

УСЛОВИЕ РАВНОВЕСИЯ ОСТАТОЧНОГО КЛИНОВИДНОГО НАНОДВОЙНИКА В ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ ОТ НАГРУЗКИ

Василевич Ю. В., Остриков О. М.

*Белорусский национальный технический университет, Минск
Белорусский государственный университет транспорта, Гомель*

Введение. Впервые явление нанодвойникового экспериментально было обнаружено в работе [1]. В работах [2–9] предложена первая модель нанодвойника, которая позволила рассчитать обусловленное им напряженно-деформированное состояние [4; 6; 9], его собственную [2] и полную [5] энергию, энергию взаимодействия двойникующих дислокаций нанодвойника [8], а также вывести условие равновесия наноразмерных зародышей двойников [3] и определить их равновесные параметры [7]. В работе [10] впервые была решена динамическая задача для развивающегося нанодвойника клиновидной формы. Важное практическое значение имеют решенные в [11–13] задачи по расчету напряженно-деформированного состояния у нанодвойника при наличии в нем точечного источника расширения [11] и в системе «клиновидный нанодвойник – полная дислокация» [12; 13]. Полученные результаты были обобщены в монографиях [14; 15] в сопоставлении с результатами исследований микродвойников.

Следующим шагом в исследованиях нанодвойникового стало теоретическое обоснование возможности создания нанодвойникового композита [16], обусловленного показанной в [17] возможностью формирования в нанодвойниках наноразмерных фаз.

В настоящее время явление нанодвойникового стало предметом активных исследований [18–25].

Цель данной работы – вывод условия равновесия остаточного клиновидного нанодвойника, находящегося в поле напряжений от нагрузки.

Постановка задачи.

Рассмотрим клиновидный нанодвойник, расположенный в кристалле вдали от поверхности (рисунок 1). Пусть вершина нанодвойника находится на оси OX декартовой системы координат в точке с координатами $(L, 0)$. Также допустим, что перемещение вершины двойника имеет одну степень свободы – вдоль оси OX . Не будем учитывать напряжения, обусловленные двойникующими дислокациями устья двойника.

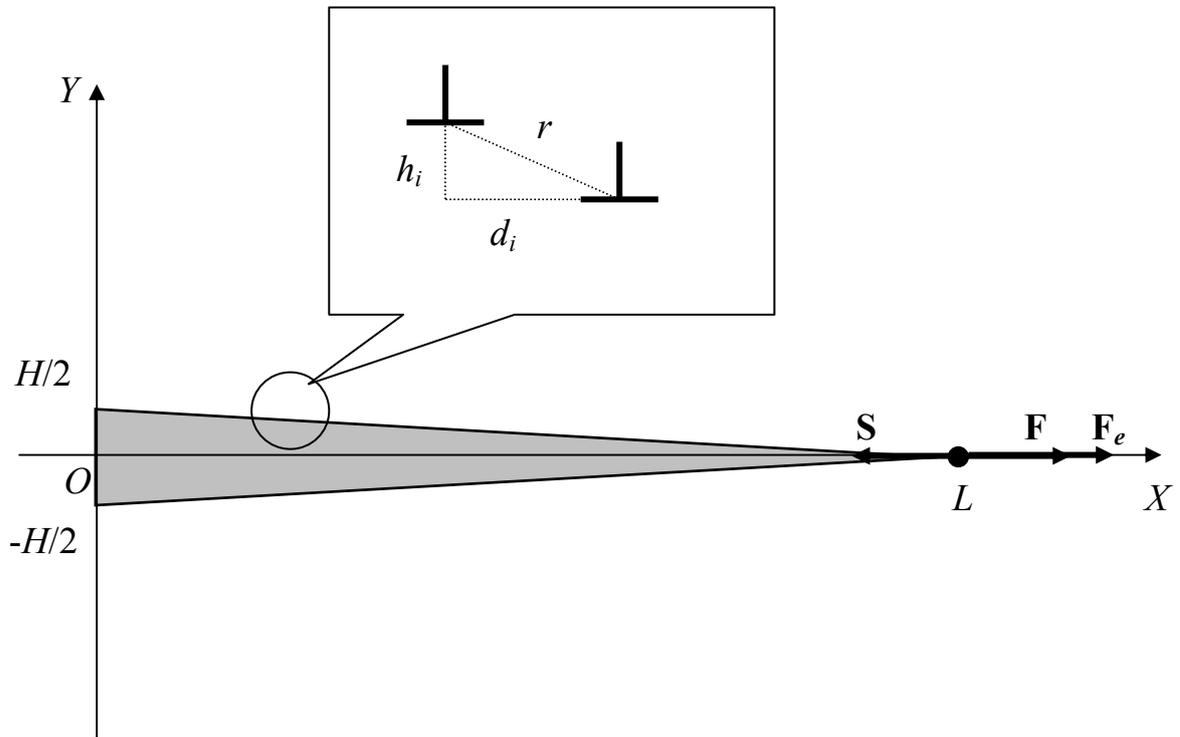


Рис. 1. Схематическое изображение нанодвойника клиновидной формы и сил, действующих на его вершинную дислокацию

Тогда в нагруженном кристалле в условиях статического равновесия баланс сил, действующих на вершинную двойникующую дислокацию можно записать в следующем виде:

$$F_e + F - S = 0, \quad (1)$$

где представлены проекции на ось OX сил: F_e – действующей со стороны нагрузки, F – действующей со стороны двойникующих дислокаций, находящихся на границах двойника, и силы S неупругой природы, препятствующей перемещению вершинной дислокации.

Как и в [26; 27], равенство (1) представим в виде:

$$b_{кр} \sigma_{xy}^e(L,0) + b_{в} \sigma_{yz}^e(L,0) + b_{кр} \sigma_{xy}(L,0) + b_{в} \sigma_{yz}(L,0) - S(L,0) = 0, \quad (2)$$

где $b_{кр}$ и $b_{в}$ – модули краевой и винтовой составляющих вектора Бюргера двойникующей дислокации, соответственно;

$\sigma_{xy}^e(L,0)$ и $\sigma_{yz}^e(L,0)$ – напряжения в точке с координатами $(L, 0)$, обусловленные нагрузкой;

$\sigma_{xy}(L,0)$ и $\sigma_{yz}(L,0)$ – сдвиговые напряжения в этой же точке, обусловленные двойникующими дислокациями.

Результаты и их обсуждение. Примем

$$\sigma_{xy}^e(L,0) = f_{xy}(L) \text{ и } \sigma_{yz}^e(L,0) = f_{yz}(L), \quad (3)$$

где $f_{xy}(L)$ и $f_{yz}(L)$ – функции, зависящие от величины и типа нагрузки.

Для $\sigma_{xy}(L,0)$ и $\sigma_{yz}(L,0)$ по аналогии с [27] запишем:

$$\sigma_{xy}(L,0) = \frac{\mu b_{\text{кр}}}{2\pi(1-\nu)} \left\{ \sum_{n=1}^N \frac{(L - nd_1)[(L - nd_1)^2 - (nh_1)^2]}{[(L - nd_1)^2 + (nh_1)^2]^2} + \sum_{m=1}^M \frac{(L - md_2)[(L - md_2)^2 - (mh_2)^2]}{[(L - md_2)^2 + (mh_2)^2]^2} \right\} \quad (4)$$

$$\sigma_{yz}(L,0) = -\frac{\mu b_{\text{в}}}{2\pi} \left\{ \sum_{n=1}^N \frac{L - nd_1}{(L - nd_1)^2 + (nh_1)^2} + \sum_{m=1}^M \frac{L - md_2}{(L - md_2)^2 + (mh_2)^2} \right\}, \quad (5)$$

где μ – модуль сдвига;

ν – коэффициент Пуассона;

N и M – число двойникующих дислокаций на верхней и нижней границах нанодвойника, соответственно;

n и m – индексы суммирования;

L – длина нанодвойника;

d_1 , d_2 и h_1 , h_2 – соответственно проекции на ось OX и OY отрезка r , соединяющего две соседние дислокации границы двойника (рисунок 1). Индексы 1 и 2 указывают принадлежность к верхней или нижней границе нанодвойника.

В частном случае при $N = M$, $d_1 = d_2 = d$, $h_1 = h_2 = h$, формулы (4) и (5) сводятся к виду:

$$\sigma_{xy}(L,0) = \frac{\mu b_{\text{кр}}}{\pi(1-\nu)} \sum_{n=1}^N \frac{(L - nd)[(L - nd)^2 - (nh)^2]}{[(L - nd)^2 + (nh)^2]^2}, \quad (6)$$

$$\sigma_{yz}(L,0) = -\frac{\mu b_{\text{в}}}{\pi} \sum_{n=1}^N \frac{L - nd}{(L - nd)^2 + (nh)^2}. \quad (7)$$

Введем параметр H , определяющий ширину клиновидного нанодвойника у его устья (рисунок 1). Тогда справедливы равенства:

$$d = L/N, \quad (8)$$

$$h = H/2N. \quad (9)$$

Подстановка (8) и (9) в (6) и (7), а затем в (2) дает

$$\frac{\mu b_{\text{кр}}^2 L}{\pi(1-\nu)} \sum_{n=1}^N \frac{N(N-n) \left[L^2(N-n)^2 - \frac{1}{4} n^2 H^2 \right]}{\left[L^2(N-n)^2 + \frac{1}{4} n^2 H^2 \right]^2} - \frac{\mu b_{\text{в}}^2 NL}{\pi} \sum_{n=1}^N \frac{(N-n)}{L^2(N-n)^2 + \frac{1}{4} n^2 H^2} + b_{\text{кр}} f_{xy}(L) + b_{\text{в}} f_{yz}(L) = S. \quad (10)$$

Из данного соотношения видно, что при увеличении длины нанодвойника для обеспечения статически равновесной его клиновидной необходимы более высокие значения сил неупругой природы. Эти силы возрастают с увеличением нагрузки на кристалл.

Заключение. Таким образом, получено условие равновесия клиновидного нанодвойника, находящегося вдали от поверхности кристалла в поле напряжений от нагрузки. Выявлено, что для обеспечения большей равновесной длины двойников необходимы более высокие значения сил неупругой природы. Значения этих сил должны быть более высокими при увеличении механической нагрузки на кристалл.

ЛИТЕРАТУРА

1. Остриков, О. М. Нанодвойникование монокристаллов висмута / О. М. Остриков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2002. – № 3. – С. 51–52.
2. Остриков, О. М. Расчет на основании мезоскопической дислокационной модели собственной энергии клиновидного двойника / О. М. Остриков // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2007. – Т. 12, № 2. – С. 22–24.
3. Остриков, О. М. Условие равновесия наноразмерных зародышей двойников / О. М. Остриков // Вестник БНТУ. – 2007. – № 2. – С. 26–28.
4. Остриков, О. М. Дислокационная модель нанодвойника / О. М. Остриков // Известия РАН. Сер. Механика твердого тела. – 2008. – № 5. – С. 124–129.
5. Остриков, О. М. Расчет энергии нанодвойника клиновидной формы в рамках дислокационной мезоскопической модели / О. М. Остриков // Журнал технической физики. – 2008. – Т. 78, № 2. – С. 58–62.

6. Остриков, О. М. Расчет деформаций у вершины клиновидного двойника на основании мезоскопической дислокационной модели / О. М. Остриков // Веснік Магілеўскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А. А. Куляшова. Серыя В. Прыродазнаўчыя навукі: матэматыка, фізіка, біялогія. – 2008. – № 1(29). – С. 166–175.

7. Остриков, О. М. Определение на основании мезоскопической дислокационной модели равновесных параметров клиновидного двойника при отсутствии внешних напряжений / О. М. Остриков // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2009. – № 4. – С. 66–70.

8. Остриков, О. М. Расчет энергии взаимодействия двойникоующих дислокаций клиновидного двойника, проведенный на основании мезоскопической дислокационной модели / О. М. Остриков // Инженерно-физический журнал. – 2009. – Т. 82, № 6. – С. 1199–1203.

9. Василевич, Ю. В. Расчет полей смещений и деформаций у клиновидного двойника на основании мезоскопической дислокационной модели / Ю. В. Василевич, О. М. Остриков // Вестник БНТУ. – 2011. – № 4. – С. 52–55.

10. Остриков, О. М. Мезоскопическая дислокационная модель развивающегося клиновидного двойника / О. М. Остриков // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2010. – № 3(42) – С. 3–8.

11. Остриков, О. М. Напряженное состояние у наноразмерного двойникового зародыша при наличии внутри него точечного источника расширения / О. М. Остриков // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2010. – № 1(40). – С. 16–22.

12. Остриков, О. М. Использование дислокационной мезоскопической модели для расчета полей смещений и деформаций в системе «клиновидный нанодвойник – полная дислокация» / О. М. Остриков // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. – 2011. – № 12. – С. 77–85.

13. Остриков, О. М. Использование дислокационной мезоскопической модели для расчета полей напряжений, относительной объемной дилатации и сил взаимодействия в системе «клиновидный нанодвойник – полная дислокация» / О. М. Остриков // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2012. – Т. 17, № 2. – С. 7–16.

14. Остриков, О. М. Механика двойникования твердых тел. Монография / О. М. Остриков. – Гомель : Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2008. – 301 с.

15. Остриков, О. М. Методика прогнозирования распределения полей напряжений в реальных кристаллах с остаточными некогерентными двойниками. Монография / О. М. Остриков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – 278 с.

16. Остриков, О. М. Дислокационная модель нанодвойникового композита / О. М. Остриков // Веснік Магілеўскага дзяржаўнага ўніверсітэта

імя А. А. Куляшова. Серія В. Природознавчі науки: математика, фізика, біологія. – 2013. – № 1(41). – С. 35–46.

17. Остриков, О. М. Формирование наноразмерных фаз в нанодвойниках / О. М. Остриков // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2006. – № 3. – С. 3–7.

18. Deformation twins in nanocrystalline Al / X. Z. Liao, F. Zhou, E. J. Lavernia [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2003. – V. 83, № 24. – P. 5062–5064.

19. Waitz, T. Size-dependent martensitic transformation path causing atomic-scale twinning of nanocrystalline NiTi shape memory alloys / T. Waitz, D. Spisak, J. Hafner // Europhys. Lett. – 2005. – V. 71, № 1. – P. 98–103.

20. Wu, Xiao-Lei. Deformation twinning mechanisms in nanocrystalline Ni / Xiao-Lei Wu, En Ma // Appl. Phys. Lett. – 2006. – V. 88, № 6. – P. 1–3.

21. Twinning in nanocrystalline Ni by severe plastic deformation / X. Y. Feng, Z. Y. Cheng, X. Wu [et al.] // J. Phys. D. – 2006. – V. 39, № 4. – P. 746–749.

22. Гуткин, М. Ю. Механизм образования деформационных двойников в нанокристаллических материалах / М. Ю. Гуткин, И. А. Овидько, Н. В. Скиба // Физика твердого тела. – 2007. – Т. 49, № 5. – С. 830–838.

23. Рушиц, С. В. Нанодвойникование мартенситных кристаллов и теория адаптивных фаз / С. В. Рушиц, В. Л. Ильичев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2008. – Вып. 11, № 24 (124). – С. 44–46.

24. Ovid'ko, I. A. Effect of twin boundary migration on fracture toughness of nano-twinned metals / I. A. Ovid'ko, A. G. Sheinerman // Materials Physics and Mechanics. – 2014. – V. 21, № 21. – P. 248–258.

25. Ovid'ko, I. A. Nucleation of deformation nanotwins at grain boundaries containing disclinations in nanomaterials / I. A. Ovid'ko, N. V. Skiba // Materials Physics and Mechanics. – 2014. – V. 21, № 22. – P. 288–298.

26. Косевич А. М., Пастур Л. А. О дислокационной модели двойникования / А. М. Косевич, Л. А. Пастур // Физика твердого тела. – 1961. – Т. 3, № 4. – С. 1291–1297.

27. Василевич, Ю. В. Условие равновесия остаточного краевого клиновидного нанодвойника в постдеформированном твердом теле / Ю. В. Василевич, О. М. Остриков // Наука и техника. – 2017. – Т. 16, № 4. – С. 335–342.

Поступила: 10.03.2024