

УДК 539.3

*Н. М. СИМАНОВИЧ<sup>1</sup>, О. М. ОСТРИКОВ<sup>2</sup>, М. П. КУЛЬГЕЙКО<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Гомель, Беларусь*

*<sup>2</sup>Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь*

## **ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБЛАСТИ РАСПОЛОЖЕННОГО У ПОВЕРХНОСТИ СЕРПОВИДНОГО ДВОЙНИКА, К КОТОРОМУ ПРИЛОЖЕНА РАСПРЕДЕЛЕННАЯ НАГРУЗКА**

Представлен анализ конфигурации полей напряжений в области серповидного двойника, находящегося у поверхности твердого тела, для случая действия на него распределенной нагрузки. Дана сравнительная оценка напряженного состояния для двойника серповидной формы и клиновидного двойника. Рассмотрены особенности полей напряжений вдоль искривленных границ двойниковой прослойки.

**Ключевые слова:** механическое двойникование, клиновидный двойник, серповидный двойник, граница двойника, напряженно-деформированное состояние.

**Введение.** Двойникование, как один из механизмов пластического деформирования, наблюдается при различных способах нагружения двойникующихся материалов [1–3] как при низких температурах и больших скоростях деформирования, так и в процессе скольжения при статическом или динамическом нагружении [2]. Наличие двойников приводит к появлению значительных внутренних напряжений, в результате чего создается микроструктура, склонная к хрупкому разрушению [4–6]. При расположении двойника у поверхности твердого тела, находящейся под действием механической нагрузки, в материале создается сложнапряженное состояние, которое определяется как особенностями приложения нагрузки, так и характером образования двойниковых границ [3].

Генерация двойникующих дислокаций, реализующаяся в соответствии с кристаллографическими направлениями кристаллической решетки, приводит к образованию двойников с прямолинейными границами. Существующие дефекты кристаллической структуры представляют собой препятствия для движения дислокаций и их тормозят. Неравномерное распределение двойникующих дислокаций на границах двойника приводит к искривленной форме этих границ [3].

Одна из особенностей двойникования при скрайбировании поверхности индентором связана с образованием серповидных двойников [7]. При экспериментальных исследованиях наблюдались следующие варианты формы границ двойников: выпуклая и вогнутая с изломом; вогнутая и прямая; вогнутая и выпуклая – дугообразные; две вогнутые границы (с минимальным углом раствора при вершине) и т. п.

В работах [8, 9] получено распределение напряжений вблизи поверхности, к которой приложена распределенная нормальная и тангенциальная нагрузка, при наличии двойника с прямолинейными границами. В статье [10] определены поля напряжений в областях расположения двойников с криволинейными границами, а также рассмотрены варианты, при которых одна из границ двойника остается прямолинейной, а внешнее воздействие на твердое тело отсутствует.

В реальных условиях при скрайбировании поверхности кристалла индентором Виккерса в произвольном направлении образуются двойники серповидной формы с двумя криволинейными границами, одна из которых выпуклая, а другая – вогнутая. Интерес представляют поля напряжений вблизи такого двойника, находящегося у поверхности кристалла, для случая действия внешней распределенной нагрузки, определение которых стало целью настоящей работы.

**Постановка задачи.** Анализ полей напряжений в области серповидного двойника выполнялся путем сравнения с распределением напряжений для клиновидного двойника, имеющего прямолинейные границы. На рисунке 1 представлены схемы двойников, имеющих одинаковую длину  $L$  и ширину  $H$  у устья. На участке поверхности  $-m \leq x \leq n$  приложено равномерно распределённое нормальное давление  $p(x)$ .

Принято, что выпуклая и вогнутая границы серповидного двойника описываются соответственно функциями:

$$y = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{\pi}{2L} x\right); \quad y = -\frac{H}{2} \left(\frac{x}{L} - 1\right)^2.$$

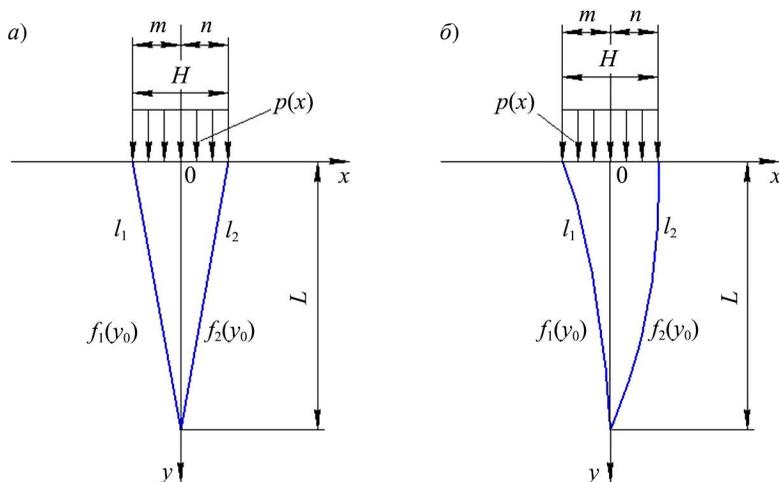


Рисунок 1 – Схема деформирования двойника:  
 а – с прямолинейными границами; б – серповидной формы

Результирующие напряжения определяются как сумма напряжений от двойника  $\sigma_{ij}^{дб}(x, y)$  и внешних сил  $\sigma_{ij}^p(x, y)$  [3, 10]:

$$\sigma_{ij}(x, y) = \sigma_{ij}^{дб}(x, y) + \sigma_{ij}^p(x, y),$$

причем напряжения, создаваемые двойником, в соответствии с [10]

$$\sigma_{ij}^{дб}(x, y) = \sigma_{ij}^{(1)}(x, y) + \sigma_{ij}^{(2)}(x, y),$$

где  $\sigma_{ij}^{(1)}(x, y)$ ,  $\sigma_{ij}^{(2)}(x, y)$  – напряжения, создаваемые каждой из границ.

Определение напряженного состояния в зоне двойника осуществлялось по аналогии с распределением сдвиговых напряжений  $\sigma_{xy}$  согласно методике, приведенной в [10, 11]. При расчетах по аналогии с работами [8, 9] принято  $H = 20$  мкм и  $L = 80$  мкм.

**Результаты и их обсуждение.** Предварительно сравним напряжения, создаваемые двойниками с прямолинейными границами и серповидным при отсутствии внешнего воздействия. На рисунках 2, 3 представлены соответствующие картины распределения напряжений  $\sigma_{xy}$ .

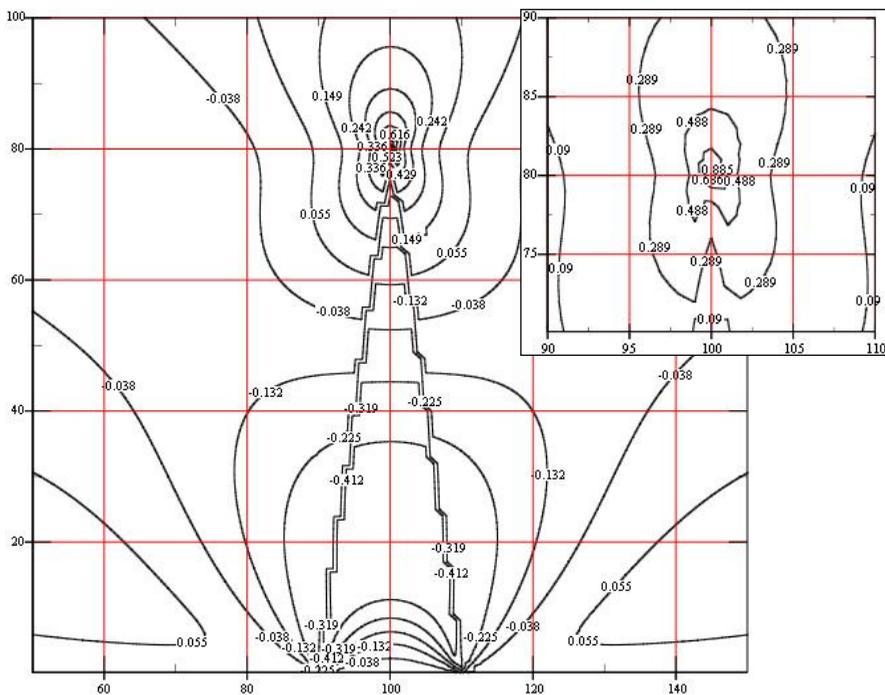


Рисунок 2 – Напряжения  $\sigma_{xy}$  (МПа) для двойника с прямолинейными границами при отсутствии нагрузки

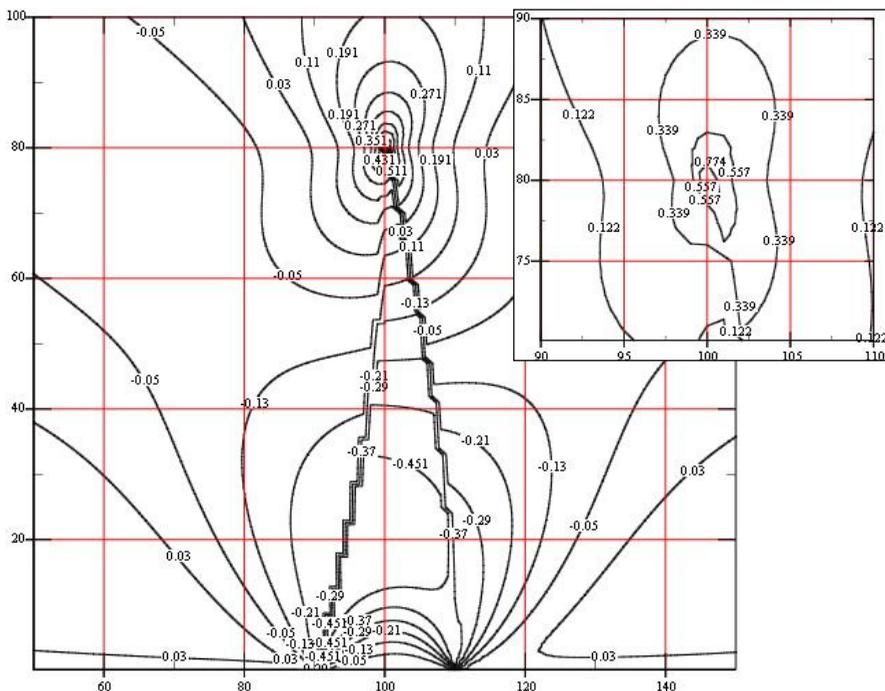


Рисунок 3 – Напряжения  $\sigma_{xy}$  (МПа) для двойника с криволинейными границами при отсутствии внешней нагрузки

Конфигурация полей напряжений в области двойника с прямолинейными границами закономерно симметрична относительно плоскости двойникова-ния. Наблюдается концентрация напряжений вдоль двойниковых границ, причем на расстоянии около  $3/4$  длины двойника от поверхности знак напряжений изменяется. Возле устья двойника в приповерхностном слое наблюдается концентрация напряжений, в том числе в середине двойнико-вой прослойки на расстоянии  $1/4$  длины двойника (около 20 мкм) от поверх-ности. Напряжения максимальны у вершины двойника, где их абсолютные значения в 2 раза больше, чем у основания двойника на его границах.

Конфигурация поля напряжения для двойника серповидной формы отлича-ется некоторой асимметрией относительно плоскости двойникова-ния (см. рисунок 3). Несимметричность напряжений наблюдается по границам двой-ника, внутри двойниковой прослойки и с наружной стороны двойника вблизи его границ. У вогнутой границы наблюдаются несколько меньшие значе-ния напряжений, а справа от выпуклой – большие. При удалении от двойни-ковых границ схемы полей напряжений приобретают симметричность, а численные значения напряжений соответствуют случаю прямолинейного двойника. Максимальная концентрация напряжений, как и у прямолинейно-

го двойника, наблюдается на границах в области устья, вблизи поверхности внутри двойниковой прослойки и у вершины двойника.

На рисунке 4 представлена картина распределения полей напряжений для клиновидного двойника с прямолинейными границами в случае действия на его поверхность равномерно распределенной нагрузки  $p(x) = 6 \text{ Н/м}$ .

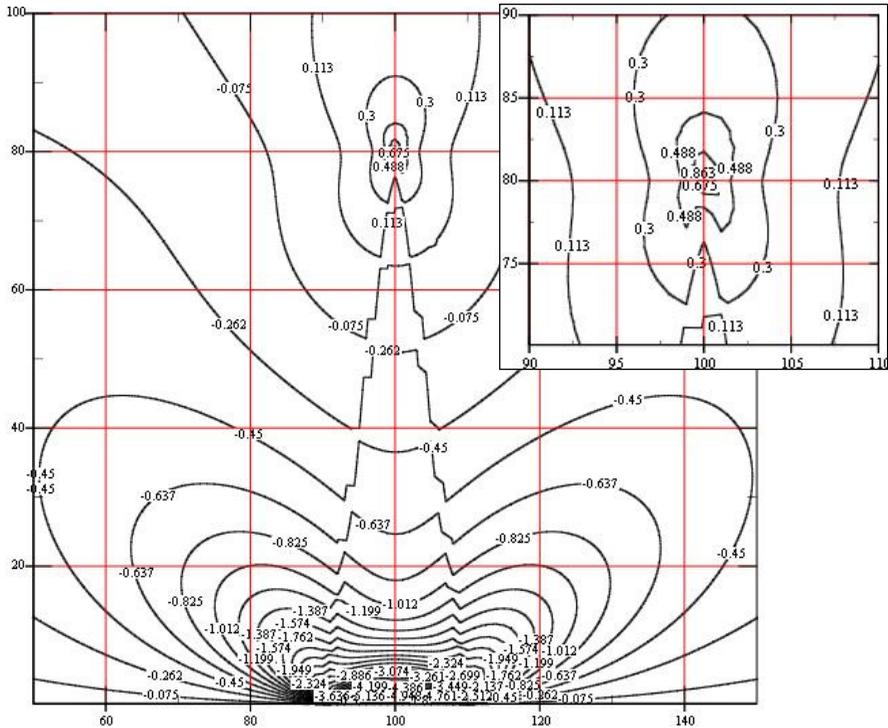


Рисунок 4 – Напряжения  $\sigma_{xy}$  (МПа) для двойника с прямолинейными границами при действии на его поверхность распределенной нагрузки

Как и при отсутствии внешней нагрузки, схема симметрична относительно плоскости двойникования. При этом напряжения вблизи поверхности, а также на границах двойника в области устья возрастают более чем в 10 раз. Значительный уровень напряжений сохраняется на глубине до 1/4 длины двойника (до 20 мкм от поверхности). Далее значения напряжений достаточно быстро убывают, однако на глубине 3/4 длины двойника они в 3 раза превышают напряжения, возникающие при отсутствии внешней нагрузки. Смена знака напряжений происходит ближе к вершине двойника. В результате наложения напряжений разного знака от нагрузки и двойника их значения у вершины двойника меньше, чем при отсутствии внешней нагрузки. Таким образом, в области вершины двойника имеет место компенсация напряжений.

Аналогичная ситуация наблюдается в области серповидных двойников как при действии нормальной распределенной нагрузки (рисунок 5) и при ее отсутствии (см. рисунок 3).

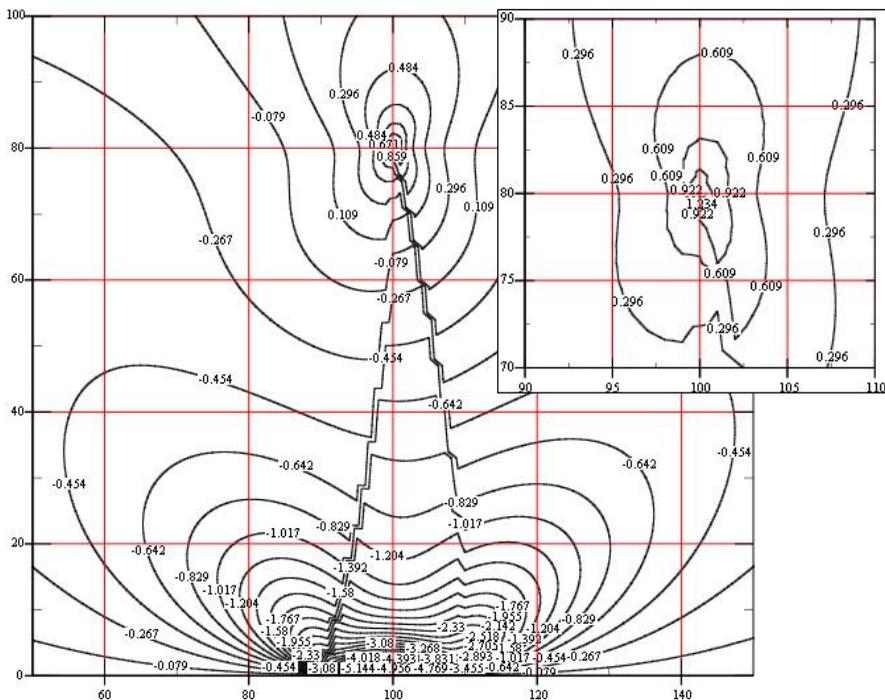


Рисунок 5 – Напряжения  $\sigma_{xy}$  (МПа) для серповидного двойника при действии на его поверхность распределенной нагрузки

Так же как и у двойника с прямолинейными границами под нагрузкой (см. рисунок 4), отмечается значительное возрастание напряжений вблизи поверхности и быстрое их убывание по глубине. Аналогично серповидному двойнику при  $p(x) = 0$ , более высокий уровень напряжений наблюдается на выпуклой границе и несколько меньший – в области вогнутой (см. рисунок 3), однако эта разница менее выраженная, чем при отсутствии внешней нагрузки. Поскольку внешнее воздействие создает в материале симметричное поле напряжений и при  $p(x) = 6$  Н/м его влияние значительно превосходит напряжения от двойника, то асимметрия полей напряжений менее выражена, чем при отсутствии нагрузки. В результате при удалении от границ двойника наблюдается практически симметричная конфигурация поля напряжений.

**Заключение.** Таким образом, установлено, что наличие серповидных двойников приводят к несимметричному полю напряжений  $\sigma_{xy}$  вдоль двой-

никовых границ и практически симметричному в удалении от них. Вблизи границ двойника серповидной формы наблюдается более интенсивный градиент напряжений по сравнению с двойником с прямолинейными границами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Бойко, В. С.** Обратимая пластичность кристаллов / В. С. Бойко, Р. И. Гарбер, А. М. Косевич. – М. : Наука, 1991. – 279 с.
- 2 **Федоров, В. А.** Дислокационные механизмы разрушения двойникоующихся металлов / В. А. Федоров, Ю. И. Тялин, В. А. Тялина. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 336 с.
- 3 **Остриков, О. М.** Механика двойникоования твердых тел / О. М. Остриков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 301 с.
- 4 **Финкель, В. М.** Разрушение кристаллов при механическом двойникоовании / В. М. Финкель, В. А. Федоров, А. П. Королев. – Ростов н/Д, 1990. – 172 с.
- 5 **Cerv, J.** Transonic twinning from the crack tip / J. Cerv, M. Landa, A. Machova // Scripta Materialia. – 2000. – Vol. 43, is. 5. – P. 423–428.
- 6 Mechanism of twinning induced plasticity in austenitic lightweight steel driven by compositional complexity / Z. H. Lai [et al.] // Acta Materialia. – 2021. – Vol. 210. – Article 116814. – 12 p.
- 7 **Кульгейко, Н. М.** Особенности двойникоования монокристалла висмута при скрайбировании его поверхности (111) индентором Виккерса / Н. М. Кульгейко, О. М. Остриков // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2015. – № 2 (61). – С. 42–50.
- 8 **Симанович, Н. М.** Определение полей напряжений от действия распределенной нагрузки при наличии у поверхности клиновидного двойника / Н. М. Симанович, О. М. Остриков, М. П. Кульгейко // Вестник БрГТУ. – 2021. – № 2 (125). – С. 66–69.
- 9 **Симанович, Н. М.** Определение полей напряжений от действия нормальной и касательной распределенной нагрузки при наличии у поверхности клиновидного двойника / Н. М. Симанович, О. М. Остриков // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2021. – № 3. – С. 5–12.
- 10 **Остриков, О. М.** Методика прогнозирования распределения полей напряжений в реальных кристаллах с остаточными некогерентными двойниками / О. М. Остриков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – 278 с.
- 11 **Джонсон, К.** Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М. : Мир, 1989. – 510 с.

*N. M. SIMANOVICH<sup>1</sup>, O. M. OSTRIKOV<sup>2</sup>, M. P. KULGEYKO<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Belarus*

<sup>2</sup>*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus*

#### STRESS FIELDS IN THE REGION LOCATED NEAR THE SURFACE OF A CRUCLE-SHAPED TWIN UNDER AN APPLIED DISTRIBUTED LOAD

An analysis of the stress fields configuration in the region of a crescent-shaped twin located near a solid body surface is presented for the case of a distributed load acting on it. A comparative assessment of the stress state for a crescent-shaped twin and a wedge-shaped twin is given. The features of stress fields along the curved boundaries of the twin layer are considered.

**Keywords:** mechanical twinning, wedge-shaped twin, sickle-shaped twin, twin boundary, stress-strain state.

Получено 12.10.2022