

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

В. А. ИЛЬИНА и В. К. КРИЦКАЯ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ  
ИНТЕНСИВНОСТИ РЕНТГЕНОВСКИХ ИНТЕРФЕРЕНЦИЙ  
ДЕФОРМИРОВАННОГО ЖЕЛЕЗА**

(Представлено академиком И. П. Бардиным 12 IX 1952)

Изучение влияния пластической деформации на состояние кристаллической решетки представляет большой интерес в связи с вопросами прочности и упрочнения металлов.

Рядом исследований<sup>(1-9)</sup> было установлено, что интенсивность рентгеновских отражений от деформированных металлов значительно слабее интенсивности от недеформированных. Экспериментальные данные, полученные различными исследователями, приводили в основном к однозначным выводам: интенсивность рентгеновских отражений от деформированных металлов по сравнению с интенсивностью недеформированных убывает тем сильнее, чем выше порядок отражения, причем понижение интенсивности с порядком отражения происходит подобно тому, как это имеет место при усилении теплового движения атомов, т. е. по закону  $e^{-2M}$ , где  $M = \frac{8\pi^2}{3 \cdot 4a^2} \bar{u}^2 \sum h_i^2$ .

В упомянутых выше работах деформирование исследуемых образцов производилось различными способами: прокаткой, волочением, напильником, растиранием металлического порошка в ступке, сильным наклепом молотком. Во всех случаях характер изменения интенсивности при сравнении деформированных и недеформированных металлов получался один и тот же. Однако все работы такого характера в основном были проведены с применением относительно мягких рентгеновских лучей, позволяющих получать отражения от небольшого числа кристаллографических плоскостей (в малом диапазоне  $\sin \vartheta / \lambda$ ). Хотя общий ход кривой изменения интенсивности деформированных металлов по сравнению с интенсивностью недеформированных показывал экспоненциальную зависимость интенсивностей от угла отражения, было обнаружено, однако, что в некоторых деформированных металлах не для всех плоскостей имеет место изменение интенсивности по закону  $e^{-A\Sigma h_i^2}$ . Так, в работах<sup>(2,6)</sup> сообщалось, что в деформированной меди интенсивность отражений от плоскости (200) значительно ниже, чем она должна быть, если ослабление интенсивности происходит по экспоненте. Значительное отклонение от кривой изменения интенсивности, описываемой множителем  $e^{-A\Sigma h_i^2}$ , было обнаружено<sup>(6)</sup> у деформированного никеля для плоскости (200) и у деформированного кобальта<sup>(7)</sup> для плоскости (010).

Нам представлялось поэтому целесообразным применение для такого рода исследований жесткого излучения, позволяющего просле-

дить на большом количестве отражений изменение интенсивности рентгеновских интерференций деформированных металлов и проверить, справедлив ли для них закон  $e^{-2M}$ . Кроме того, измерение интенсивности рентгеновских интерференций в жестких лучах при различных температурах (например, комнатной и температуре жидкого азота) позволяет с большей точностью определить изменение теплового фактора интенсивности (характеристическую температуру) и, следовательно, дает возможность установить, какими причинами определяется

Таблица 1

$\Sigma h_i^2$	$I_{\text{недеф}}/I_{\text{деф}}$ при $t = +23^\circ$	
	измер.	вычисл.
4	1,06	1,06
6	1,07	1,09
8	1,14	1,13
10	1,16	1,17
12	—	1,20
14	1,24	1,24
16	1,26	1,28
18	1,30	1,32
20	1,35	1,37
22	1,40	1,40
24	—	1,45
26	1,52	1,50
30	1,58	1,60
32	—	1,65
34	1,79	1,70
36	—	1,75
38	1,70	1,81
40	—	1,87
42	2,10	1,93

ослабление интенсивности: связано ли оно с изменением энергетического состояния атомов в решетке (динамикой решетки) или же вызвано такими изменениями тонкой структуры, которые не меняются с температурой (например, искажения 3-го рода). Проведение подобных исследований в мягком излучении значительно менее точно.

Нами были произведены измерения интенсивности рентгеновских

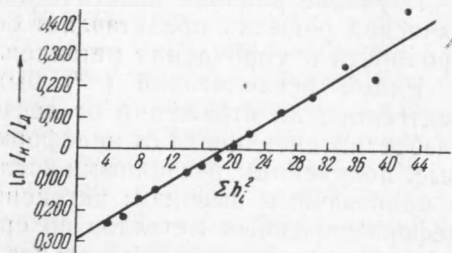


Рис. 1

отражений от деформированного и недеформированного железа в молибденовом  $K\alpha$ -излучении. Исследование деформированного железа проводилось на порошке, полученном напильником. Этот же порошок, отпущенный при температуре  $650^\circ$  в вакууме, служил материалом для исследования недеформированного железа. Были измерены интенсивности 19 отражений. Сравнение интенсивностей интерференции недеформированного и деформированного железа позволяет, как это было нами показано ранее (5), исключить различие в интенсивности первичного пучка рентгеновских лучей при отдельных рентгеносъёмках, т. е. дает возможность сравнивать непосредственно интенсивности отражений одинаковых индексов на различных рентгенограммах (например, линии на рентгенограммах деформированного и недеформированного железа или линии на рентгенограммах, снятых при различных температурах) из выражения:

$$\frac{I_{hkl}}{I_{hkl}''} = \frac{I_0'}{I_0''} e^{-A \Sigma h_i^2}, \quad (1)$$

или

$$\ln \frac{I_{hkl}}{I_{hkl}''} = \ln \frac{I_0'}{I_0''} - A \Sigma h_i^2, \quad (2)$$

член уравнения (2)  $\ln \frac{I_0'}{I_0''}$  определится как величина отрезка, отсекаемого на ординате прямой, представляющей зависимость  $\ln \frac{I_{hkl}}{I_{hkl}''}$  от  $\Sigma h_i^2$ .

В табл. 1 и на рис. 1 приведены результаты наших измерений интенсивностей рентгеновских интерференций деформированного и недеформированного железа при комнатной температуре. Из этих данных с очевидностью следует, что имеет место ослабление интенсивности деформированного железа по сравнению с интенсивностью недеформированного и что это ослабление происходит по закону  $e^{-A\Sigma h_i^2}$ , где  $A = \frac{2 \cdot 8\pi^2}{3 \cdot 4a^2} \bar{u}^2$ , а  $\Sigma h_i^2$  — сумма квадратов индексов отражающей кристаллографической плоскости.

Величина  $\sqrt{\bar{u}^2}$  является среднеквадратичным смещением центров колебаний атомов из узлов решетки. Вычисленная по тангенсу угла наклона прямой графика рис. 1 величина  $\sqrt{\bar{u}^2}$  деформированного железа оказалась равной 0,10 Å.

Таблица 2

$\Sigma h_i^2$	$I_{hkl} 88^\circ / I_{hkl} 295^\circ$		вычисл.
	недеформ. железо	деформ. железо	
	измер.		
4	1,07	—	1,05
6	1,08	1,04	1,08
8	1,09	1,08	1,10
10	1,13	1,11	1,13
12	1,13	1,17	1,15
14	1,15	1,14	1,18
16	1,19	—	1,21
18	1,26	1,23	1,24
20	1,22	1,26	1,27
22	1,28	1,28	1,30
24	1,33	1,30	1,33
26	1,35	1,34	1,37
30	1,45	1,35	1,43
32	—	—	1,47
34	1,48	1,55	1,50
36	—	—	1,54
38	1,55	1,52	1,58
40	—	—	1,62
42	—	1,68	1,66

Ранее нами было показано (5) на основании измерений отношения интенсивностей в кобальтовом излучении, что ослабление интенсивности деформированного железа вызвано наличием в кристаллической решетке искажений 3-го рода и не связано с изменением теплового фактора интенсивности (с изменением характеристической температуры).

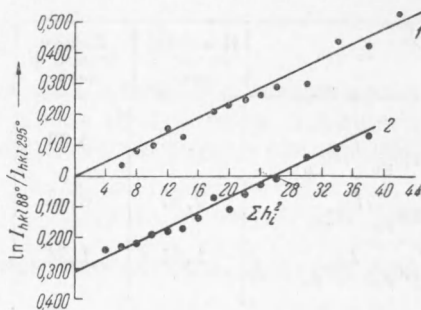


Рис. 2

В настоящем исследовании, в котором применение жесткого излучения позволило намногу расширить диапазон измеряемых отражений и тем самым значительно повысить величину наблюдаемых эффектов и, следовательно, увеличить точность их определения, полученные нами ранее результаты (5) полностью подтвердились. Измерения интенсивности в молибденовом излучении при двух температурах (+23° и -185°) деформированного и недеформированного железа показали, что изменение интенсивности (тепловой множитель интенсивности) при понижении температуры образца на 200° меняется в одинаковой степени как для деформированного, так и для недеформированного железа. Данные этих измерений приведены в табл. 2.

Из рис. 2, представляющего логарифмическую зависимость интенсивности при различных температурах от порядка отражения деформированного (1) и недеформированного (2) железа, видно, что тангенс угла наклона прямых на обоих графиках один и тот же и равен 0,012. Вычисленная на основании этих данных характеристическая температура

тура деформированного и недеформированного железа оказалась равной 430°.

Таким образом, настоящее исследование полностью подтвердило существование закономерности  $e^{-A\Delta h_i^2}$  в ослаблении интенсивности рентгеновских отражений от деформированных металлов, а также подтвердило правильность представления о том, что причиной ослабления интенсивности в деформированных металлах является наличие искажений 3-го рода.

С этими результатами находятся в противоречии данные работы Авербаха (10). В этой работе и экспериментальные данные и их трактовка существенным образом отличаются от имеющих в литературе данных по этому вопросу. Автор считает, что интенсивность рентгеновских интерференций от деформированных металлов по сравнению с интенсивностью от недеформированных не слабее, а наоборот, сильнее, вследствие измельчения областей когерентного рассеяния при деформации и, следовательно, уменьшения экстинкции. Поскольку эффект экстинкции оказывает более сильное влияние на отражения низких порядков, эти отражения, по мнению Авербаха, должны быть в деформированных металлах сильнее, чем в недеформированных; отражения же высоких порядков практически должны оставаться неизменными.

Нами были произведены следующие опыты. Был взят мелкий железный порошок высокой чистоты, полученный восстановлением железа из окислов. Деформирование производилось длительным растиранием

Таблица 3

	Недеформ. железо + медь	Деформ. железо + медь	Изменение в %
$I_{110\text{Fe}} / I_{111\text{Cu}}$	0,88	0,83	6
$I_{220\text{Fe}} / I_{111\text{Cu}}$	0,54	0,43	20
$I_{110\text{Fe}} / I_{220\text{Fe}}$	1,64	1,94	18

железного порошка в агатовой ступке. К равным количествам деформированного и недеформированного железа прибавлялись равные весовые части медного порошка. Из тщательно приготовленной смеси железо—медь были сделаны цилиндрические образцы для рентгеносъемок. Измерение интенсивности рентгеновских отражений производилось в кобальтовом излучении при комнатной температуре. Интенсивность линии меди 111 являлась стандартом, с которым сравнивались интенсивности линий 110 и 220 недеформированного и деформированного железа.

Результаты этих измерений приведены в табл. 3. Из этих данных с очевидностью следует, что интенсивность рентгеновских интерференций от деформированного железа слабее, чем от недеформированного, причем ослабление интенсивности тем сильнее, чем выше порядков отражения, и подчиняется закону  $e^{-A\Delta h_i^2}$ .

Институт металловедения и физики металлов  
ЦНИИЧМ

Поступило  
11 IX 1952

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> J. Hengstenberg, H. Mark, Naturwiss., 17, 443 (1929). <sup>2</sup> Б. М. Ровинский, ЖЭТФ, 7, 963 (1937); 8, 84 (1938). <sup>3</sup> Я. С. Уманский, Тр. Минцветметзолото, 86 (1938). <sup>4</sup> С. Д. Герцрикен, И. Я. Дехтяр, А. Геллер, ЖТФ, 8, 1359, 1365 (1938). <sup>5</sup> Г. В. Курдюмов, В. А. Ильина, В. К. Крицкая, Проблемы металловедения и физики металлов, 2-й сборн. трудов, 222, 1951. <sup>6</sup> G. W. Brindley, Proc. Phys. Soc., 52, 117 (1940). <sup>7</sup> В. К. Крицкая, Проблемы металловедения и физики металлов, 3-й сборн. трудов, 1952. <sup>8</sup> W. Voas, Z. Kristallogr., 96, 214 (1937); 97, 354 (1937). <sup>9</sup> R. Brill, Z. Phys., 105, 378 (1937). <sup>10</sup> B. L. Averbach, J. of Metals, 1, № 8, 491 (1949).