

DOI: 10.53078/20778481\_2023\_3\_95

УДК 539.21

**Н. М. СИМАНОВИЧ<sup>1</sup>**

**О. М. ОСТРИКОВ<sup>2</sup>**, канд. физ.-мат. наук

**М. П. КУЛЬГЕЙКО<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, доц.

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

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

## **ИЗМЕНЕНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБЛАСТИ СЕРПОВИДНОГО ДВОЙНИКА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЙСТВИЯ ВНЕШНЕЙ ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАГРУЗКИ**

### **Аннотация**

Представлен анализ напряженного состояния в области серповидного двойника, находящегося у поверхности твердого тела в условиях внешнего механического воздействия на поверхность. Рассмотрены варианты изменения конфигурации полей напряжений в зависимости от направления тангенциальной распределенной нагрузки относительно криволинейных двойниковых границ.

### **Ключевые слова:**

деформационное двойникование, серповидный двойник, напряженное состояние, поле напряжений.

### **Для цитирования:**

Симанович, Н. М. Изменение конфигурации полей напряжений в области серповидного двойника в зависимости от направления действия внешней тангенциальной распределенной нагрузки / Н. М. Симанович, О. М. Остриков, М. П. Кульгейко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 3 (80). – С. 95–103.

### **Введение**

Одним из путей повышения надежности и долговечности деталей машин является формирование их рабочих поверхностей с заданными функциональными свойствами. Перспективное направление модификации поверхности представляют многочисленные способы напыления слоя упрочняющего материала, а также другие технологии создания поверхностных пленок. Применение покрытий обеспечивает увеличение износостойкости, контактной прочности, повышение коррозионной стойкости, жаропрочности и других свойств, обеспечивающих работоспособность деталей и узлов в самых неблагоприятных условиях эксплуатации. Качество рабочих поверхностей таких деталей характеризуется совокупностью свойств

сформированной (обработанной) собственно поверхности и слоя материала под ней [1–3].

Упрочняющие покрытия имеют, как правило, резко выраженную границу с основой (подложкой). В связи с этим повышенное внимание уделяется подготовке поверхности подложки для обеспечения адгезии покрытия. Некоторые технологии упрочнения предполагают обработку поверхностного слоя после нанесения покрытия, другие комбинированные способы упрочнения включают предварительную механическую обработку поверхности [2, 3]. В качестве предварительных и окончательных операций обработки поверхности применяются различные методы, в том числе механические способы обработки, например, шлифование, полирование, алмазное выглаживание, виб-

ровыглаживание и др.

Процессы механической обработки обуславливают формирование в поверхностном слое металла дислокационной структуры [4]. Характер этой структуры зависит от многих факторов, в том числе от типа кристаллической решетки, степени пластической деформации, дефектов кристаллического строения и т. д. В двойникующихся материалах в результате тонкого механического воздействия, сопоставимого по степени деформации со скрайбированием поверхности индентором [5], дислокационная структура может проявляться в виде образования механических клиновидных двойников.

Процесс пластической деформации сопровождается возрастанием средней плотности дислокаций, что, в свою очередь, приводит к упрочнению материала, увеличению его твердости, повышению сопротивления пластической деформации, а твердость материала пропорциональна напряжениям, действовавшим в процессе деформации [6]. Повышение уровня прочности металлов происходит как за счет увеличения количества дислокаций, так и в результате их блокировки внутренними дислокационными барьерами, в том числе такими поверхностными дефектами, как скопления дислокаций и двойниковые границы, и другими комбинациями линейных дефектов [4].

Возникающие дислокации создают в кристаллической решетке упругие поля напряжений, которые усиливаются при взаимодействии дислокаций. В результате увеличения количества дислокаций, формирования их скоплений создаются достаточно большие напряжения, которые в совокупности с внешними нагрузками могут приводить к образованию микротрещин [3, 4]. Следовательно, превышение предельной плотности дислокаций в области действия внешнего силового фактора приводит к разрушению материала и выходу избыточных дислокаций в образовавшиеся

микротрещины.

В переходном слое покрытия имеются участки с ослабленными связями – места загрязнений и окисления, поры и т. п. Реальные поверхности всегда имеют дефекты поверхности в виде краевых и винтовых дислокаций как результат сдвига материала [7]. Локализуясь на поверхности, они создают геометрические неоднородности и формируют дислокационный рельеф шероховатости поверхностного слоя.

Дефекты поверхности в подложке по сути являются микротрещинами, способными к распространению при наложении внешних нагрузок и действии остаточных напряжений по механизмам хрупкого или усталостного разрушения. Таким образом, факторы формирования дислокационной структуры двойниковых прослоек и создания полей напряжений от внешнего механического воздействия в совокупности могут привести к образованию микротрещин и разрушению материала.

Если рассматривать процесс скрайбирования [8–10] поверхности индентором как имитацию единичного акта технологического воздействия лезвия режущего инструмента на обрабатываемую поверхность, то представляется возможным оценить результат контактного взаимодействия элементов системы. Принятое сопоставление позволяет на основе аналогии процессов выявить закономерности формирования напряженного состояния в приповерхностной области двойникующегося материала подложки и (или) покрытия.

Механическое двойникование при скрайбировании поверхности индентором характеризуется образованием двойников с криволинейными границами. Особенно ярко это проявляется при перемещении индентора в направлении, отличном от кристаллографического направления кристаллической решетки материала твердого тела [10]. Образование серповидных двойников обусловлено не только дефектами кристалличе-

ской структуры, но и искажениями кристаллической решетки у границ царапины в результате пластической деформации материала под действием перемещающегося индентора [8, 10].

В ранее выполненных исследованиях [11, 12] проведен сравнительный анализ распределения напряжений в области серповидного двойника, находящегося у поверхности твердого тела под действием нормальной распределенной нагрузки, в сопоставлении с двойником с прямолинейными границами. В связи с актуальностью обозначенных в работе задач представляет практический интерес установить характер изменения полей напряжений вдоль границ серповидных двойников при касательном внешнем воздействии различного направления.

Целью работы является определение полей напряжений в области серпо-

видного двойника, находящегося у поверхности твердого тела, при перемене направления воздействия распределенной тангенциальной нагрузки.

### Постановка задачи и методика ее решения

На рис.1 схематично представлен серповидный двойник длиной  $L$  и шириной  $H$  у устья с криволинейными границами, одна из которых выпуклая, описываемая функцией  $f_1(y_0)$ , другая – вогнутая, описываемая функцией  $f_2(y_0)$ :

$$y = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{\pi}{2L}x\right);$$

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

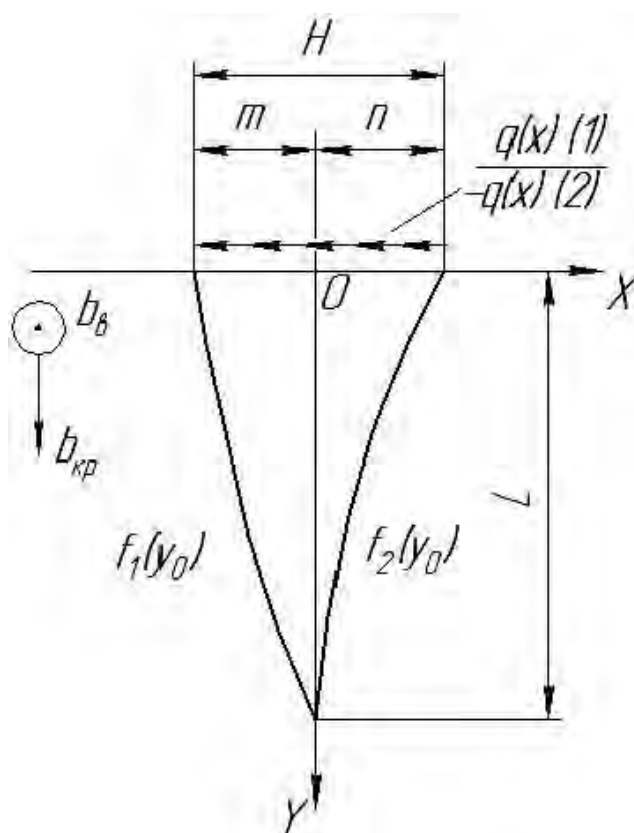


Рис. 1. Схематичное изображение двойника с изменением (1) и (2) направления действия тангенциальной распределенной нагрузки

На участке поверхности  $(-m \leq x \leq n)$  в области двойника действует касательная распределенная нагрузка  $q(x)$ . При этом рассмотрим два варианта: в первом варианте – внешнее воздействие направлено в сторону выпуклой границы двойника, во втором – в сторону вогнутой границы, т. е. при действии  $-q(x)$ .

Результирующее напряжение в области двойника определяется в соответствии с принципом суперпозиции как сумма напряжений от двойника и внешнего усилия [13], т. е.

$$\sigma_{ij}^{\Sigma}(x, y) = \sigma_{ij}^{\partial g}(x, y) + \sigma_{ij}^p(x, y),$$

где  $\sigma_{ij}^{\partial g}(x, y)$  – напряжения, создаваемые двойником;  $\sigma_{ij}^p(x, y)$  – напряжения от внешней равномерно распределенной на участке касательной нагрузки.

Расчет напряженного состояния в области двойника и определение конфигурации полей напряжений осуществлялись по методике [14, 15]. Принимая во внимание выводы [16] о том, что наиболее существенное влияние поверхности на конфигурацию полей напряжений оказывается в случае скалывающих напряжений, расчеты выполняются на примере распределения величины сдвиговой компоненты  $\sigma_{xy}$  тензора напряжений.

### **Результаты и их обсуждение**

Так как поставленная задача решается в соответствии с принципом суперпозиции, вначале проведен анализ распределения полей напряжений у серповидного двойника при отсутствии внешней нагрузки и поля напряжений, создаваемых внешним силовым воздействием при отсутствии двойника (рис. 2 и 3).

На рис. 2 представлено распределение сдвиговых напряжений у серповидного двойника при отсутствии

внешней нагрузки. Поле напряжений при удалении от двойниковых границ в целом принимает симметричную конфигурацию относительно плоскости двойникования. Вблизи и вдоль границ двойника наблюдается достаточно выраженная асимметрия полей напряжений. Существенная разница в интенсивности проявления напряжений отмечается на двойниковых границах. На вогнутой границе – максимум у устья, падение отрицательных напряжений до нуля на глубине  $2/3$  длины двойника и возрастание положительных напряжений к вершине; на выпуклой границе – менее интенсивное падение напряжений от устья к середине двойника и повышенная концентрация ближе к его вершине.

В области вогнутой границы меньшие напряжения создаются в приповерхностном слое на глубине около  $1/4$  длины двойника. Вблизи выпуклой границы в приповерхностной области и справа от вершины формируются большие напряжения по абсолютной величине по сравнению с областью вогнутой границы. Максимальная концентрация напряжений достигается в вершине двойника (положительные напряжения) и у поверхности на границах, а также внутри двойниковой прослойки (отрицательные напряжения).

Действие тангенциальной распределенной нагрузки создает симметричное по абсолютным значениям поле напряжений (см. рис. 3). Относительно нулевой линии в направлении действия нагрузки знак напряжений меняется с плюса на минус, т. е. слева имеют место напряжения растяжения, а справа – сжатия. Максимальная концентрация напряжений отмечается на границах действия распределенной нагрузки. Так как эти границы совпадают с двойниковыми границами, то на данных участках следует ожидать значительной концентрации напряжений, а следовательно, с учетом их знака существенного увеличения или уменьшения результирующих напряжений.

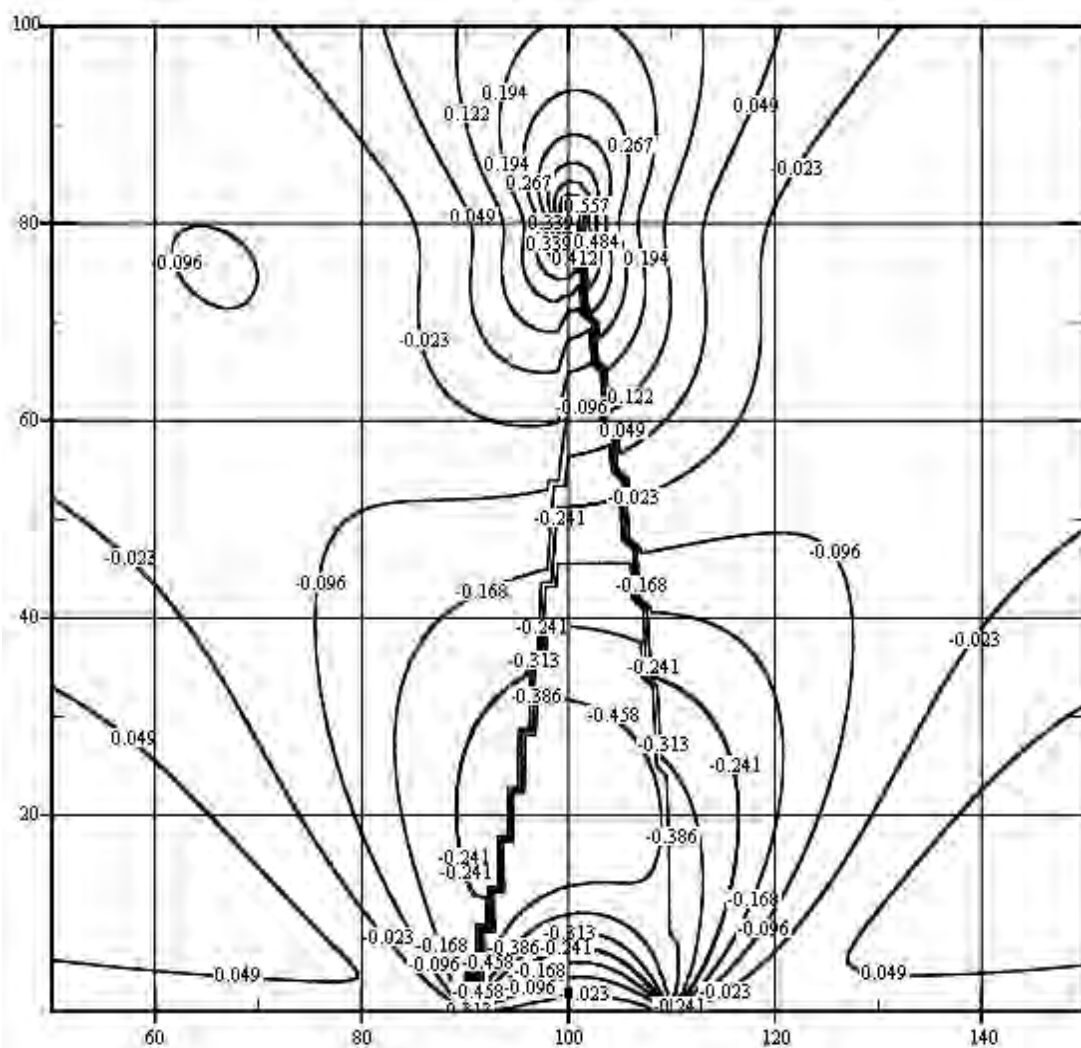


Рис. 2. Напряжения у серповидного двойника при отсутствии внешней нагрузки

При действии на поверхности касательной нагрузки в направлении выпуклой границы двойника в правой области относительно плоскости двойникования значительно возрастают отрицательные напряжения (рис. 4), достигая максимальной величины ( $-2,11$  МПа) у устья двойника. Вдоль вогнутой границы создаются положительные напряжения с максимумом ( $+1,27$  МПа) также на поверхности у устья двойника. Для сравнения – при отсутствии внешней тангенциальной нагрузки здесь имели место отрицательные напряжения около  $0,45$  МПа. В удалении от поверхности в результате воздействия двух факторов – двойни-

кующих дислокаций и внешней нагрузки – «размывается» геометрическое изображение поля напряжений вдоль вогнутой границы двойника, т. е. отсутствует четко выраженное пограничное напряженное состояние материала. Менее заметно влияние внешнего воздействия сказывается на изменении напряженности у вершины двойника при некотором смещении конфигурации поля напряжений: уменьшаются положительные напряжения справа и увеличиваются слева от вершины. В самой вершине несколько уменьшаются ( $\sim 12\%$ ) значения растягивающих напряжений.

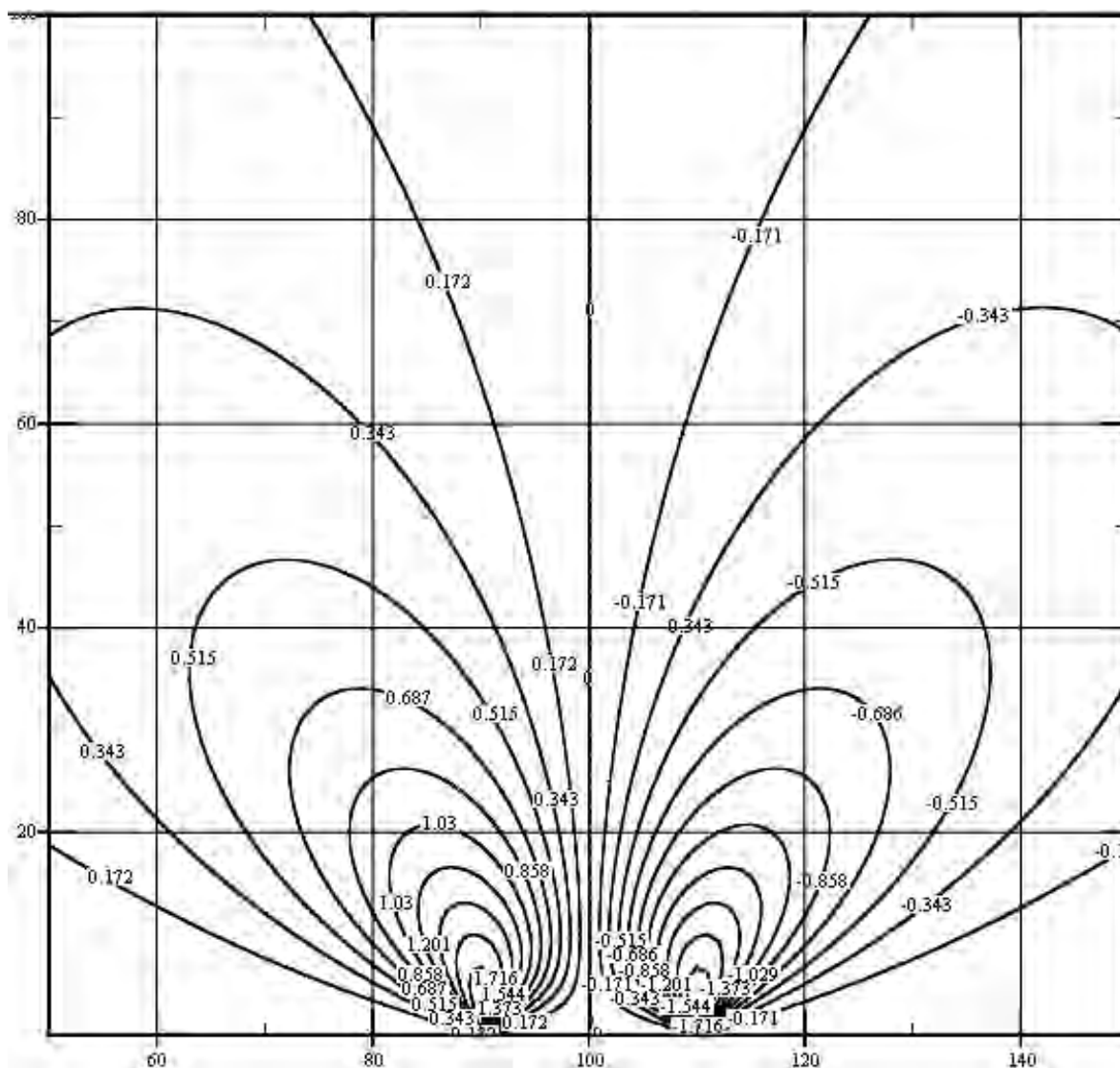


Рис. 3. Поле напряжений при действии на поверхности тангенциальной распределенной нагрузки

Действие касательной нагрузки обратного направления, т. е. в сторону вогнутой границы двойника, усиливает сжимающие напряжения вдоль вогнутой границы и ослабляет действие напряжений вдоль выпуклой границы, создавая поле растягивающих напряжений справа от этой границы (рис. 5). Максимальные отрицательные напряжения ( $-2,17$  МПа) создаются у устья вогнутой границы, а положительные ( $+1,33$  МПа) – у устья выпуклой грани-

цы. Так же, как и в предыдущем случае, т. е. независимо от направления действия внешней нагрузки, значительные напряжения возникают внутри двойниковой прослойки, особенно у поверхности, а в вершине двойника снижается ( $\sim 10\%$ ) действие растягивающих напряжений. В целом при изменении направления действия внешней касательной нагрузки конфигурация полей напряжений меняется на противоположную в отношении знака напряжений.

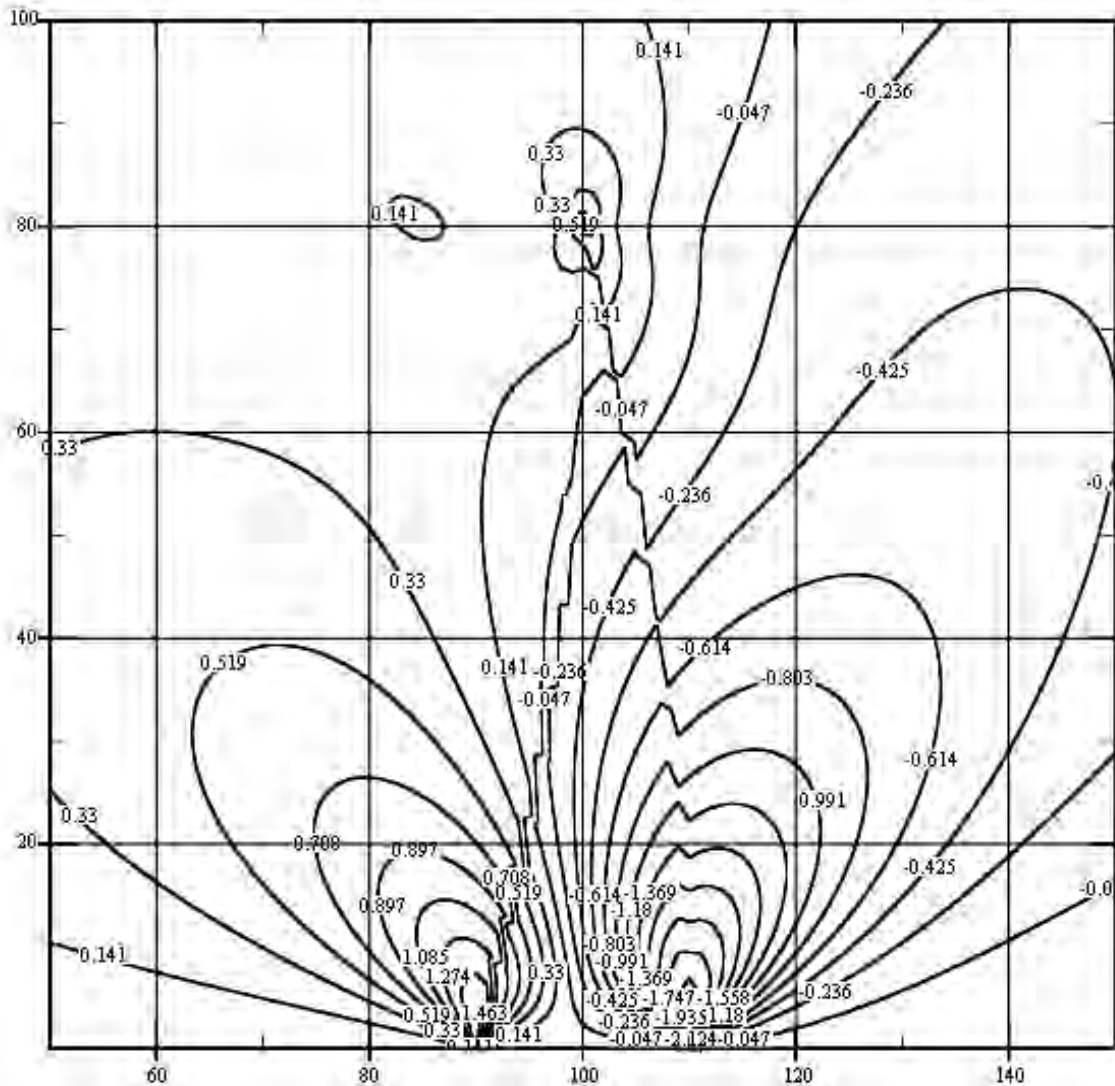


Рис. 4. Напряжения у серповидного двойника при действии на поверхности касательной нагрузки в направлении выпуклой границы

### Заклучение

Таким образом, установлено, что наложение поля напряжений от действия внешней тангенциальной нагрузки, представляющего симметричное распределение по абсолютным значениям (положительная и отрицательная область) относительно нулевой линии, на несимметричную картину распределения напряжений у криволинейных двойниковых границ создает достаточно сложную конфигурацию полей напря-

жений в области серповидного двойника. В зависимости от направления действия внешней нагрузки относительно границ двойника в материале формируются области растягивающих и сжимающих напряжений, при этом область отрицательных напряжений охватывает большую часть двойниковой прослойки. Вдоль двойниковых границ сохраняется концентрация напряжений, а максимальные напряжения в обоих случаях зарождаются у вершины двойника.

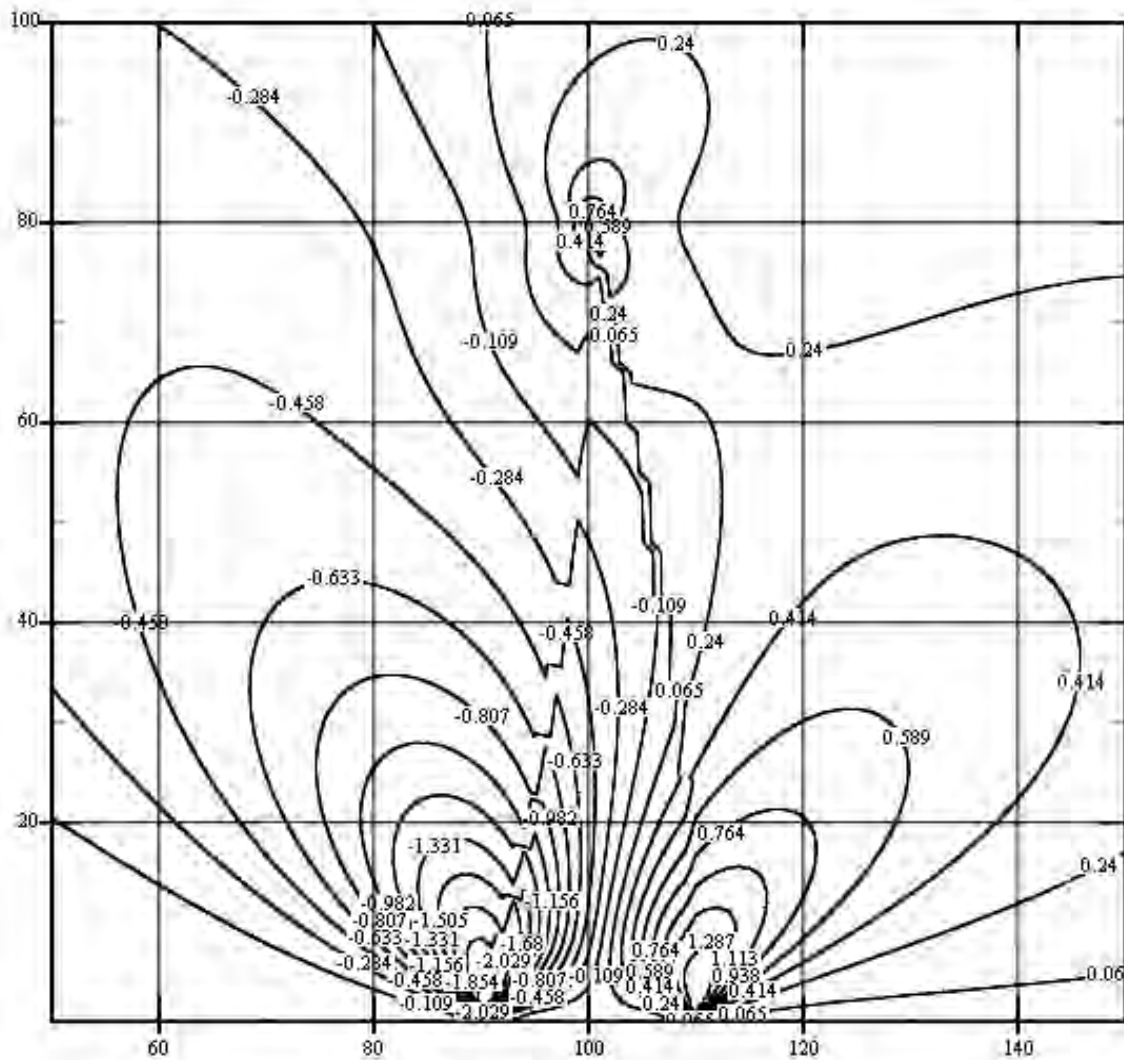


Рис. 5. Напряжения у серповидного двойника при действии на поверхности касательной нагрузки в направлении вогнутой границы

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Восстановление деталей машин: справочник / Ф. И. Пантелеенко [и др.]. – Москва: Машиностроение, 2003. – 672 с.
2. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / В. И. Бородавко [и др.]; под общ. ред. М. Л. Хейфеца, С. А. Клименко. – Минск: Беларуская навука, 2013. – 464 с.
3. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами / А. Г. Бойцов [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1991. – 144 с.
4. **Старков, В. К.** Физика и оптимизация резания материалов / В. К. Старков. – Москва: Машиностроение, 2009. – 640 с.
5. **Симанович, Н. М.** Влияние скорости скрайбирования на особенности формирования двойников в монокристалле висмута / Н. М. Симанович, О. М. Остриков, М. П. Кульгейко // Вестн. Магілёўскага ўніверсітэта імя А. А. Куляшова. – 2018. – № 2 (52). – С. 87–97.
6. **Дель, Г. Д.** Технологическая механика / Г. Д. Дель. – Москва: Машиностроение, 1978. – 174 с.
7. **Григорьев, А. Я.** Физика и микрогеометрия технических поверхностей / А. Я. Григорьев. – Минск: Беларуская навука, 2016. – 247 с.
8. **Кульгейко, Н. М.** Особенности двойникового монокристалла висмута при скрайбировании его поверхности (111) индентором Виккерса / Н. М. Кульгейко, О. М. Остриков // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2015. – № 2 (61). – С. 42–50.



9. **Кульгейко, Н. М.** Закономерности образования двойников у границ царапины при скрайбировании поверхности (111) монокристалла висмута индентором Виккерса / Н. М. Кульгейко, О. М. Остриков // Вестн. Магілёў. дзярж. ун-та імя А. А. Куляшова. – 2016. – № 1 (47). – С. 74–81.

10. **Симанович, Н. М.** Влияние направления скрайбирования на формирование двойниковых ансамблей в монокристалле висмута / Н. М. Симанович, О. М. Остриков, М. П. Кульгейко // Вестн. БрГТУ. Машиностроение. – 2017. – № 4 (106). – С. 51–54.

11. **Симанович, Н. М.** Поля напряжений в области расположенного у поверхности серповидного двойника, к которому приложена распределенная нагрузка / Н. М. Симанович, О. М. Остриков, М. П. Кульгейко // Механика. Исследования и инновации. – 2022. – Вып. 15. – С. 214–220.

12. **Симанович, Н. М.** Особенности полей напряжений в области двойника серповидной формы, находящегося у поверхности твердого тела / Н. М. Симанович, О. М. Остриков, М. П. Кульгейко // Современные проблемы машиноведения: сб. науч. тр.: в 2 ч. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2023. – Ч. 2. – С. 230–233.

13. **Остриков, О. М.** Механика двойникования твердых тел: монография / О. М. Остриков. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 301 с.

14. **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.

15. **Джонсон, К.** Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – Москва: Мир, 1989. – 510 с.

16. **Остриков, О. М.** Роль поверхности в формировании напряженного состояния у клиновидного нанодвойника / О. М. Остриков // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2012. – № 3. – С. 49–18.

*Статья сдана в редакцию 1 июня 2023 года*

Контакты:

nataliasimoniha1991@gmail.com (Симанович Наталья Михайловна);

omostrikov@mail.ru (Остриков Олег Михайлович);

kulgeyko82@rambler.ru (Кульгейко Михаил Петрович).

***N. M. SIMANOVICH, O. M. OSTRIKOV, M. P. KULGEYKO***

## **CHANGING THE CONFIGURATION OF STRESS FIELDS IN THE CRESCENT-SHAPED TWIN REGION DEPENDING ON THE DIRECTION OF EXTERNAL TANGENTIAL DISTRIBUTED LOAD ACTION**

### **Abstract**

An analysis of the stress state in the region of a crescent-shaped twin located near the surface of a solid body under conditions of external mechanical action on the surface is presented. Variants of changing the configuration of stress fields depending on the direction of a tangential distributed load relative to curvilinear twin boundaries are considered.

### **Keywords:**

deformation twinning, crescent-shaped twin, stress state, stress fields.

### **For citation:**

Simanovich, N. M. Changing the configuration of stress fields in the crescent-shaped twin region depending on the direction of external tangential distributed load action / N. M. Simanovich, O. M. Ostrikov, M. P. Kulgeyko // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 3 (80). – P. 95–103.