРМКО-ЖЕЛЕЗЕ

Б.И. Громов, М.В. Ерофеев,
А.А. Калинин, В.А. Моисеев

Воздействие лазерного импульсного излучения интенсивностью $I = 10^{12}$ Вт/см² на металлы вызывает в них значительное число ударно-волновых (УВ) процессов [1, 2], пороговые амплитудно-временные характеристики которых из-за значительных экспериментальных трудностей изучены фрагментарно. Одним из таких процессов в железе является фазовое превращение (ФП) α (ОЦК) \rightleftharpoons γ (ГПУ), для протекания которого необходимо давление $P \geq P_{фп} = 13$ ГПа [3, 4].

Для описания подобных процессов в металле широко используются феноменологические модели, в качестве временных параметров в уравнениях которых входят максимальная скорость [4] или минимальное время превращения [3].

В работе [5] с помощью измерения длительности УВ определено время $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ превращения, составившее $\tau_{фп} = 0.2$ мкс и имеющее тот же порядок, что и характерные времена химических процессов ($\tau_{хп} = 0.1-1$ мкс) в используемых взрывчатых веществах (ВВ) [4]. Это, по нашему мнению, затрудняет точное определение времени фазового перехода в случае, когда $\tau_{фп} \leq \tau_{хп}$.

Лазерное импульсное нагружение металлов позволяет генерировать УВ импульсы от микросекундной до наносекундной длительности [7], амплитуда которых может достигать $P \sim 1$ ТПа [1, 6]. Последующее изучение структуры материала дает возможность выявить зоны ФП [1, 2], сопоставляя размеры которых с известными амплитудно-временными параметрами УВ можно определить $\tau_{фп}$ при $P \geq P_{фп}$.

Целью данной работы являются определение по результатам металлофизического изучения времени $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ ФП в железе под действием лазерных ударно-волновых импульсов.

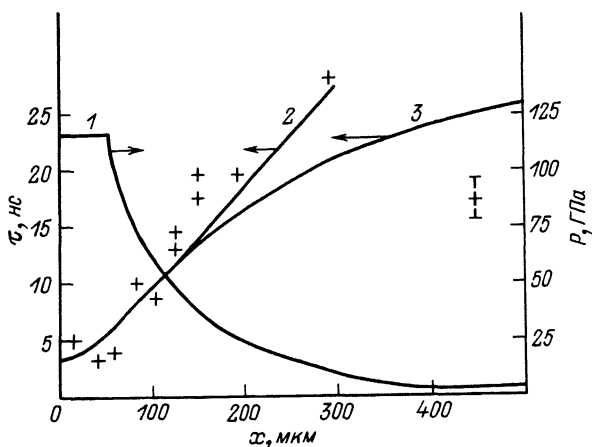


Рис. 1.

Исследования проведены на отожженных образцах из армко-железа с размером зерна $\bar{L}_3 = 150-300$ мкм. Мишени однократно облучались в вакууме лазерными импульсами с длительностью по полувысоте $\tau_{1/2} = 3$ нс и $\tau_{1/2} = 23$ нс при $q \leq 5 \cdot 10^{12}$ Вт/см², что соответствует величинам давления на фронте УВ на поверхности мишени $P = 115-140$ ГПа [6].

Современные методы регистрации таких УВ позволяют определить закономерности их затухания, но не дают возможность исследовать изменяющегося [8] при распространении УВ в металле ее пространственно-временного профиля, что существенно обедняет информацию, получаемую из лазерного эксперимента.

Эволюция амплитудно-временного профиля УВ по толщине мишени в нашем эксперименте изучали с помощью гидродинамической модели, предварительно тестированной как по амплитуде, так и по длительности волны сжатия.

О длительности УВ импульса можно судить по размерам двойников в мишени и, оценочно, по толщине откольной пластины при единичном разрушении [9].

Известно, что зная размеры двойников, можно определить толщину фронта УВ [10]. Однако, если время релаксации касательных напряжений ($\tau_p = 200$ нс [11]) больше времени действия импульса сжатия, т.е. $\tau_p > \tau_n$, то можно считать, что размер двойников характеризует уже длительность самой УВ. Так как на границе зерна рост двойников может затормозиться или совсем прекратиться, то его размер выбирался из условия, что $\bar{L}_3 > \bar{L}_g \tau_n$, где $\bar{L}_g = 2.5 \cdot 10^3$ м/с - скорость роста двойника [11].

В образцах, облученных 3 нс лазерным импульсом, прослеживается корреляция между размерами двойников и расстоянием от нагружаемой поверхности. На рис. 1 представлена рассчитанная

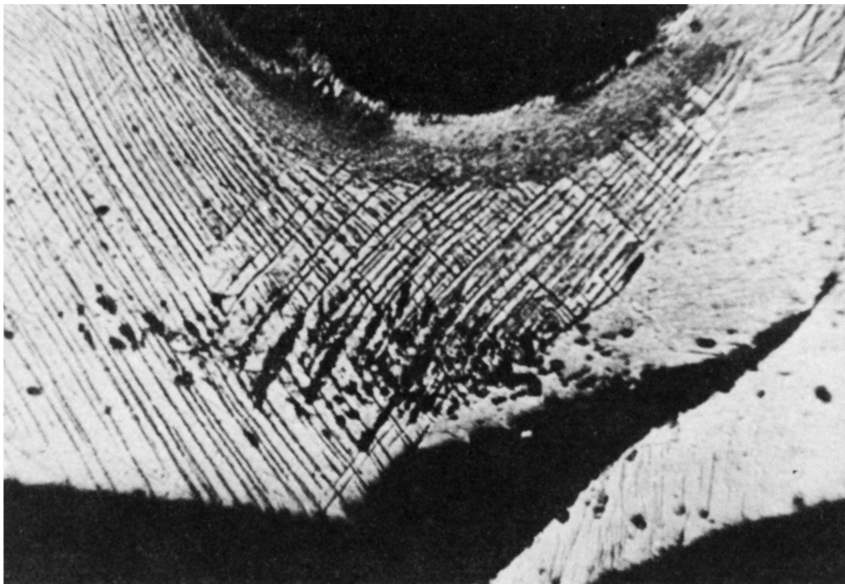


Рис. 2.

по гидродинамической модели зависимость амплитуды УВ (1), τ_H с учетом (2) и без учета (3) упругого предвестника, а также экспериментально определенные из размеров двойников значения τ_H . Согласие экспериментальных результатов с рассчитанной кривой (2), позволяет заключить, что эта гидродинамическая модель затухания УВ является реалистичной.

Фазовое превращение в армко-железе, предварительно нагруженного лазерным импульсом, идентифицировали [12] как зону металла, имеющую после металлографического травления измененный (темный) цвет (см. рис. 2), на границе которой упрочнение материала изменяется скачком и составляет ~ 3 (под упрочнением понимается отношение микротвердости деформированного материала H к исходной H_0). Известно [12], что при нагружении армко-железа УВ, максимальное упрочнение материала имевшего $\alpha \rightleftharpoons \epsilon$ переход ~ 3 , тогда как в металле без ФП $H/H_0 \leq 2$.

Глубина микрократера в случае $\tau_{1/2} = 23$ нс - 250 мкм, толщина измененной зоны, примыкающей к кратеру ~ 40 мкм. По численному расчету давление УВ на глубине $250 + 40 \approx 300$ мкм составляет около 13 ГПа $\tau_H = 55$ нс.

По совокупности перечисленных фактов можно заключить, что при нагружении армко-железа $\tau_{1/2} = 3$ нс импульсами, в металле $\alpha \rightleftharpoons \epsilon$ превращение отсутствовало, а при $\tau_{1/2} = 23$ нс имело место обратное ФП (рис. 2).

Обобщая результаты металлографических исследований образцов, численного счета, получили, что время $\alpha \rightleftharpoons \epsilon$ ФП в армко-железе зависит от амплитуды УВ и значительно меньше значений, полученных в работе [5].

Так, при $P=100$ ГПа длительность УВ импульса, при котором имеет место ФП, составляет $\tau_H = 16 \pm 8$ нс, при $P=80$ ГПа, $\tau_H = 25 \pm 15$ нс, при $P=13$ ГПа, $\tau_H \leq 42$ нс.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Бурдонский И.Н., Ерофеев М.В., Калинин А.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. № 5. С. 290-293.
- [2] Котте Ф. Образование и затухание ударной волны, наведенной лазером в металлической мишени. ВЦП, перевод № Л-57800, 1986. 88 с.
- [3] Dubal G.E., Graham E.A. // Reviews of modern Physics, 1977. V. 49. N 3. P. 523-579.
- [4] Нигматуллин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1, М.: Наука, 1987. 464 с.
- [5] Новиков С.А., Дивнов И.И., Иванов А.Г. // ФММ. 1966. Т. 21. № 2. С. 184-191.
- [6] Анисимов С.И., Прохоров А.М., Фортгов В.Е. // Изв. АН СССР, сер. Физическая. 1982. Т. 46. № 6. С. 1081-1089.
- [7] Andersonholm N.C. // Appl. Phys. Lett. 1969. V. 16. N 3. P. 113-115.
- [8] Trainor R.L., Lee Y.T. // Phys. Fluids. 1982. V. 25. N 10. P. 1898-1907.
- [9] Никифоровский В.С., Шемякин Е.И. Динамическое разрушение твердых тел. Новосибирск: Наука, 1979. 272 с.
- [10] Могилевский М.А. // ФГВ. 1973. Т. 9. № 6. С. 905-909.
- [11] Мейерс М.А., Мурр Л.Е. В сб.: Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов / Под ред. М.А. Мейерса и Л.Е. Мурра, М.: Металлургия, 1985. С.121-151.
- [12] Дерибас А.А. Физика упрочения и сварки взрывом, Новосибирск: Наука, 1980. 222 с.

Поступило в Редакцию
26 января 1990 г.