

УДК 548.24

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕКЛАХ У ПОЛОС СДВИГА В ФОРМЕ ИЗОГНУТЫХ ЛУЧЕЙ

А. А. Рюмцев

магистр технических наук, аспирант

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого

О. М. Остриков

кандидат физико-математических наук, доцент

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого

Предложена методика расчета полей напряжений у полос сдвига в форме изогнутых лучей. Описан характер распределения напряжений в материале у полос сдвига при различных закономерностях распределения квазидислокаций. Определены области локализации напряжений.

Ключевые слова: металлическое стекло, полоса сдвига, поля напряжений.

1. Введение

Для дальнейшего развития техники необходимо применение материалов нового поколения с заранее заданными физическими свойствами. Примером таких материалов являются металлические стекла. Однако недостаточное исследование материала данного типа по вопросам напряженного состояния, особенностей деформации, не позволяет создать полную картину о сферах и областях применения металлических стекол [1–10].

Согласно [1], пластическая деформация в металлических стеклах, как правило, протекает неомогенно, и деформирование реализуется через канал сдвиговой деформации, именуемый полосой сдвига – результат проявления неомогенной пластической деформации. Форма полос сдвига, в зависимости от величины приложенной нагрузки в условиях антиплоского сдвига, может иметь форму, представляющую собой луч [1]. На пути развития полосы сдвига, как правило, встречаются стопоры в виде кристаллических включений, в виду чего происходит изменение направления развития полосы сдвига. При большом увеличении на лучах заметны волнистости, вызванные дефектами структуры материала. Таким образом, полосу сдвига в виде лучей с волнистостью можно представить как прямую с наложенными на нее гармониками.

В виду вышеизложенного, целью работы являлась разработка методики расчета обусловленных полосой сдвига в виде луча полей напряжений в металлических стеклах.

2. Постановка задачи

Если учесть схожесть процесса развития пирамидального скольжения, двойникования в монокристаллах и неомогенной пластической деформации в

© Рюмцев А.А., 2015

© Остриков О.М., 2015

аморфных средах при их локальном деформировании становится целесообразным использование математического моделирования дислокационных процессов для описания деформирования аморфных материалов, применяемых для кристаллических твердых тел [2]. Основываясь на методе Грина, произведем расчет полей напряжений $\sigma_{ij}(x, y)$ у полосы сдвига, находящейся вдали от поверхности аморфного материала. След полосы сдвига в плоскости XOY будет проектироваться на ось OX в виде отрезка длиной L . Согласно [11], напряжения у полосы сдвига могут быть рассчитаны по формуле

$$\sigma_{ij}(x, y) = \int_0^L \sigma_{ij}^0(x, y, \xi) \rho(\xi) \sqrt{1 + (T(\xi))^2} d\xi, \quad (1)$$

где $\sigma_{ij}^0(x, y, \xi)$ – компоненты тензора напряжений, создаваемых единичной дислокацией полосы сдвига, и определяемые по формулам:

$$\sigma_{zx}^0 = -\frac{\mu b_v}{2\pi} \frac{y - f(\xi)}{(x - \xi)^2 + (y - f(\xi))^2}; \quad (2)$$

$$\sigma_{zy}^0 = -\frac{\mu b_v}{2\pi} \frac{y - f(\xi)}{(x - \xi)^2 + (y - f(\xi))^2},$$

где μ – модуль сдвига; ξ – параметр интегрирования; b_v – модуль винтовой квазидислокации полосы сдвига; $\rho(\xi)$ – плотность квазидислокаций; $f(\xi)$ – функция, определяющая форму полосы

$$T(\xi) = \frac{df(\xi)}{d\xi}. \quad (3)$$

Форму полосы сдвига типа криволинейного луча (см. рис. 1, а) можно описать функцией

$$f(\xi) = -3A_1 \cdot \ln(\xi), \quad (4)$$

где A_1 – эмпирический коэффициент.

Согласно экспериментальным данным [1], полоса сдвига вдоль всей своей длины имеет волнистости, которые можно описать гармонической функцией. В этом случае форма полосы сдвига, образованная винтовыми дислокациями (рис. 1, б), может быть описана функцией

$$f(\xi) = A_2 \cdot \ln\left(\frac{1}{\xi^3}\right) + B_2 \cdot \sin(C_2 \cdot \xi) + D_2, \quad (5)$$

где A_2 , B_2 , C_2 и D_2 – эмпирические коэффициенты.

Рассмотрим четыре различных вида функции плотности квазидислокаций $\rho(\xi)$. Пусть в первом случае плотность квазидислокаций описывается функцией

$$\rho(\xi) = 10^6. \quad (6)$$

Пусть во втором случае закон распределения квазидислокаций носит линейный характер и описывается функцией

$$\rho(\xi) = A_3 \cdot \xi + B_3, \quad (7)$$

где A_3, B_3 – эмпирические константы.

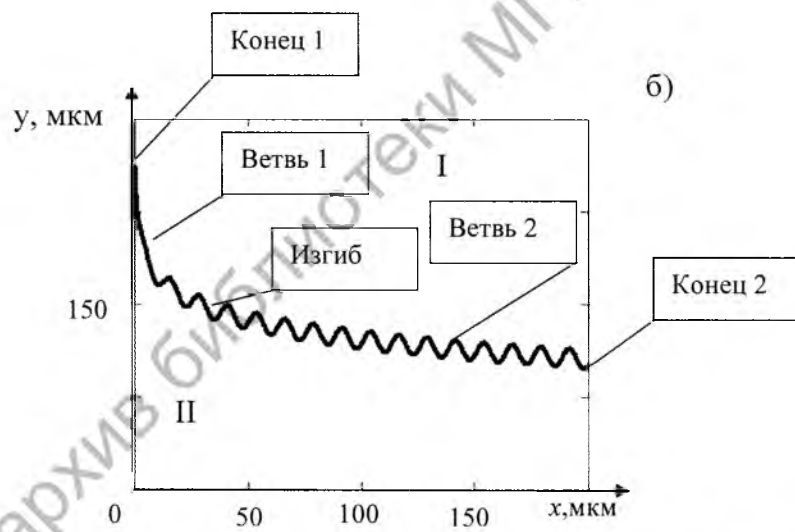
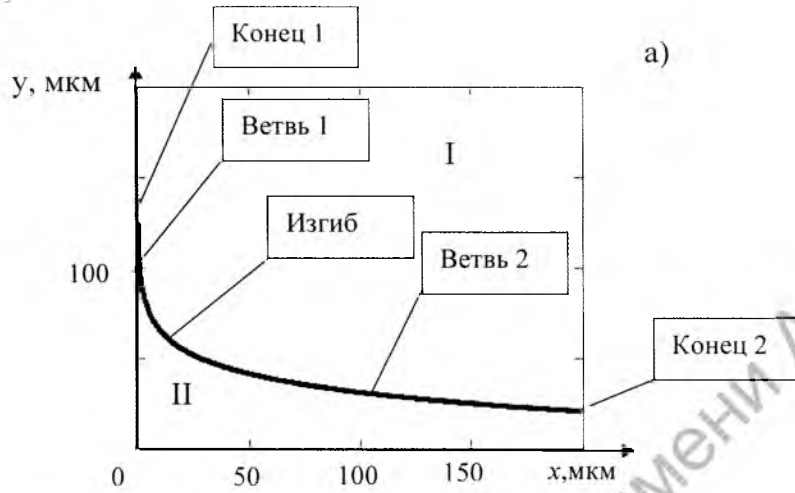


Рисунок 1 – Схематичное изображение форм полос сдвига: а – в виде лучей, форма которых описывается функцией (4); б – в виде лучей, форма которых описывается функцией (5)

В третьем случае закон распределения квазидислокаций носит нелинейный характер и описывается функцией

$$\rho(\xi) = A_4 \cdot \xi^2 + B_4 \cdot \xi + C_4, \quad (8)$$

где A_4, B_4 и C_4 – эмпирические коэффициенты.

В четвертом случае плотность квазидислокаций пусть изменяется по гармоническому закону, и для варианта формы полосы, описанного формулой (4), закон распределения квазидислокаций пусть будет задан функцией

$$\rho(\xi) = A_5 \cdot \sin(\xi), \quad (9)$$

где A_5 – эмпирический коэффициент.

Для случая формы полос сдвига, описанной функцией (5), закон распределения квазидислокаций пусть будет задан функцией

$$\rho(\xi) = \sin(A_6 \cdot \xi) \cdot B_6, \quad (10)$$

где A_6, B_6 – эмпирические коэффициенты.

3. Результаты расчетов полей напряжений и их обсуждение

Для варианта формы полосы сдвига, описываемой функцией (4), где $A_1=5$ мкм, при распределении плотности квазидислокаций по функции (6), напряжения σ_{zx} сконцентрированы у конца 1 полосы сдвига и положительны (см. рис. 2, а). В положительном направлении оси OX в области I напряжения также положительны и убывают при удалении от полосы вокруг конца 2, где происходит переход от положительных напряжений к отрицательным. В области II напряжения максимальны по модулю у ветви 2 и отрицательны. Также максимальные по модулю отрицательные напряжения сконцентрированы в отрицательном направлении оси OX от изгиба ветви 1, уменьшаясь у этой зоны при перемещении против и по часовой стрелке.

Видно, что положительные напряжения σ_{zy} локализованы у конца 2, постепенно убывая в направлении от него (см. рис. 2, б). В положительном направлении оси OY напряжения также положительны и убывают в направлении от нее вокруг конца 1 полосы сдвига, где меняются с положительных на отрицательные. Максимум растягивающих напряжений находится в отрицательном направлении оси OX от полосы у изгиба ветви 1, постепенно убывая по мере удаления от этой зоны вокруг конца 1 по часовой стрелке и при перемещении вокруг ветви 2 против часовой.

В случае варианта формы полосы сдвига, описываемой функцией (4), при линейном распределении плотности квазидислокаций, описываемом функцией (7) где $A_3=0,9$ мкм⁻²; $B_3=6$ мкм⁻¹, наибольшие напряжения σ_{zx} сконцентрированы у полосы сдвига на некотором расстоянии от конца 2 (см. рис. 3, а). Причем в области I данные напряжения положительны, а в области II – отрицательны. Напряжения σ_{zx} уменьшаются по модулю при удалении от этой зоны и меняются с положительного на отрицательный вокруг конца 2 полосы сдвига, а также с отрицательного на положительный в области II относительно центра изгиба полосы по часовой стрелке.

Для напряжений σ_{zy} можно отметить, что наибольшие их значения наблюдаются у конца 2 полосы сдвига и постепенно убывают при удалении от этой зоны (см. рис. 3, б). Также напряжения σ_{zy} концентрируются у центра изгиба полосы, где они отрицательны. При этом в области II у изгиба напряжения по модулю значительно больше напряжений в области I. Смена напряжений с положительных на отрицательные происходит в области II вокруг центра ветви 2

по часовой стрелке, а в области I также вокруг центра ветви 2, но против направления хода часовой стрелки.

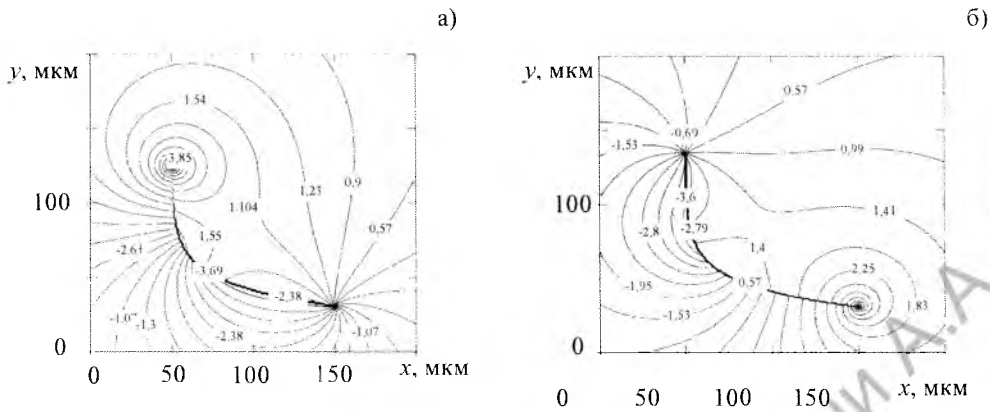


Рисунок 2 – Распределение напряжений у полосы сдвига формы, описываемой функцией (4) при распределении плотности квазидислокаций по функции (6): а) σ_{zx} ; б) σ_{zy} (МПа)

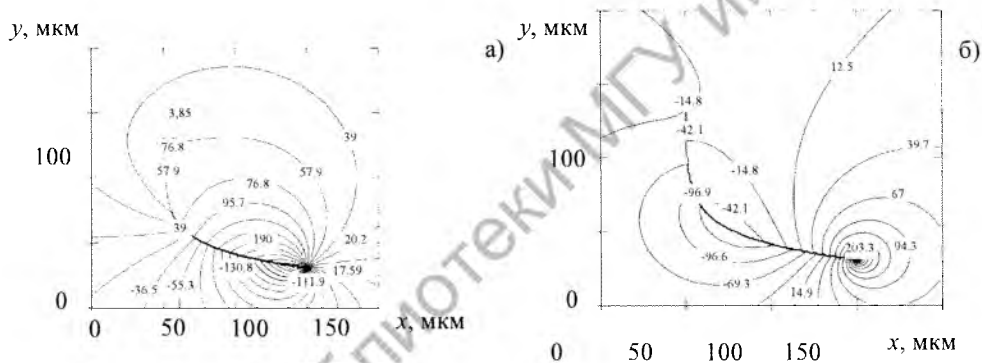


Рисунок 3 – Распределение напряжений у полосы сдвига формы, описываемой функцией (4), при линейном распределении плотности квазидислокаций, описываемом функцией (7): а) σ_{zx} ; б) σ_{zy} (МПа)

Для следующего варианта формы полосы сдвига, которая описывается функцией (4), где $A_1=5$ мкм, при нелинейном распределении плотности квазидислокаций, описываемом функцией (8), где $A_4=1/10$ мкм³; $B_4=1/5$ мкм⁻²; $C_4=5$ мкм⁻¹, напряжения σ_{zx} сконцентрированы у ветви 2 ближе к концу 2 (см. рис. 4, а). В области I напряжения положительны, в области II – отрицательны.

Наибольшие напряжения σ_{zy} в этом случае сконцентрированы у конца 2 (см. рис. 4, б). Данные напряжения положительны. Максимальные отрицательные напряжения сконцентрированы вокруг изгиба ветви 2. На уровне середины ветви 2 напряжения меняются с отрицательных на положительные.

Следует отметить, что для варианта формы полосы сдвига, описываемой функцией (4), где $A_1=5$ мкм, при распределении плотности квазидислокаций по гармоническому закону, описываемому функцией (9), в которой эмпирический коэффициент был принят $A_5=1/5$ мкм⁻¹, наибольшие напряжения σ_{zx} локализованы у середины ветви 1. Данные напряжения положительны (см. рис. 5, а).

Примерно на уровне изгиба ветви 1 происходит смена знака напряжений σ_{zx} . Другая область концентрации напряжений находится на некотором расстоянии от изгиба ветви 1. Данные напряжения отрицательны и убывают при удалении от этой зоны до вышеуказанного уровня, где напряжения меняются с отрицательных на положительные. Незначительные напряжения локализованы вдоль ветви 2 и изгиба полосы сдвига.

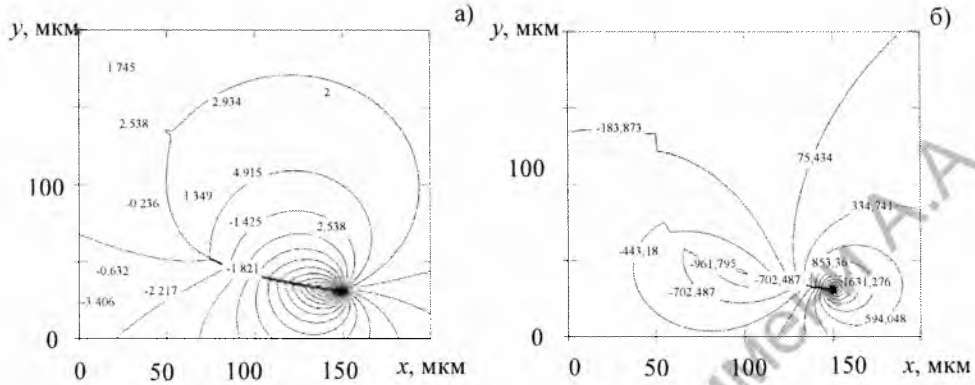


Рисунок 4 – Распределение напряжений у полосы сдвига формы, описываемой функцией (4), при нелинейном распределении плотности квазидислокаций, описываемом функцией (8): а) σ_{zx} ; б) σ_{zy} (МПа)

Касательно напряжений σ_{zy} можно отметить, что наибольшие значения данные напряжения имеют в местах локализации на ветви 1 полосы сдвига на некотором расстоянии от начала изгиба ветви 1, постепенно убывая вокруг этой зоны, причем в положительном направлении оси Ox от полосы напряжения положительны, а в отрицательном направлении оси Ox – отрицательны (см. рис. 5, б). Вдоль ветви 2 и изгиба по гармоническому закону изменяются напряжения со стабильными знакопеременными значениями в пиках гармоник. Также присутствуют точечные концентраторы напряжений в положительном направлении оси Ox от конца 2. Данные напряжения положительны по знаку.

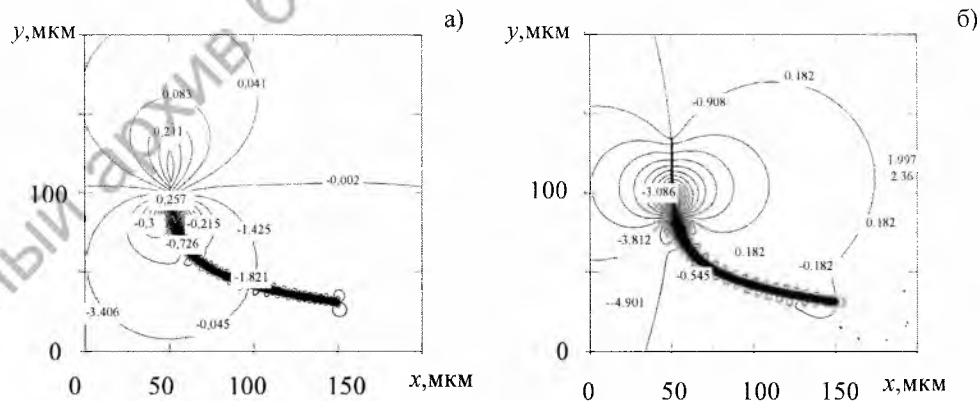


Рисунок 5 – Распределение напряжений у полосы сдвига формы, описываемой функцией (4), при распределении плотности квазидислокаций по гармоническому закону, описываемому функцией (9): а) σ_{zx} ; б) σ_{zy} (МПа)

Для варианта формы полосы сдвига, описываемой функцией (5), где $A_2=5$ мкм; $B_2=5$ мкм; $C_2=1/2$, при распределении плотности квазидислокаций по функции (6), в области II в положительном направлении оси OY от полосы сдвига напряжения σ_{zx} положительны по знаку (см. рис. 6, а). В области II в отрицательном направлении оси OY напряжения с положительных меняются на отрицательные и уменьшаются с удалением от полосы сдвига. Наибольшие положительные напряжения сконцентрированы в области у конца 1 полосы сдвига. Отрицательные напряжения в области II имеют максимальные значения у ветви 2 полосы сдвига, постепенно убывая по мере удаления от этой зоны вокруг конца 2 против часовой стрелки, и вокруг середины изгиба по часовой стрелке.

Наибольшие по модулю напряжения σ_{zy} локализованы в области II в отрицательном направлении оси OY от нее в месте изгиба полосы сдвига и отрицательны, а также в области у конца 2 полосы (см. рис. 6, б). Напряжения постепенно уменьшаются при удалении от этого конца, достигая минимума по модулю в отрицательном направлении оси OY от середины ветви 2 полосы, где напряжения с отрицательных меняются на положительные. Значения напряжений растут вокруг изгиба ветви 2, достигая максимума у середины изгиба и уменьшаются по часовой стрелке вокруг конца 1 полосы сдвига вновь меняясь уже с положительных на отрицательные в области I.

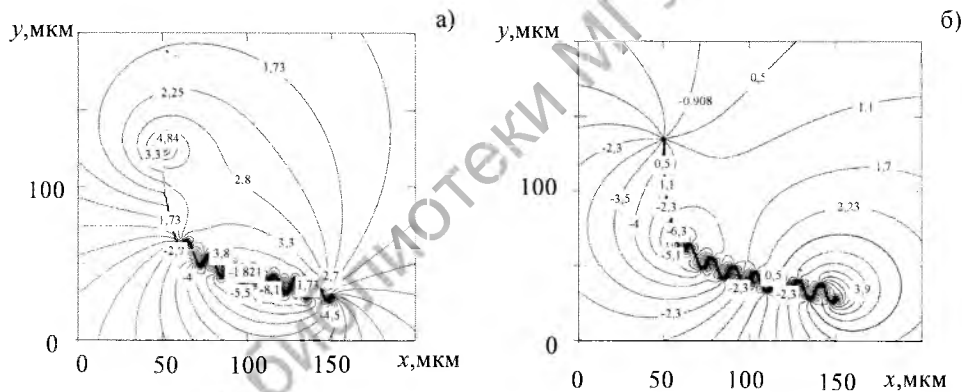


Рисунок 6 – Распределение напряжений у полосы сдвига формы, описываемой функцией (5), при распределении плотности квазидислокаций по функции (6): а) σ_{zx} ; б) σ_{zy} (МПа)

Для формы полосы сдвига, которая описывается функцией (5), где $A_2=5$ мкм; $B_2=5$ мкм; $C_2=1/2$, при линейном распределении плотности квазидислокаций, описываемом функцией (7), где $A_3=0,9$ мкм⁻²; $B_3=6$ мкм⁻¹, наибольшие напряжения σ_{zx} сконцентрированы у середины ветви 2 полосы сдвига, причем, в области I напряжения положительны, в области II – отрицательны (см. рис. 7, а). Напряжения меняются с положительных на отрицательные вокруг конца 2 полосы сдвига, а также с отрицательных на положительные вокруг центра изгиба полосы сдвига.

Наибольшие напряжения σ_{zy} сконцентрированы у конца 2 полосы сдвига и постепенно убывают при удалении от этой зоны (см. рис. 7, б). Данные напряжения положительны. Другой областью концентрации напряжений является изгиб полосы, причем, и в области I, и в области II напряжения отрицатель-

ны. Напряжения от положительных к отрицательным меняются вокруг центра ветви 2 в области 2: по часовой стрелке, в области I – против.

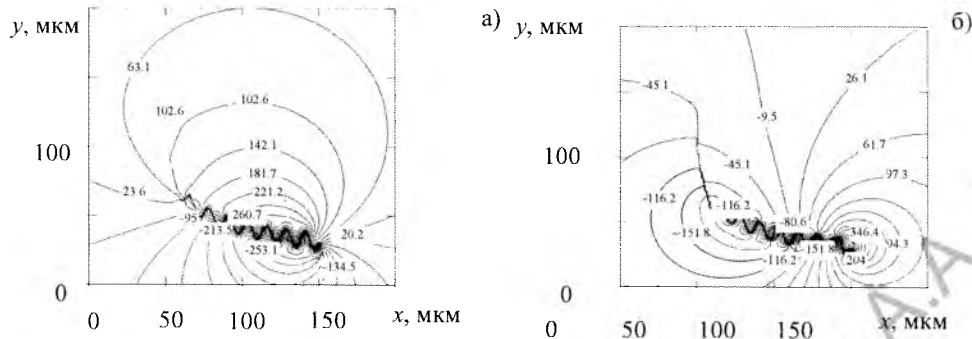


Рисунок 7 – Распределение напряжений у полосы сдвига формы, описываемой функцией (5), при линейном распределении плотности квазидислокаций, описываемом функцией (7):

а) σ_{zx} ; б) σ_{zy} (МПа)

Для варианта формы полосы сдвига, описываемой функцией (5), при $A_2=5$ мкм; $B_2=5$ мкм; $C_2=1/2$, в случае нелинейного распределения плотности квазидислокаций, описываемом функцией (8), где $A_4=1/10$ мкм⁻³; $B_4=1/5$ мкм⁻²; $C_4=5$ мкм⁻¹, максимальные напряжения σ_{zx} локализуются на некотором расстоянии от конца 2 (см. рис. 8, а). В области I напряжения положительны и убывают по мере удаления от полосы сдвига. В области I сдвига напряжения положительны и убывают по мере удаления от полосы сдвига. В области 2 напряжения отрицательны. От конца 2 к концу 1 разброс значений напряжений в пиках гармоник уменьшается.

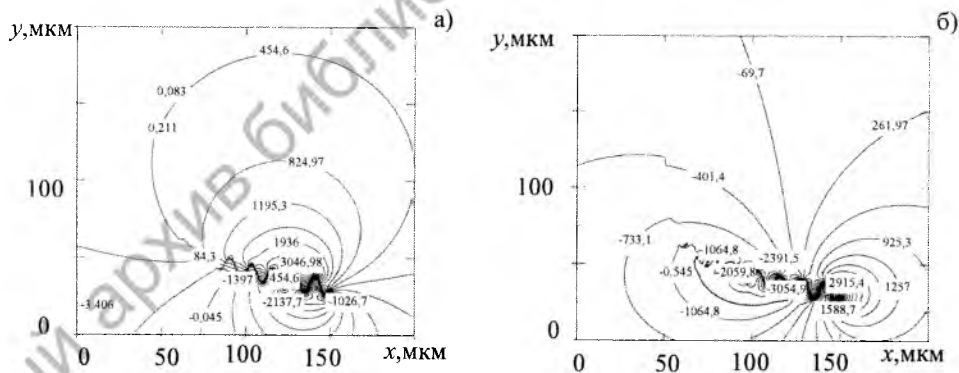


Рисунок 8 – Распределение напряжений у полосы сдвига формы, описываемой функцией (4), при нелинейном распределении плотности квазидислокаций, описываемом функцией (8):

а) σ_{zx} ; б) σ_{zy} (МПа)

На картине полей напряжений σ_{zy} наблюдается две зоны локализации напряжений (см. рис. 8, б). Одна находится у конца 2 полосы сдвига, другая расположена у изгиба ветви 2. Отчетливо видна ступень на полях напряжений при переходе линий поля через полосу сдвига. У конца 2 напряжения положительны

и убывают по мере удаления от него. У области изгиба ветви 2 напряжения отрицательны и убывают по модулю при удалении от него.

Для варианта формы полосы сдвига, описываемой функцией (5), где $A_2=5$ мкм; $B_2=5$ мкм; $C_2=1/2$, при распределении плотности квазидислокаций по гармоническому закону, описываемому функцией (10), где $A_6=0,3$; $B_6=20$ мкм⁻¹, сжимающие напряжения σ_{zx} локализованы у конца 1 и постепенно убывают в направлении от этого края (см. рис. 9, а). В области изгиба находится другой центр локализации напряжений, но отрицательных. По мере удаления от изгиба напряжения убывают по модулю, причем в положительном направлении оси Ox от полосы значительно быстрее и примерно на уровне середины ветви 1 напряжения меняются с отрицательных на положительные.

Центр локализации напряжений σ_{zx} – у изгиба ветви 1, причем в отрицательном направлении оси Ox от полосы напряжения отрицательные, а в положительном направлении оси Ox – положительные (см. рис. 9, б). В области II в областях между впадинами гармоник наблюдаются положительные напряжения, в области I между вершинами гармоник – отрицательные.

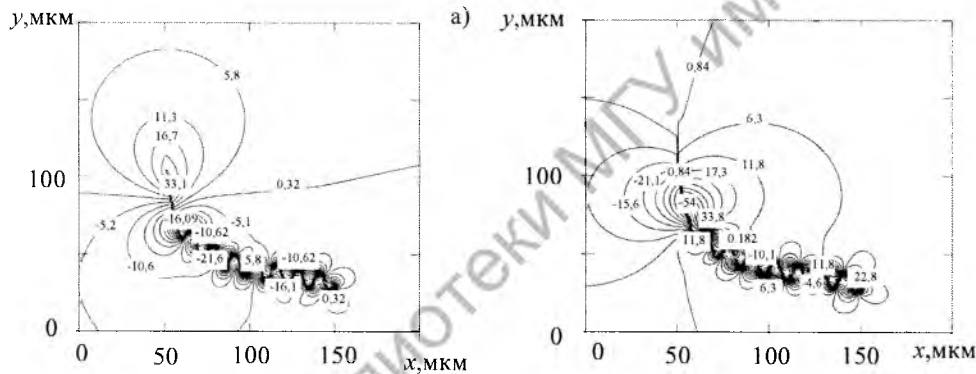


Рисунок 9 – Распределение напряжений у полосы сдвига формы, описываемой функцией (4), при распределении плотности квазидислокаций по гармоническому закону, описываемому функцией (9): а) σ_{zx} ; б) σ_{zy} (МПа)

4. Заключение

Основываясь на применении математического моделирования дислокационных процессов для описания деформирования аморфных материалов, была предложена методика расчета полей напряжений в металлических стеклах у полос сдвига в виде лучей. В работе представлены расчеты полей напряжений при различных закономерностях распределения плотностей квазидислокаций, на основании которых были выявлены области локализации напряжений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Верещагин, М. Н.** Негомогенная пластическая деформация аморфных сплавов на основе железа : монография / М. Н. Верещагин, В. Г. Шепелевич, О. М. Остриков. – Гомель : ГГТУ имени П. О. Сухого, 2004. – 134 с.
2. **Верещагин, М. Н.** Аналогии и различия в развитии сдвиговой пластической деформации при локальном деформировании аморфных и монокристаллических

- материалов / М. Н. Верещагин, О. М. Остриков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2003. – № 3. – С. 35–37.
3. *Глезер, А. М.* Структура и механические свойства аморфных сплавов / А. М. Глезер, Б. В. Молотилев. – М. : Металлургия, 1992. – 208 с.
 4. Аморфные металлы. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. / под ред. Ц. Масумото. – Москва : Металлургия, 1987. – 328 с.
 5. Прецизионные сплавы / А. И. Радьков [и др.]. – М. : Металлургия, 1980. – С. 11–16.
 6. Металлические стекла / под ред. Д. Д. Гильмана, Х. Д. Лими. – Москва : Металлургия, 1984. – 264 с.
 7. *Золотухин, И. В.* Физические свойства аморфных металлических материалов / И. В. Золотухин. – Москва : Металлургия, 1986. – 176 с.
 8. *Алехин, В. П.* // Металловедение и термическая обработка металлов / В. П. Алехин, В. Помпе, К. Ветциг. – 1982. – № 5. – С. 72–74.
 9. *Конверистый, Ю. К.* Физико-химические основы создания аморфных металлических сплавов / Ю. К. Конверистый, Э. К. Осипов, Е. А. Трофимова. – М. : Наука, 1983. – 145 с.
 10. Структура аморфных металлических сплавов / Ю.А. Скаков [и др.]. Тез. докл. МИСиС, 1980. – С. 136.
 11. *Остриков, О. М.* Механика двойникования твердых тел : монография / О. М. Остриков. – Гомель : ГГТУ имени П. О. Сухого, 2008. – 301 с.

Поступила в редакцию 01.06.2015 г.

Контакты: omostrikov@mail.ru (Остриков Олег Михайлович)

Ryumtsev A.A., Ostrikov O.M. THE METHOD OF CALCULATION OF STRESS FIELDS IN METALLIC GLASSES IN SHEAR BANDS IN THE FORM OF CURVED BEAMS.

The method of calculation of stress in shear bands in the form of curved beams is suggested. The article describes the nature of the distribution of stresses in the material in shear bands with different patterns of distribution of quasidislocations. The regions of localization of stress are defined.

Key words: metallic glass, shear, stress field.