

УДК 548.4

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВОЙНИКОВ ПРИ ИХ ПЕРЕСЕЧЕНИИ В КРИСТАЛЛАХ С ОЦК РЕШЕТКОЙ

© В.А. Федоров, С.Н. Плужников, Ю.И. Тялин, В.Н. Холодили

Feodorov V.A., Plushnikov S.N., Tyalin Y.I., Kholodilin V.N. The analysis of interaction of twins at their intersection in BCC crystals. A dislocation analysis is carried out of the plastic current at the twins' intersection in materials with a BCC lattice. On the basis of the obtained results, dislocation reactions are formulated for each of the six variants of twins' intersection, of the interaction glide dislocations with glide ones, twinning dislocations with twinning ones, and glide dislocations with twinning ones. Possible directions of shift and the Frank criterion are taken into consideration. The article also shows the possibility of dislocation reactions with the formation of dislocations, which can lead to micro-cracks nucleating.

Деформация двойникующихся материалов сопровождается пересечением двойников, развивающихся по различным плоскостям и направлениям [1]. Пересечение двойников инициирует развитие вторичного двойникования, скольжения и образование микротрещин как в сдвойникованном, так и в матричном материале. Взаимодействию пересекающихся двойников и их роли в образовании микротрещин посвящено достаточно много работ [2–5].

Процессы микропластичности и разрушения при пересечении двойников в ГПУ металлах (например, в цинке и кадмии) рассмотрены довольно подробно [4, 5], в то время как для ОЦК металлов эти исследования носят преимущественно описательный характер. Для определения механизмов зарождения трещин необходим дислокационный и кристаллографический анализ процессов микропластичности в зонах взаимодействия пересекающихся прослоек.

В работе рассмотрено пересечение двойников в ОЦК решетке, проведен анализ дислокационных реакций, инициируемых пересечением двойников, что позволяет выяснить роль вторичных систем скольжения и двойникования, которые могут существенно влиять на развитие процессов микропластичности и разрушения в двойникующихся материалах.

ОЦК решетка имеет 12 систем двойникования $\{112\} \langle 111 \rangle$. Пересечение деформационных двойников возможно по шести неэквивалентным вариантам. При таком пересечении наиболее вероятен случай, когда развивающаяся двойниковая прослойка атакует своей вершиной статическую двойниковую прослойку, возникшую ранее. Предполагали, что двойник $(\bar{1}\bar{1}2)$ – статический (остаточный), а другие шесть $((\bar{1}\bar{1}2) [111], (\bar{1}\bar{1}2) [\bar{1}\bar{1}\bar{1}], (2\bar{1}\bar{1}) [\bar{1}\bar{1}\bar{1}], (2\bar{1}\bar{1}) [111], (211) [\bar{1}\bar{1}\bar{1}], (\bar{2}11) [\bar{1}\bar{1}\bar{1}])$ – динамические, распространяющиеся под действием некоторого касательного напряжения и атакующие стационарную прослойку-стопор. Сдвиговые компоненты поля напряжений атакующего двойника вызывают скольжение и вторичное двойникование в статической прослойке. Величиной этих компонент, пропорциональных значениям факто-

ра Шмида, определяется преимущественность развития деформации в статическом двойнике по той или иной системе скольжения или двойникования.

В [5] был выполнен расчет по определению значений фактора Шмида в плоскостях двойникования и скольжения статической двойниковой прослойки. При этом считали, что с материалом матрицы связана прямоугольная система координат XYZ, а с материалом двойника – система X'Y'Z' (при этом решетка сдвойникованной части кристалла повернута относительно матрицы на угол $\theta = 71^\circ$ в плоскости $(1\bar{1}0)$ матрицы). По величинам фактора Шмида были идентифицированы активные плоскости вторичного двойникования и скольжения в статической двойниковой прослойке.

На основании полученных значений факторов Шмида для каждого варианта пересечения двойников были составлены дислокационные реакции взаимодействия трех типов дислокаций: 1) двойникующих ($a/6 \langle 111 \rangle$); 2) полных ($a/2 \langle 111 \rangle$); 3) полных и двойникующих. При этом учитывали возможные направления сдвига и выполнение критерия Франка.

1) В материале остаточного двойника взаимодействия двойникующих дислокаций, лежащих в плоскостях $\{112\}$, можно описать реакцией

$$\frac{a}{6} \langle 111 \rangle_{0,083} + \frac{a}{6} \langle 111 \rangle_{0,083} \rightarrow \frac{a}{3} \langle 001 \rangle_{0,111},$$

где нижние индексы представляют квадраты векторов Бюргерса в относительных единицах. Для всех вариантов пересечения двойников эта реакция имеет определенный коэффициент повторяемости, представленный в табл. 1 (1-я строка).

Как видно, такие взаимодействия приводят к образованию дислокаций $a/3 \langle 001 \rangle$. Эти дислокации являются сидячими, так как они не лежат в плоскостях скольжения и их векторы Бюргерса не параллельны направлениям двойникования или скольжения.

Можно утверждать, что взаимодействие двойников при их пересечении во всех шести вариантах ответственно за образование дислокаций $a/3 \langle 001 \rangle$, накопле-

ние и последующее объединение которых приводит к возникновению микротрещин [3]:

$$n\left(\frac{a}{6}\langle 111 \rangle\right) + n\left(\frac{a}{6}\langle 111 \rangle\right) \rightarrow \frac{1}{3}na\langle 001 \rangle \quad (1)$$

2) При взаимодействии полных дислокаций для материала статической двойниковой прослойки возможно осуществление дислокационной реакции:

$$\frac{a}{2}\langle 111 \rangle_{0,75} + \frac{a}{2}\langle 111 \rangle_{0,75} \rightarrow a\langle 001 \rangle_1 \quad (2)$$

3) При взаимодействии двойникоупщих дислокаций $a/6\langle 111 \rangle$ с полными $a/2\langle 111 \rangle$ для материала статического двойника возможно протекание следующей дислокационной реакции:

$$n\frac{a}{6}\langle 111 \rangle_{0,75} + \frac{a}{2}\langle 111 \rangle_{0,75} \rightarrow a\langle 001 \rangle_1, \quad \text{где } n = 3. \quad (3)$$

Коэффициент повторяемости дислокационных реакций (2) и (3) для шести вариантов пересечения двойников представлен в табл. 1 (соответственно 2-я и 3-я строки).

Следует отметить, что дислокации $a\langle 001 \rangle$ также являются сидячими, накопление и последующее объединение которых может привести к зарождению разрушения.

Известно [6], что взаимодействие дислокаций, удовлетворяющее критерию Франка, не означает, что дислокационная реакция будет реализована. Критерий Франка представляет собой лишь необходимое условие, указывая на потенциальную возможность ее протекания, не являясь достаточным. Как правило, анализ равновесных конфигураций, образовавшихся в результате взаимодействия гибких дислокаций, ограничивается оценкой величины зоны рекомбинации [7, 8].

Рассмотрим схему, на основе которой проводятся соответствующие оценки. Предположим, имеются две прямолинейные, пересекающиеся в точке О дислокации $A_1B_1 = l_1$ и $A_2B_2 = l_2$, фиксированные в точках A_1, B_1, A_2 и B_2 (рис. 1), лежащие вместе со своими векторами Бюргерса b_1 и b_2 в плоскостях (1) и (2) соответственно, для которых возможна дислокационная реакция.

Энергия этой дислокационной конфигурации может быть понижена за счет расщепления четверного узла О на два тройных Р и Q с образованием отрезка

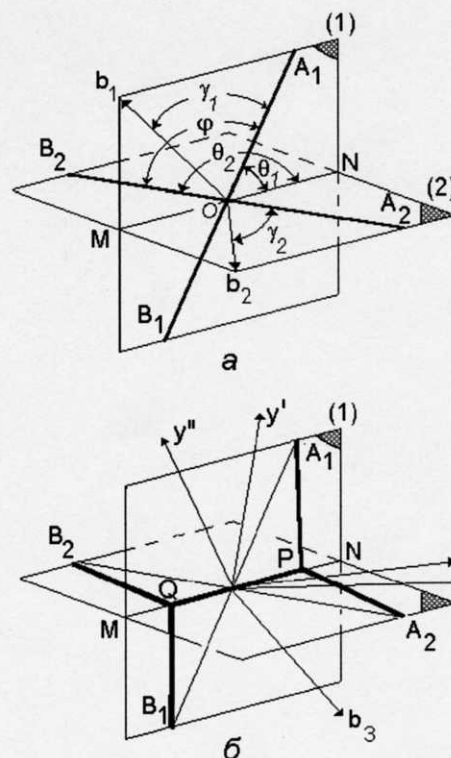


Рис. 1. Схема образования зоны рекомбинации взаимодействующих дислокаций [7]

дислокации «3» Р и Q с вектором Бюргерса b_3 . PQ – в дальнейшем будем называть зоной рекомбинации. Величину зоны рекомбинации можно оценить, воспользовавшись энергетическим критерием. Из экстремального условия

$$\delta(E_0 - E) = 0, \quad (4)$$

где E_0 и E – энергия системы до и после взаимодействия. При подобных расчетах используются различные приближения. В силу значительных трудностей в большинстве случаев не учитывается взаимодействие между дислокациями, а весь энергетический баланс оценивается на основе погонной энергии. Это допущение возможно в результате того, что при формировании зоны рекомбинации реагирующие дислокации раздвигаются, и их энергия взаимодействия уменьшается. Обычно также не принимается во внимание вариация погонной энергии при изменении угловых соотношений между дислокациями и их векторами Бюргерса в процессе рекомбинации, что недопустимо при рассмотрении больших зон рекомбинации. Такое упрощение может приводить к заметным ошибкам, поэтому оценку изменения энергии дислокационной конфигурации будем производить с учетом изменения погонной энергии E дислокаций при их переориентации. Введем две системы координат с началом в точке О и с осями $x'y'$ и $x''y''$, расположенными в плоскостях (1) и (2) соответственно. Введем следующие обозначения: d – величина зоны рекомбинации; ϕ – угол между дислокациями до рекомбинации; $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ – углы, образуемые осями x с 1-й, 2-й дислокациями и зо-

Таблица 1

Значения коэффициента повторяемости для дислокационных реакций (1), (2) и (3)

Тип взаимодействия дислокаций	Варианты пересечений двойников					
	1	2	3	4	5	6
	$(\bar{1}\bar{1}2)$ $[111]$	$(\bar{1}\bar{1}2)$ $[1\bar{1}1]$	$(2\bar{1}\bar{1})$ $[1\bar{1}1]$	$(2\bar{1}\bar{1})$ $[11\bar{1}]$	(211) $[1\bar{1}\bar{1}]$	$(\bar{2}\bar{1}1)$ $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$
1	1	2	2	4	1	2
2	15	8	8	8	19	12
3	13	6	6	8	15	8

Таблица 2

Образование зоны рекомбинации при взаимодействии двойникоующих дислокаций

Плоскости скольжения и двойникования статического двойника	Атакующие (развивающиеся) двойники					
	Варианты пересечений					
	1	2	3	4	5	6
	$(\bar{1}\bar{1}2)[111]$	$(\bar{1}12)[\bar{1}\bar{1}1]$	$(21\bar{1})[\bar{1}\bar{1}1]$	$(2\bar{1}1)[11\bar{1}]$	$(211)[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$	$(\bar{2}11)[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$
1. $(112)[\bar{1}\bar{1}1]$	Ф, 3, 0,004					3, 0,005
2. $(\bar{1}\bar{1}2)[111]$				3, 0,005		
3. $(\bar{1}12)[\bar{1}\bar{1}1]$	3, 119			Ф		Ф
4. $(1\bar{1}2)[\bar{1}\bar{1}1]$				Ф		Ф
5. $(121)[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$						
6. $(\bar{1}2\bar{1})[111]$		3, 0,005				
7. $(\bar{1}21)[111]$		Ф	Ф, 3, 1			
8. $(12\bar{1})[\bar{1}\bar{1}1]$		Ф	Ф	Ф, 3, 0,2		
9. $(211)[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$						
10. $(2\bar{1}\bar{1})[111]$					Ф, 3, 0,004	
11. $(21\bar{1})[\bar{1}\bar{1}1]$				Ф, 3, 0,004	3, 119	
12. $(2\bar{1}1)[11\bar{1}]$						

Примечание: «Ф» означает выполнение критерия Франка, «З» – образование зоны рекомбинации и ее числовое значение в микрометрах.

Таблица 3

Образование зоны рекомбинации при взаимодействии полных дислокаций

Плоскости скольжения и двойникования статического двойника	Атакующие (развивающиеся) двойники					
	Варианты пересечений					
	1	2	3	4	5	6
	$(\bar{1}\bar{1}2)[111]$	$(\bar{1}12)[\bar{1}\bar{1}1]$	$(21\bar{1})[\bar{1}\bar{1}1]$	$(2\bar{1}1)[11\bar{1}]$	$(211)[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$	$(\bar{2}11)[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$
1. $(011)[\bar{1}\bar{1}1]$	Ф, 3, 0,06	3, 0,3			Ф, 3, 0,9	
2. $(011)[\bar{1}1\bar{1}]$	Ф, 3, 1			3, 0,4	Ф, 3, 1	3, 0,06
3. $(0\bar{1}1)[111]$			3, 1		Ф	
4. $(0\bar{1}1)[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$	Ф, 3, 0,001		3, 0,8	3, 0,06	3, 1	3, 0,4
5. $(101)[\bar{1}\bar{1}1]$	Ф, 3, 0,001	3, 141			Ф, 3, 0,001	3, 0,5
6. $(101)[\bar{1}1\bar{1}]$	Ф	3, 0,01		3, 0,3		3, 21
7. $(10\bar{1})[111]$		3, 0,5	3, 0,3		Ф, 3, 0,06	
8. $(10\bar{1})[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$	Ф				Ф, 3, 1	
9. $(110)[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$	Ф	3, 0,3		3, 141		
10. $(110)[\bar{1}1\bar{1}]$	Ф, 3, 0,06			3, 0,01	Ф	
11. $(\bar{1}10)[111]$				3, 0,5	Ф, 3, 0,01	
12. $(\bar{1}10)[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$	Ф, 3, 0,01	3, 0,06			Ф, 3, 151	
13. $(123)[\bar{1}\bar{1}1]$	Ф, 3, 0,07	3, 11			Ф	
14. $(\bar{1}\bar{2}3)[111]$		3, 71			Ф	
15. $(\bar{1}23)[\bar{1}\bar{1}1]$			3, 1	Ф, 3, 1	3, 0,001	Ф, 3, 31
16. $(1\bar{2}3)[\bar{1}\bar{1}1]$		Ф, 3, 0,001	Ф	Ф, 3, 31		Ф, 3, 1
17. $(312)[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$	Ф	3, 1	3, 71	3, 11		3, 31
18. $(3\bar{1}\bar{2})[111]$	3, 0,001	3, 0,9	3, 11	3, 71	Ф, 3, 0,07	

Продолжение таблицы 3

19. $(3\bar{1}\bar{2})[\bar{1}\bar{1}1]$	3, 51			$\Phi, 3, 0,001$		Φ
20. $(3\bar{1}2)[11\bar{1}]$		$\Phi, 3, 0,3$	$\Phi, 3, 0,001$			Φ
21. $(231)[\bar{1}1\bar{1}]$	$\Phi, 3, 0,1$			3, 1	$\Phi, 3, 21$	
22. $(\bar{2}3\bar{1})[111]$				3, 0,9	$\Phi, 3, 1$	
23. $(\bar{2}31)[11\bar{1}]$	3, 11	$\Phi, 3, 31$	Φ		3, 0,02	Φ
24. $(23\bar{1})[\bar{1}11]$	3, 11	$\Phi, 3, 1$	Φ	$\Phi, 3, 0,3$		Φ
25. $(112)[\bar{1}\bar{1}1]$	$\Phi, 3, 0,01$	3, 121			Φ	3, 0,01
26. $(\bar{1}\bar{1}2)[111]$			3, 141	3, 0,01	Φ	
27. $(\bar{1}12)[1\bar{1}1]$	3, 121		3, 0,6	Φ		Φ
28. $(1\bar{1}2)[\bar{1}11]$		$\Phi, 3, 0,01$	Φ	Φ		Φ
29. $(121)[\bar{1}1\bar{1}]$	$\Phi, 3, 0,02$				Φ	
30. $(\bar{1}2\bar{1})[111]$		3, 0,01			Φ	
31. $(\bar{1}21)[111]$		Φ	Φ		3, 0,01	Φ
32. $(12\bar{1})[\bar{1}11]$		Φ	Φ	$\Phi, 3, 0,2$		Φ
33. $(211)[1\bar{1}\bar{1}]$	Φ			3, 121		3, 0,01
34. $(2\bar{1}\bar{1})[111]$	3, 0,6		3, 121		$\Phi, 3, 0,01$	
35. $(21\bar{1})[1\bar{1}1]$	3, 141			$\Phi, 3, 0,01$	3, 121	Φ
36. $(2\bar{1}1)[11\bar{1}]$		$\Phi, 3, 0,2$	$\Phi, 3, 0,01$			$\Phi, 3, 111$

Таблица 4

Образование зоны рекомбинации при взаимодействии полных и двойниующих дислокаций

Плоскости скольжения и двойниования статического двойника	Атакующие (развивающиеся) двойники					
	Варианты пересечений					
	1	2	3	4	5	6
	$(\bar{1}\bar{1}2)[111]$	$(\bar{1}12)[1\bar{1}1]$	$(21\bar{1})[1\bar{1}1]$	$(2\bar{1}1)[11\bar{1}]$	$(211)[1\bar{1}\bar{1}]$	$(\bar{2}11)[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$
1. $(011)[\bar{1}\bar{1}1]$	$\Phi, 3, 0,06$	3, 0,3			$\Phi, 3, 0,9$	
2. $(011)[\bar{1}1\bar{1}]$	$\Phi, 3, 1$			3, 0,4	$\Phi, 3, 1$	3, 0,06
3. $(0\bar{1}1)[111]$			3, 1		Φ	
4. $(0\bar{1}1)[1\bar{1}\bar{1}]$	$\Phi, 3, 0,001$		3, 0,8	3, 0,06	3, 1	3, 0,4
5. $(101)[\bar{1}\bar{1}1]$	$\Phi, 3, 0,001$	3, 141			$\Phi, 3, 0,001$	3, 0,5
6. $(101)[1\bar{1}\bar{1}]$	Φ	3, 0,01		3, 0,3		3, 21
7. $(10\bar{1})[111]$		3, 0,5	3, 0,3		$\Phi, 3, 0,06$	
8. $(10\bar{1})[1\bar{1}\bar{1}]$	Φ				$\Phi, 3, 1$	
9. $(110)[1\bar{1}\bar{1}]$	Φ	3, 0,3		3, 141		
10. $(110)[\bar{1}1\bar{1}]$	$\Phi, 3, 0,06$			3, 0,01	Φ	
11. $(\bar{1}10)[111]$				3, 0,5	$\Phi, 3, 0,01$	
12. $(\bar{1}10)[1\bar{1}\bar{1}]$	$\Phi, 3, 0,01$	3, 0,06			$\Phi, 3, 151$	
13. $(123)[\bar{1}\bar{1}1]$	$\Phi, 3, 0,07$	3, 11			Φ	
14. $(\bar{1}\bar{2}3)[111]$		3, 71			Φ	
15. $(\bar{1}23)[1\bar{1}1]$			3, 1	$\Phi, 3, 1$	3, 0,001	$\Phi, 3, 31$
16. $(1\bar{2}3)[\bar{1}11]$		$\Phi, 3, 0,001$	Φ	$\Phi, 3, 31$		$\Phi, 3, 1$

17. (312) [111]	Ф	3, 1	3, 71	3, 11		3, 31
18. (312) [111]	3, 0,001	3, 0,9	3, 11	3, 71	Ф, 3, 0,07	
19. (312) [111]	3, 51			Ф, 3, 0,001		Ф
20. (312) [111]		Ф, 3, 0,3	Ф, 3, 0,001			Ф
21. (231) [111]	Ф, 3, 0,1			3, 1	Ф, 3, 21	
22. (231) [111]				3, 0,9	Ф, 3, 1	
23. (231) [111]	3, 11	Ф, 3, 31	Ф		3, 0,02	Ф
24. (231) [111]	3, 11	Ф, 3, 1	Ф	Ф, 3, 0,3		Ф
25. (112) [111]	Ф, 3, 0,004					3, 0,005
26. (112) [111]				3, 0,005		
27. (112) [111]	3, 119			Ф		Ф
28. (112) [111]				Ф		Ф
29. (121) [111]						
30. (121) [111]		3, 0,005				
31. (121) [111]		Ф	Ф, 3, 1			
32. (121) [111]		Ф	Ф	Ф, 3, 0,2		
33. (211) [111]						
34. (211) [111]					Ф, 3, 0,004	
35. (211) [111]				Ф, 3, 0,004	3, 119	
36. (211) [111]						

ной рекомбинации соответственно; β_1, β_2 – углы между векторами Бюргера дислокаций и осями x' и x'' . При учете изменения энергии дислокаций в зависимости от их ориентации использовали выражения [7]:

$$\begin{aligned}
 E_0 &= \sum_{i=1,2} D_i l_i [1 - \text{vcos}^2(\beta_i - \theta_i)]; \\
 E &= \sum_{i=1,2} D_i l_i [1 - \text{vcos}^2(\beta_i - \theta_i - \xi_i)] \times \\
 &\times \sqrt{1 + \chi_i^2 - 2\chi_i \cos(\theta_i - \theta_3^{(i)})} + D_3 [1 - \text{vcos}^2 \gamma_3] d; \\
 \xi_i &= \arccos \left[\frac{1 - \chi_i \cos(\theta_i - \theta_3^{(i)})}{\sqrt{1 + \chi_i^2 - 2\chi_i \cos(\theta_i - \theta_3^{(i)})}} \right]; \\
 D_i &= \frac{Gb_i^2}{2\pi(1-\nu)}; \quad D_3 = \frac{Gb_3^2}{2\pi(1-\nu)}; \quad (5)
 \end{aligned}$$

где $\chi = \frac{d}{l}$ — относительная величина зоны рекомбинации.

Соотношение (4) при отмеченных допущениях является весьма сложной функцией параметров φ , θ_3 и d . Если обозначить $\Delta E = E_0 - E$, найти соответствующие производные $\frac{\partial \Delta E}{\partial \varphi}$, $\frac{\partial \Delta E}{\partial \theta_3}$, $\frac{\partial \Delta E}{\partial d}$ и приравнять их

нулю, можно получить систему уравнений, которая определит абсолютный минимум энергии дислокации

одной конфигурации. В реальных условиях существует относительный минимум, где задается определенная первоначальная ориентация дислокаций. В этом случае параметры φ и θ_3 оказываются фиксированными, и требуется нахождения относительного минимума по d . В данной работе критическое значение величины d оценивали по формуле

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \Delta E}{\partial d} &= - \sum_{i=1}^2 D_i \cdot \times \\
 &\times \left[A \left(1 - \text{vcos}^2 \alpha_i - \sqrt{t_i} (1 - \text{vcos}^2 h_i) \right) - \ell_i \left\{ F \sqrt{t_i} + C (1 - \text{vcos} h_i) \right\} \right] - \\
 &- D_3 (1 - \text{vcos}^2 \gamma_3). \quad (6)
 \end{aligned}$$

Здесь использовались следующие обозначения: $D_i = \frac{Gb_i^2}{2\pi(1-\nu)}$;

$$A = \cos \theta_i + \frac{\sin \theta_i (R_0^i - d \cdot \sin \theta_i)}{\sqrt{d \cdot \sin \theta_i (2R_0^i - d \cdot \sin \theta_i)}};$$

$$t_i = 1 + \chi^2 - 2\chi \cos \delta_i; \quad h_i = \alpha_i - \arccos p_i;$$

$$p_i = \frac{1 - \chi \cos \delta_i}{\sqrt{t_i}}; \quad \alpha_i = \beta_i - \frac{\pi}{2} \pm \frac{\varphi}{2}; \quad \delta_i = \frac{\pi}{2} \mp \frac{\varphi}{2} - \theta_3^i;$$

$$F = \frac{Z \cdot \sin 2h_i}{\sqrt{1 - p_i^2}};$$

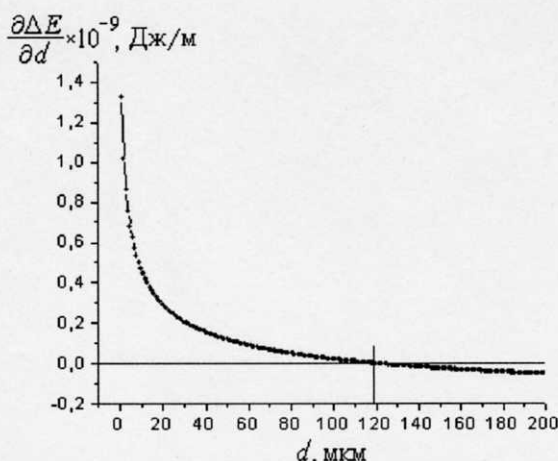


Рис. 2. Величина зоны рекомбинации для 3-го взаимодействия двойникоующих дислокаций в 1-м варианте пересечения двойников

$$Z = -\frac{1}{t_i} \left\{ l_i - A \cdot d \sqrt{t_i} \cdot \cos \delta_i + C(1 - \chi \cos \delta_i) \right\};$$

$$C = \frac{2(\chi - \cos \delta_i)(l_i - A \cdot d)}{l_i^2}; \quad \gamma_i - \text{углы между дислока-}$$

циями и их векторами Бюргерса; R_0^i – радиус дуги окружности отклоненной дислокации; $\chi = \frac{d}{l_i}$ характе-

ризует относительную величину зоны рекомбинации; l_i – зона смещения дислокаций; v – коэффициент Пуассона; G – модуль сдвига.

Получить аналитическое решение уравнения (6) не представляется возможным, поэтому оно было решено численно. Варьируя E по χ , находили χ_{min} , отвечающее минимуму энергии конфигурации. В табл. 2–4 обобщены результаты решения уравнения (6) для всех рассмотренных вариантов пересечения двойников и типов взаимодействующих дислокаций, а на рис. 2 приведено его частное графическое решение. Величина зоны рекомбинации при этом составляет ≈ 119 мкм.

Анализ решения уравнения (4) показывает, что во многих случаях дислокационные реакции протекают

далеко не всегда, несмотря на то, что критерий Франка выполняется. Например, при взаимодействии двойникоующих дислокаций восьмая дислокационная реакция во втором варианте пересечения двойников не может быть реализована, так как при данной дислокационной конфигурации не образуется зона рекомбинации (табл. 2). Существуют такие взаимные ориентации дислокаций, при которых формирование зон рекомбинации невозможно (мертвая зона).

Необходимо отметить, что рассмотренные взаимодействия пересекающихся двойников определяют лишь возможные условия для распространения вторичного двойникоования или скольжения. Для окончательного вывода необходимо исследовать условия зарождения двойникоующих дислокаций во вторичных плоскостях двойникоования.

Таким образом, при пересечении двойников в ОЦК решетке показана возможность протекания дислокационных реакций с образованием результирующих сидячих дислокаций $a\langle 100 \rangle$, которые могут привести к образованию зародыша микротрещины. Протекание дислокационных реакций ставили в зависимость от выполнения критерия Франка и возможности образования зон рекомбинации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Классен-Неклюдова М.В. Механическое двойникоование кристаллов. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 261 с.
2. Халл Д. Двойникоование и зарождение трещины в металлах с ОЦК решеткой // Разрушение твердых тел. М., 1967.
3. Priestner R. The Relationship Between Brittle Cleavage and Deformation Twinning in BCC Metals. Deformation Twinning // New York; London; Paris: Metall Soc. Conf., 1964. V. 25. P. 321-355.
4. Федоров В.А., Финкель В.М., Плотинов В.П. Образование трещин на границе зерен и двойников в цинке при охлаждении до низких температур // ФММ. 1980. Т. 49. № 2. С. 413-416.
5. Федоров В.А., Плужников С.Н., Куранова В.А. Анализ микропластичности и разрушения при пересечении двойников в ОЦК-решетке // Вестн. ТГУ. Сер. Естеств. и технич. науки. Тамбов, 2000. Т. 5. Вып. 2-3. С. 387-389.
6. Миркин Л.И. Физические основы прочности и пластичности. М.: Изд-во МГУ, 1968. 538 с.
7. Предводителев А.А., Троицкий О.А. Дислокации и точечные дефекты в гексагональных металлах. М.: Атомиздат, 1973. 201 с.
8. Орлов А.Н. Введение в теорию дефектов в кристаллах. М.: Вышш. шк., 1983. 144 с.

Поступила в редакцию 25 декабря 2001 г.