

## ВЛИЯНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ НА СТРУКТУРУ СТАЛИ

Э. О. Миндели, Н. С. Турманидзе, В. Г. Кабулашвили,  
Э. Ш. Чагелишвили

(Тбилиси)

Известно, что при термической обработке металлов нагрев  $\alpha$ -железа до температуры  $950^\circ\text{C}$  приводит к превращению  $\alpha - \gamma$ . С другой стороны кривая Гюгонио для железа, определяющая зависимость удельного объема от ударного давления для начальной температуры нагружения  $25^\circ\text{C}$ , испытывает излом при 130 кбар. В настоящее время работами [1, 2] установлено, что при  $p = 130$  кбар в  $\alpha$ -Fe указанное превращение есть переход  $\alpha - \epsilon$ , где  $\epsilon$  — гексагональная структура железа.

В [3] сделана попытка исследовать температурную зависимость фазового перехода в железе при сжатии его ударной волной. Начальная температура не превышала в [3]  $900^\circ\text{C}$ . Микроструктура железа, обнаруженная после перехода  $\alpha - \epsilon$  при температурах ниже  $500^\circ\text{C}$  идентична полученной другими авторами в динамических экспериментах при комнатной температуре. Это хорошо известная «сильно двойникованная» структура. Микроструктура при температурах выше  $500^\circ\text{C}$  совсем иная. Основное отличие заключается в величине ферритовых зерен. Во втором случае получается слишком мелкозернистая структура. Основной особенностью данной работы является наличие излома на графике при  $500^\circ\text{C}$  и 115 кбар. Эту точку авторы считают тройной точкой между тремя фазами  $\alpha - \epsilon - \gamma$ , когда из термодинамического соотношения, полученного теоретически и связывающего давление и температуру фазового перехода, следует, что при комнатной температуре переход  $\alpha - \gamma$  должен происходить при 165 кбар [4]. Это положение подтверждается наблюдавшимся заметным различием в микроструктурах, возникающих при фазовом переходе, вызванном ударной волной, при температурах выше и ниже тройной точки.

В данной работе, по-видимому, впервые исследуется изменение структуры ударно-сжатого материала в области начальных температур  $T_n = (25 - 1100)^\circ\text{C}$  и ударного давления  $\sim 220$  кбар. В работе также исследовано изменение физико-механических свойств Ст. 3 при разных начальных температурах без ударного сжатия.

Схема эксперимента приведена на рис. 1, где 1 — электродетонатор, 2 — ВВ, 3 — резиновая прокладка, 4 — стальная пластинка диаметром 70 мм, служащая экраном, 5 — теплоизолирующий слой, 6 — обрабатываемый материал, 7 — стальная матрица, 8 — термопара. В качестве ВВ использовался заряд гексогена диаметром 70 и высотой 80 мм, давление на экране ( $\sim 220$  кбар) во всех экспериментах постоянно.

Температура измерялась хромель-алюмелевой термопарой. Ошибка в измерении температуры в течение всего процесса не превышала 5%. Полуавтоматическая установка позволяла сохранить температуру экранной пластинки постоянной ( $50^\circ\text{C}$ ). Время нагрева не превышало 3 мин. Тонкий слой асбеста позволял теплоизолировать заряд ВВ от нагрева. Таким образом, теплоотдача между экраном и зарядом ВВ за короткие промежутки времени сводилась к минимуму. Обработанный образец охлаждался на воздухе. Для исключения боковой разгрузки образец помещался в стальную матрицу.

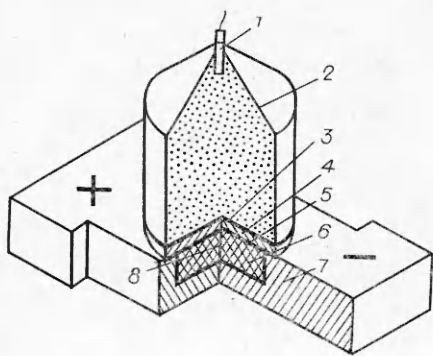


Рис. 1.

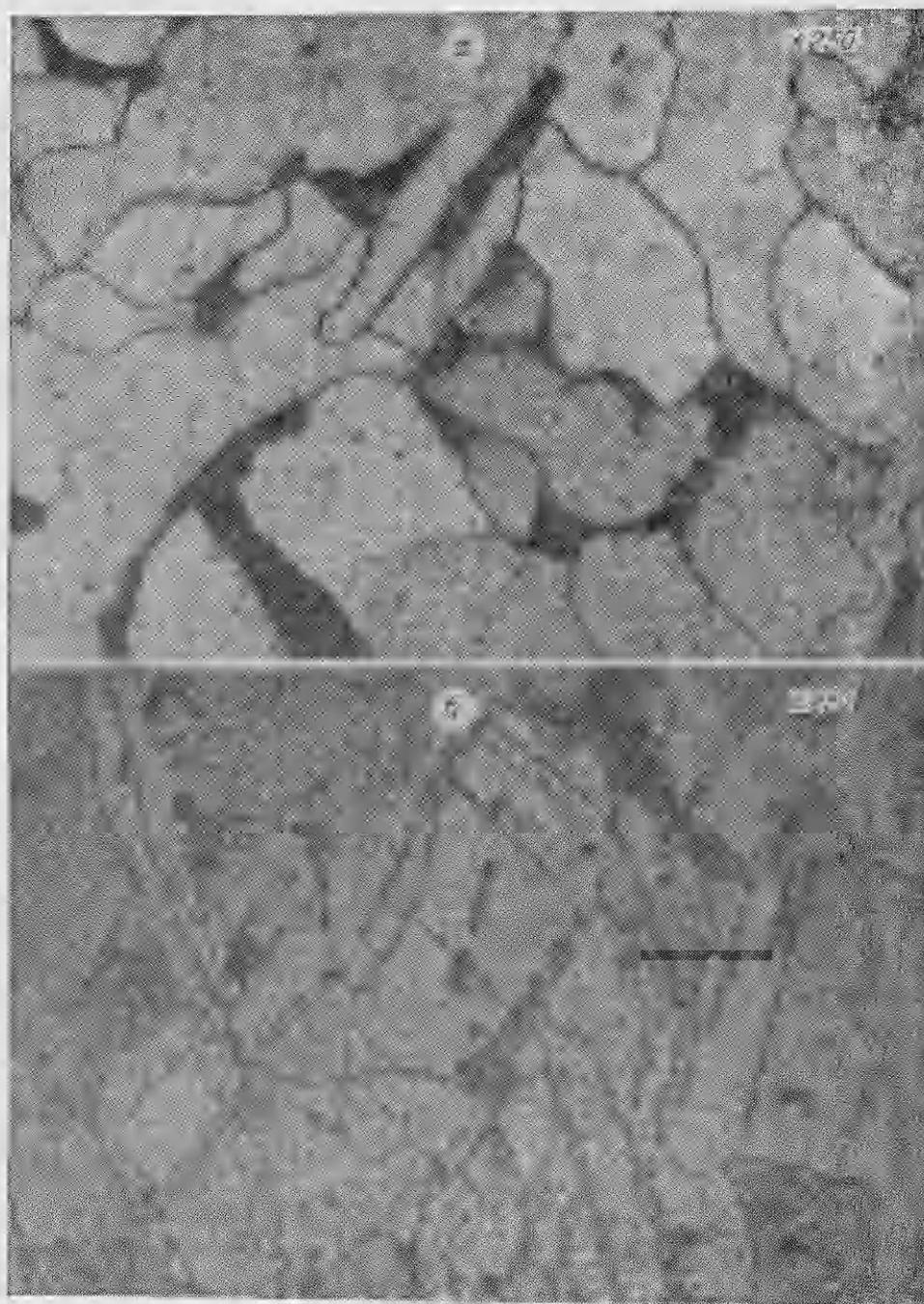


Рис. 2.

Критерием изменения структуры в обработанных образцах служили размеры зерна, микротвердость, фазовый анализ, уширение рентгеновских линий и оценка сил межзатомного взаимодействия. С помощью металлографического анализа оценивалось изменение размера зерна. Микротвердость измерялась на приборе «Эпипип-2» при нагрузке 25 и 50 г. Для проверки твердость определялась также по Роквеллу. Для определения уширения рентгеновских линий, сил межзатомного взаимодействия и фазового анализа применялись приборы УРС-2,0 и УРС-50 в  $FeK_{\alpha}$ -излучениях (харак-

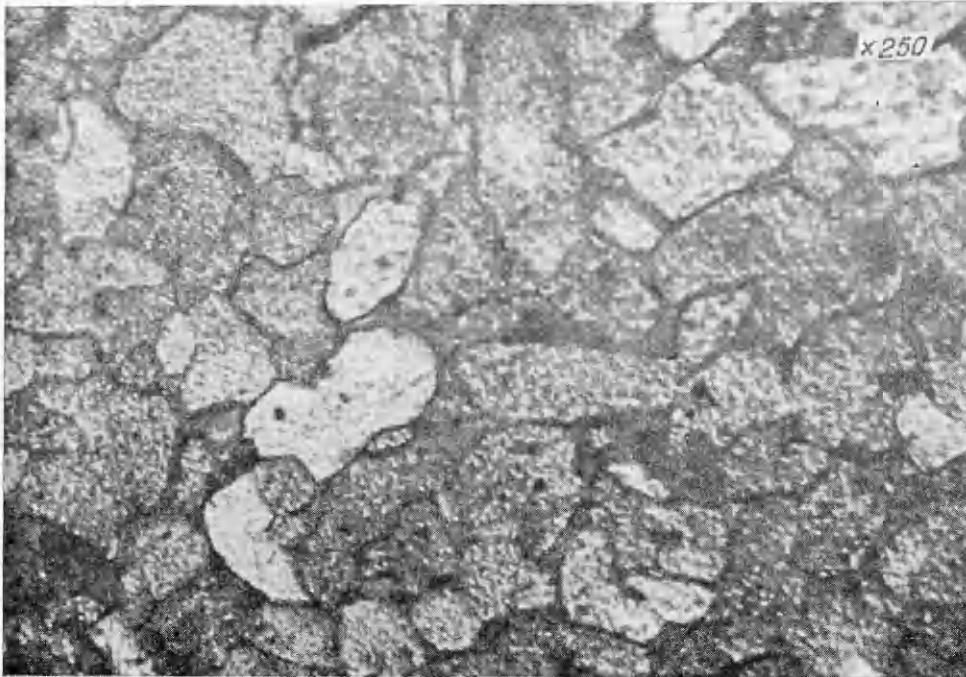


Рис. 3.

теристики тонкой структуры анализировались на дифрактометре УРС-50) с использованием скорости поворота счетчика  $1/8$  и  $1/4$  град/мин. Уширение рентгеновских линий определялось по методу аппроксимации [5].

Микроструктура исходной Ст. 3 представлена на рис. 2, а, а на рис. 2, б — микроструктура Ст. 3 после воздействия ударной волной интенсивностью 220 кбар при комнатной температуре. Из рис. 2, б видно, что микроструктура стали идентична полученной другими авторами в динамических экспериментах при комнатной температуре и характеризуется пластической деформацией с двойникованием и другого рода дефектами.

На рис. 3 представлена микроструктура Ст. 3 после воздействия ударной волной при  $T_n = 500^\circ\text{C}$ . Она отличается от исходной изменением размера зерен и следами фазового перехода. Выше этой точки для Ст. 3 существует другая область, которая характеризуется мелкозернистостью структуры. Полученные данные хорошо согласуются с результатами других авторов о существовании тройной точки в железе ( $\alpha - \varepsilon - \gamma$ ).

Интересная картина наблюдается в интервале  $T_n = 850 - 900^\circ\text{C}$ . На рис. 4, а показана микроструктура после одновременного воздействия ударной волной при  $T_n = 900^\circ\text{C}$ . В этом режиме получается самая мелкозернистая структура, где размер зерна уменьшается почти на порядок. Дальнейшее увеличение начальной температуры до  $1100^\circ\text{C}$  приводит к росту размера зерна (рис. 4, б).

Результаты исследований по изменению размера зерна  $\mu$  и микротвердости  $H_v$  приведены на рис. 5. Погрешность измерения размера зерна не превышала 6—8, а микротвердости — 11—15%. Такое изменение размера зерна и микротвердости объясняется тройным фазовым переходом выше тройной точки перехода, где существует для наших режимов  $\alpha - \gamma - \varepsilon$ -переход.

Рентгеноструктурные исследования фазового состава обработанных образцов показали, что во всех проведенных экспериментах фазовое превращение с сохранением в материале отсутствует. Параметры решетки изменяются в пределах ошибки измерения. Зависимость уширения рентге-

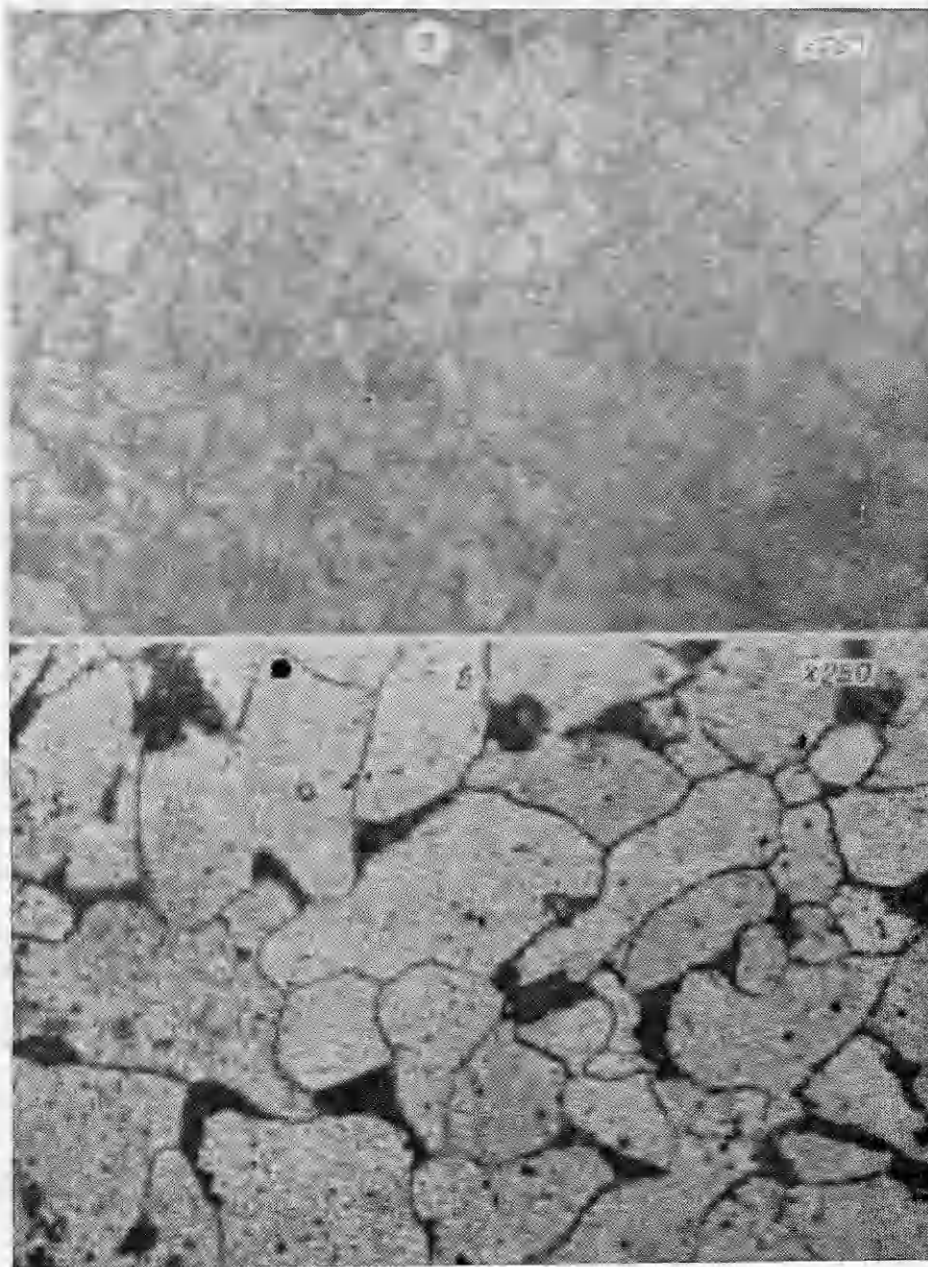


Рис. 4.

новских линий (211) от начальной температуры приведена на рис. 6. Аналогичная кривая получается и для линий (110), но отношение уширения рентгеновских линий в малых и больших углах  $\beta_1/\beta_2$  изменяется между косинусами и тангенсами углов дифракции. Этот факт свидетельствует о том, что уширение рентгеновских линий вызвано также увеличением микронапряжений и изменением блочной мозаики обработанных образцов.

Исследования показывают, что в динамических экспериментах обработанные в области температур 25—500°C образцы характеризуются разного рода дефектами. Это и является главным фактором повышения микронапряжений в образцах. При одновременном воздействии высокой

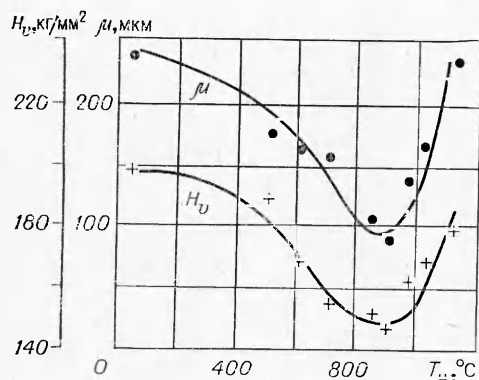


Рис. 5.

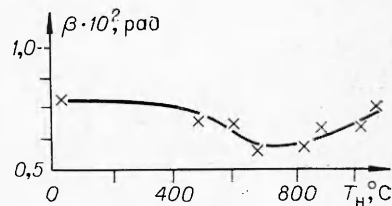


Рис. 6.

тура с меньшим количеством дефектов (см. таблицу).

В данной работе сделано дополнительное предположение о том, что под действием ударной волны при температурах выше тройной точки происходит вторичный рост зерен после обратного фазового перехода в материале. В исследуемом случае при разных начальных температурах

Начальная температура, °C	Микрогредность, кг/мм <sup>2</sup>	Размер зерна, мкм	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Уширение рентгеновских линий, β · 10 <sup>2</sup> , рад
---------------------------	------------------------------------	-------------------	------------------------------	---

До нагружения				
25	130	350	7,83	—
700	110	260	7,78	—
900	140	150	7,86	—
1000	110	170	7,89	—
1100	100	160	7,81	—

После ударного нагружения				
25	200	240	7,94	0,80
500	190	180	7,22	0,77
600	170	170	7,57	0,68
700	155	160	7,478	0,61
850	150	110	7,68	0,62
900	145	90	6,72	0,67
960	165	140	6,71	0,71
1020	170	180	7,14	0,75
1125	180	240	7,11	0,76

скорость вторичного роста зерен разная, поэтому получаются разные размеры ферритовых зерен после перехода. Незаконномерное изменение физических параметров в обработанных образцах объясняется тройным фазовым переходом  $\alpha - \gamma - \epsilon$ .

На основе проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы.

1. Для Ст. 3 существует тройная точка фазового превращения  $\alpha - \epsilon - \gamma$ , аналогично как и для армко-железа.

2. При воздействии на железо ударной волной при температурах ниже тройной точки и давлениях, больших давления перехода, на образцах обнаруживаются двойниковоподобные следы ферритовых зерен, что подтверждает наличие в этой области фазового перехода  $\alpha - \epsilon$ .

3. Выше тройной точки получена структура, характеризующаяся кристаллографическим фазовым переходом. Незаконномерное изменение в этой области физических величин обработанного образца объясняется тройным фазовым переходом  $\alpha - \gamma - \epsilon$ .

Поступила в редакцию  
25/VII 1978

#### ЛИТЕРАТУРА

1. P. M. Giles, M. H. Londebach, A. R. Marder. J. Appl. Phys., 1971, **42**, 4290.
2. T. Takahashi, W. A. Basset, H. K. Mao. J. of Geophys. Res., 1968, **73**, 14, 4717.
3. Джонсон, Стейн, Девис.— В сб.: Динамические исследования твердых тел при высоких давлениях. М., Мир, 1965.
4. L. Kauffman.— In: Conferenze on Very High Pressure, John Wilby and Sons, Inc. N. Y., 1961.
5. С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков. Рентгенографический и электроннооптический анализ. М., Металлургия, 1970.
6. Я. С. Уманский. Рентгенография металлов. М., Металлургиздат, 1960.