

УДК 548.24

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ У ПАРАБОЛИЧЕСКИХ ПОЛОС СДВИГА В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕКЛАХ

А. А. РЮМЦЕВ, О. М. ОСТРИКОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

Дальнейшее развитие техники обусловлено применением материалов нового поколения, с заранее заданными свойствами, т. е. прецизионными материалами. К материалам подобного типа можно отнести металлические стекла – аморфные материалы с высокими значениями таких параметров, как прочность, коррозионная стойкость. Данные материалы также выделяются особыми электрическими, инвариантными, упругими и акустическими свойствами, благодаря чему сфера применения таких материалов очень широка [1]–[10]. Однако ввиду малой изученности материала на предмет деформированного состояния, обусловленного неомогенной пластичностью металлических стекол, не представляется возможным создать полную картину областей применения аморфных металлических сплавов [7].

Целью данной работы стала разработка численно-аналитического метода расчета полей напряжений у параболических полос сдвига в металлических стеклах.

Постановка задачи

В отличие от материалов с кристаллической структурой, в которых деформирование может происходить путем скольжения или двойникования, в аморфных материалах деформирование реализуется через новый канал сдвиговой пластической деформации – полосы сдвига – результат проявления неомогенной пластической деформации [1], [2], [7].

По данным работ [1], [2], форма полос сдвига у отпечатка индентора представляет собой луч или параболу (чешуйчатый навал). При большом увеличении можно увидеть, что полосы сдвига в аморфном материале имеют искривления, обусловленные активным взаимодействием с другими полосами сдвига, монокристаллическими зернами, концентраторами напряжений и т. д. [1], [2]. В общем случае можно принять, что форма полосы сдвига будет представлять собой в данном случае параболу либо параболу с гармоническими искажениями (рис. 1).

Согласно [1], целесообразно использование математического моделирования дислокационных процессов для описания деформирования аморфных материалов. Используя методику расчетов, принятую в [8], 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 i, j – принимают значения x, y или z ; L – проекция длины полосы сдвига на ось OX ; $\rho(\xi)$ – плотность квазидислокаций; ξ – параметр интегрирования; $\sigma_{ij}^0(x, y, \xi)$ – компоненты тензора напряжений, создаваемых единичной квазидислокацией полосы сдвига и определяемых по формулам:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx}^0(x, y, \xi) &= -\frac{\mu b_{\text{кр}}}{2\pi(1-\nu)} \frac{(y-f(\xi))[3(x-\xi)^2 + (y-f(\xi))^2]}{[(x-\xi)^2 + (y-f(\xi))^2]^2}, \\ \sigma_{xy}^0(x, y, \xi) &= \frac{\mu b_{\text{кр}}}{2\pi(1-\nu)} \frac{(x-\xi)[(x-\xi)^2 - (y-f(\xi))^2]}{[(x-\xi)^2 + (y-f(\xi))^2]^2}, \\ \sigma_{yy}^0(x, y, \xi) &= \frac{\mu b_{\text{кр}}}{2\pi(1-\nu)} \frac{(y-f(\xi))[(x-\xi)^2 - (y-f(\xi))^2]}{[(x-\xi)^2 + (y-f(\xi))^2]^2}, \\ \sigma_{zz}^0(x, y, \xi) &= -\frac{\mu b_{\text{кр}} \nu}{2\pi(1-\nu)} \frac{y-f(\xi)}{(x-\xi)^2 + (y-f(\xi))^2},\end{aligned}\quad (2)$$

где μ – модуль сдвига; ν – коэффициент Пуассона; $b_{\text{кр}}$ – модуль краевой квазидислокации, образующей полосу сдвига;

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

где $f(\xi)$ – функция, определяющая форму полосы сдвига в аморфном материале.

Форму полосы сдвига типа чешуйчатых навалов без существенных локальных искривлений вдоль длины (рис. 1, а) можно описать функцией

$$f(\xi) = A_1 \xi^2 + B_1, \quad (4)$$

где A_1 и B_1 – эмпирические коэффициенты.

Функция (4) описывает параболическую кривую, соответствующую форме полосы сдвига в виде чешуйчатого навала, окаймляющего отпечаток индентора [1], без волнистости формы.

В случае наличия волнистостей вдоль линии полосы сдвига (рис. 1, б) ее форма может быть описана функцией

$$f(\xi) = A_2 \xi^2 + B_2 + C_2 \sin(D_2 \xi), \quad (5)$$

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

В данной работе рассмотрим два варианта распределения плотности квазидислокаций $\rho(\xi)$. Пусть в первом случае линейная плотность квазидислокаций постоянна:

$$\rho(\xi) = \text{const} = 10^6 \text{ м}^{-1}. \quad (6)$$

Во втором – закон распределения квазидислокаций описывается линейной функцией

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

где A_3, B_3 – эмпирические коэффициенты.

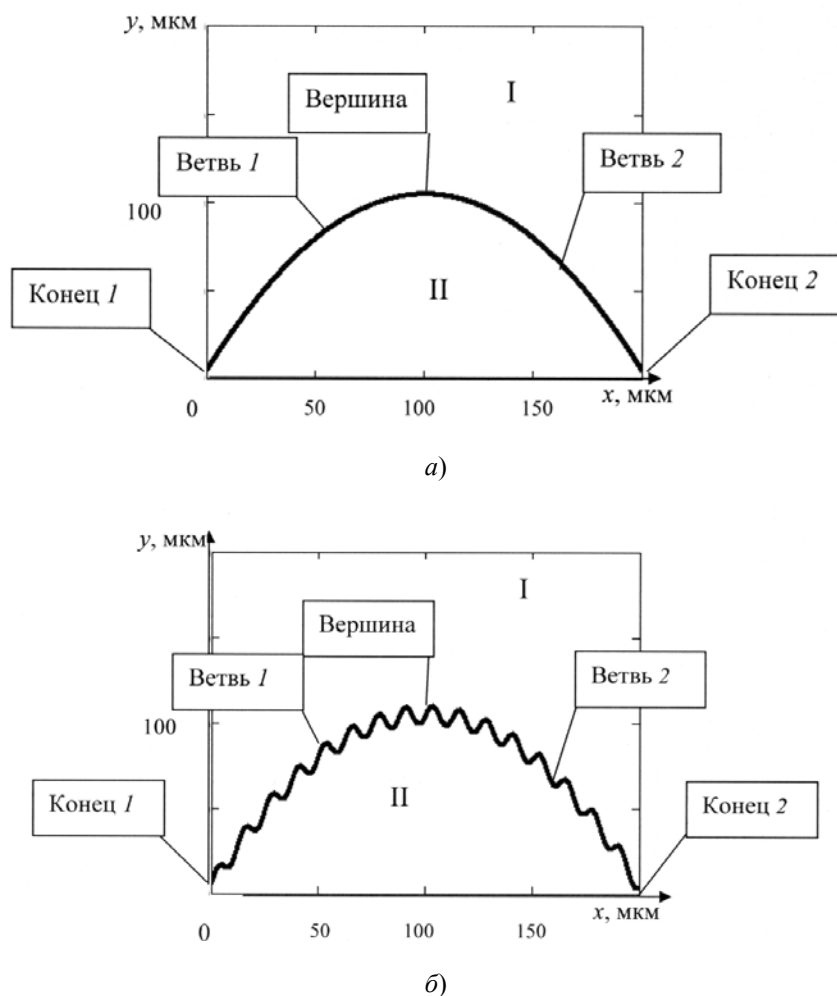


Рис. 1. Схематичное изображение форм полос сдвига в виде чешуйчатых навалов, форма которых описывается:
 а – функцией (4); б – функцией (5)

Результаты расчетов полей напряжений и их обсуждение

Для формы полосы сдвига, описываемой функцией (4), где $A_1 = 1/100 \text{ мкм}^{-1}$, $B_1 = 5 \text{ мкм}$; при распределении плотности квазидислокаций по закону, описываемому функцией (6), наибольшие значения напряжений σ_{xx} наблюдаются в области I у вершины, где они положительны и уменьшаются при удалении от этой зоны (рис. 2, а). В области II напряжения отрицательны и имеют наибольшие значения по модулю у концов 1 и 2 сдвига, уменьшаясь в направлении к вершине.

Наибольшие напряжения σ_{xy} , наблюдаемые в области I, локализованы у ветвей 1, 2 полосы на некотором расстоянии от вершины, постепенно уменьшаясь при удалении от этих зон (рис. 2, б). В отрицательном направлении оси OX от вершины в области I напряжения отрицательны, в положительном направлении оси OX – положительны. В области II напряжения уменьшаются по модулю от концов 1, 2 вдоль полосы сдвига к центру области II, где напряжения минимальны по всей области, причем напряжения в отрицательном направлении оси OX от вершины положительны, а в положительном направлении оси OX – отрицательны.

Напряжения σ_{yy} в области I локализованы в четырех зонах: у вершины, где напряжения положительны, и над серединами ветвей 1 и 2, где данные напряжения от-

рицательны (рис. 2, в). Также напряжения концентрируются и на некотором удалении от вершины в области I в положительном направлении оси OY данные напряжения отрицательны. В области II напряжения σ_{yy} положительны и максимальны у концов 1 и 2, уменьшаясь при удалении от полосы сдвига к середине ее основания.

Напряжения σ_{zz} в области I положительны и сконцентрированы у вершины, постепенно убывая от нее (рис. 2, г). В области II напряжения отрицательны и максимальны у концов 1, 2, и постепенно убывают к вершине.

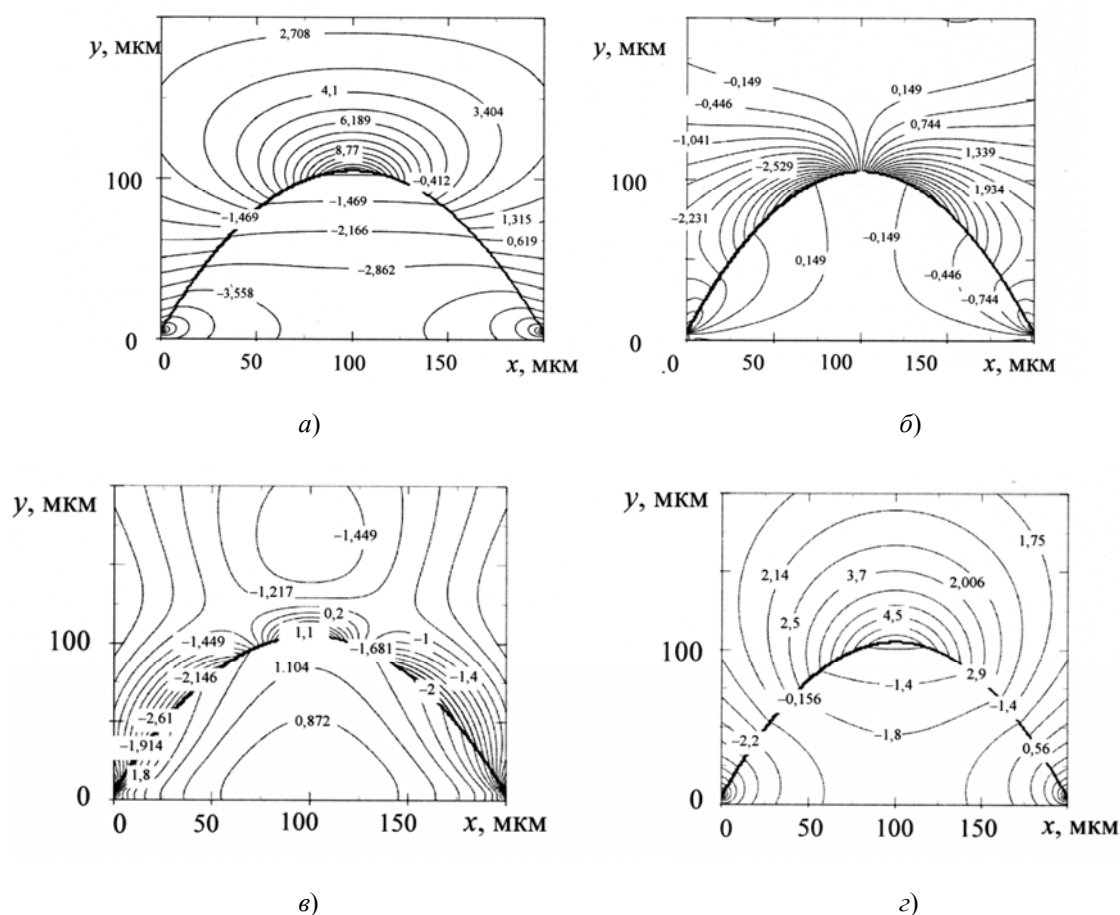


Рис. 2. Распределение напряжений у полосы сдвига формы, описываемой функцией (4), при законе распределения плотностей дислокаций, описываемом функцией (6):

$$a - \sigma_{xx}; \text{ б} - \sigma_{xy}; \text{ в} - \sigma_{yy}; \text{ г} - \sigma_{zz}$$

Для формы полосы сдвига, описываемой функцией (4), где $A_1 = 1/100 \text{ мкм}^{-1}$, $B_1 = 5 \text{ мкм}$; при линейном распределении плотности квазидислокаций, описываемом функцией (7), где $A_3 = 0,9 \cdot 10^6 \text{ м}^{-2}$; $B_3 = 6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$; наибольшие напряжения σ_{xx} сконцентрированы на некотором расстоянии от вершины полосы сдвига в положительном и в отрицательном направлении оси OX от нее, постепенно уменьшаясь по модулю к вершине и достигая минимума в области I в положительном направлении оси OY от вершины и немного смещены в положительном направлении оси OX от нее (рис. 3, а). Причем в отрицательном направлении оси OX от вершины значения напряжений отрицательны, а в положительном направлении оси OX – положительны. У концов 1 и 2 полосы сдвига также сконцентрированы напряжения, которые убывают по модулю при удалении от этих зон. Притом у конца 2 сконцентрированы

отрицательные значения, которые по модулю значительно больше положительных напряжений у конца l .

Наибольшие по модулю и отрицательные по знаку напряжения σ_{xy} при распределении плотности квазидислокаций, описываемом функцией (7), в области I расположены в зоне вершины (рис. 3, б). Также в области I на некотором расстоянии от полосы сдвига локально сосредоточены три области напряжений: в положительном направлении оси OY от вершины и у ветвей 1 и 2 на некотором расстоянии от полосы. Причем в положительном направлении оси OY от вершины сконцентрированы положительные напряжения, а в положительном направлении оси OY от ветвей 1 и 2 – отрицательные. В области II напряжения имеют большие значения по всей длине полосы, убывая в направлении основания полосы сдвига. Данные напряжения отрицательны. Наибольшие напряжения в области II наблюдаются у концов 1 и 2 полосы сдвига.

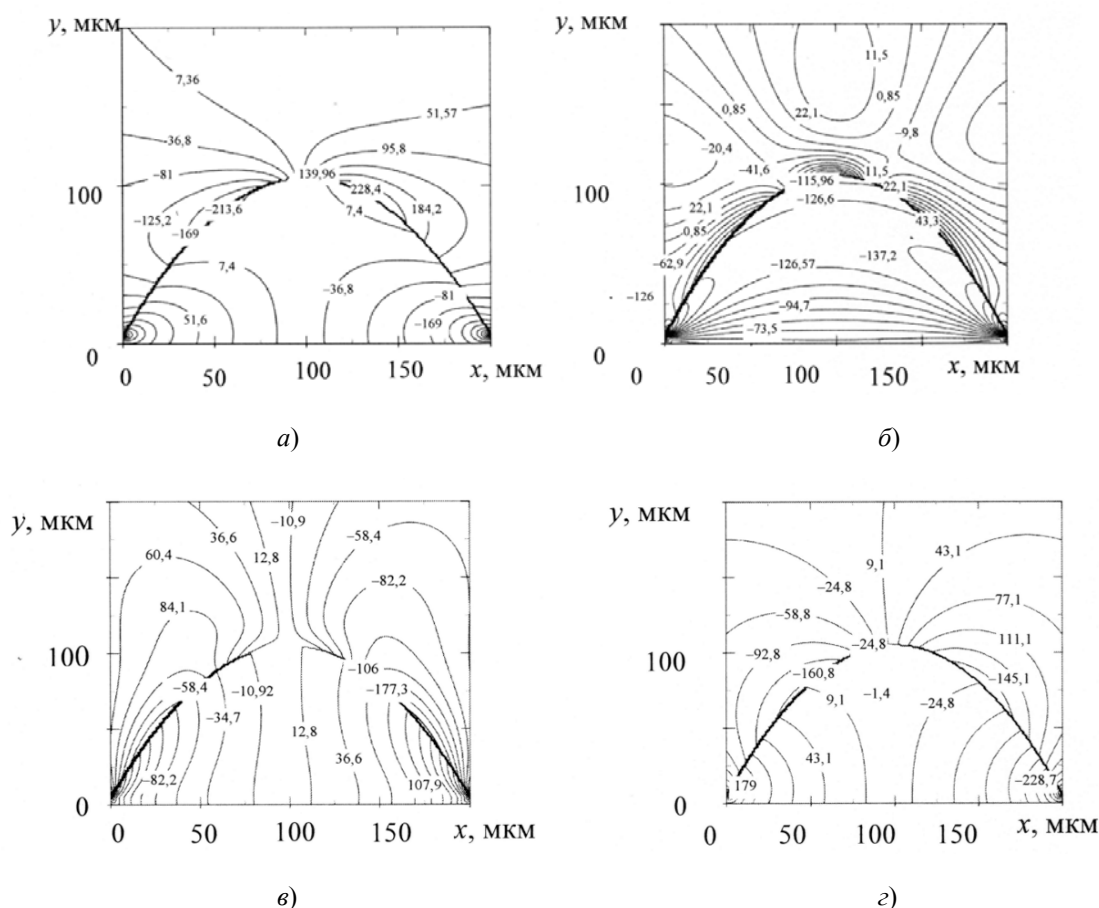


Рис. 3. Распределение напряжений у полосы сдвига формы, описываемой функцией (4), при линейном законе распределения плотностей дислокаций, задаваемом функцией (7):

$$a - \sigma_{xx}; \text{ б} - \sigma_{xy}; \text{ в} - \sigma_{yy}; \text{ г} - \sigma_{zz}$$

Наибольшие напряжения σ_{yy} в рассматриваемом случае распределения квазидислокаций сконцентрированы у середин ветвей 1, 2 ближе к концам 1, 2, и постепенно убывают от этой зоны в положительном направлении оси OY , где в области I вокруг вершины происходит переход от отрицательных напряжений от ветви 2 к положительным – у ветви 1 (рис. 3, в). Напряжения области II имеют наибольшие напряжения у концов 1, 2, убывая вдоль оси OX до зоны, параллельной оси OY и про-

ходящей через вершину, причем напряжения у конца 1 – отрицательны, у конца 2 – положительны. Напряжения у ветви 2 и в отрицательном, и в положительном направлении оси OY несколько больше по модулю напряжений у ветви 1.

Напряжения σ_{zz} сконцентрированы у середин ветвей 1, 2 и постепенно убывают при удалении от этих зон, причем знак напряжений меняется вокруг вершины полосы от отрицательного у ветви 1 к положительному у ветви 2 (рис. 3, ε). Напряжения у ветви 2 несколько больше напряжений у ветви 1. В области 2 наибольшие напряжения наблюдаются у концов 1, 2, уменьшаясь при удалении от этих зон, притом у конца 2 напряжения отрицательны, у конца 1 – положительны.

Для варианта формы полосы сдвига, которая описывается функцией (5), где $A_2 = -1/100 \text{ мкм}^{-1}$; $B_2 = 100 \text{ мкм}$; $C_2 = 5 \text{ мкм}$; $D_2 = 1/2$, при распределении плотности квазидислокаций по функции (6), наибольшие напряжения σ_{xx} локализованы у вершины (рис. 4, a). Причем напряжения знакопеременны и положительны в положительном направлении оси OY . Напряжения уменьшаются от этой области к концам 1, 2. В области II напряжения более стабильны и отрицательны. Они медленно убывают от концов 1, 2 к вершине. В периодических вершинах гармоник, ближе к концам 1 и 2, напряжения отрицательны и по модулю в разы меньше напряжений у впадин. Но с приближением к вершине напряжения у вершин гармоник становятся положительными при относительной стабильности значений отрицательных напряжений у впадин гармоник, и у вершины, по модулю, напряжения становятся близки, достигая наибольшей амплитуды.

Поля напряжений σ_{xy} у полосы сдвига на некотором расстоянии от вершины в отрицательном и в положительном направлении оси OX от нее, постепенно уменьшаясь при удалении от этих зон, достигая минимума в области I (рис. 4, b). В отрицательном направлении оси OX от вершины напряжения отрицательны, в положительном направлении оси OX – положительны. В области II наибольшие напряжения по модулю локализованы в области от концов 1 и 2 полосы до середин ветвей 1 и 2, соответственно, убывая от этих зон. У ветви 1 напряжения положительны, у ветви 2 – отрицательны. В отрицательном направлении оси OY от конца 1 и в положительном направлении оси OX от него находится область локализации отрицательных напряжений. В отрицательном направлении оси OX и в отрицательном направлении оси OY от конца 2 расположена локальная зона положительных напряжений. Также в области II, а именно на некотором расстоянии от вершины по оси OY и при небольшом смещении в положительном направлении оси OX от нее находится область локализации отрицательных напряжений.

Видно, что напряжения σ_{yy} отрицательны во всей области II, при этом напряжения локализуются не только на полосе сдвига, но и на некотором удалении в положительном направлении оси OY от вершины, уменьшаясь в стороны от локального отрицательного максимума по модулю и от полосы сдвига (рис. 4, b). В области II напряжения положительны и распределены вдоль всей полосы равномерно. У впадин и вершин гармоник напряжения примерно равны по модулю (у вершин они отрицательны, у впадин – положительны). Максимальные значения напряжений по модулю в пиках гармоник полосы сдвига достигаются на четверти ее длины от концов 1, 2.

В области I напряжения σ_{zz} максимальны и положительны и постепенно уменьшаются в направлении к концам 1 и 2 (рис. 4, ε). В области II напряжения отрицательны и стабильны. Только в области ближе к концам 1, 2 напряжения увеличиваются. Во впадинах гармоник ближе к краям полосы сдвига данные напряжения

значительно больше по модулю и отрицательны. У вершины полосы наблюдается обратная закономерность. Значительно возрастает напряжение в вершинах, по модулю в разы превосходят напряжения во впадинах.

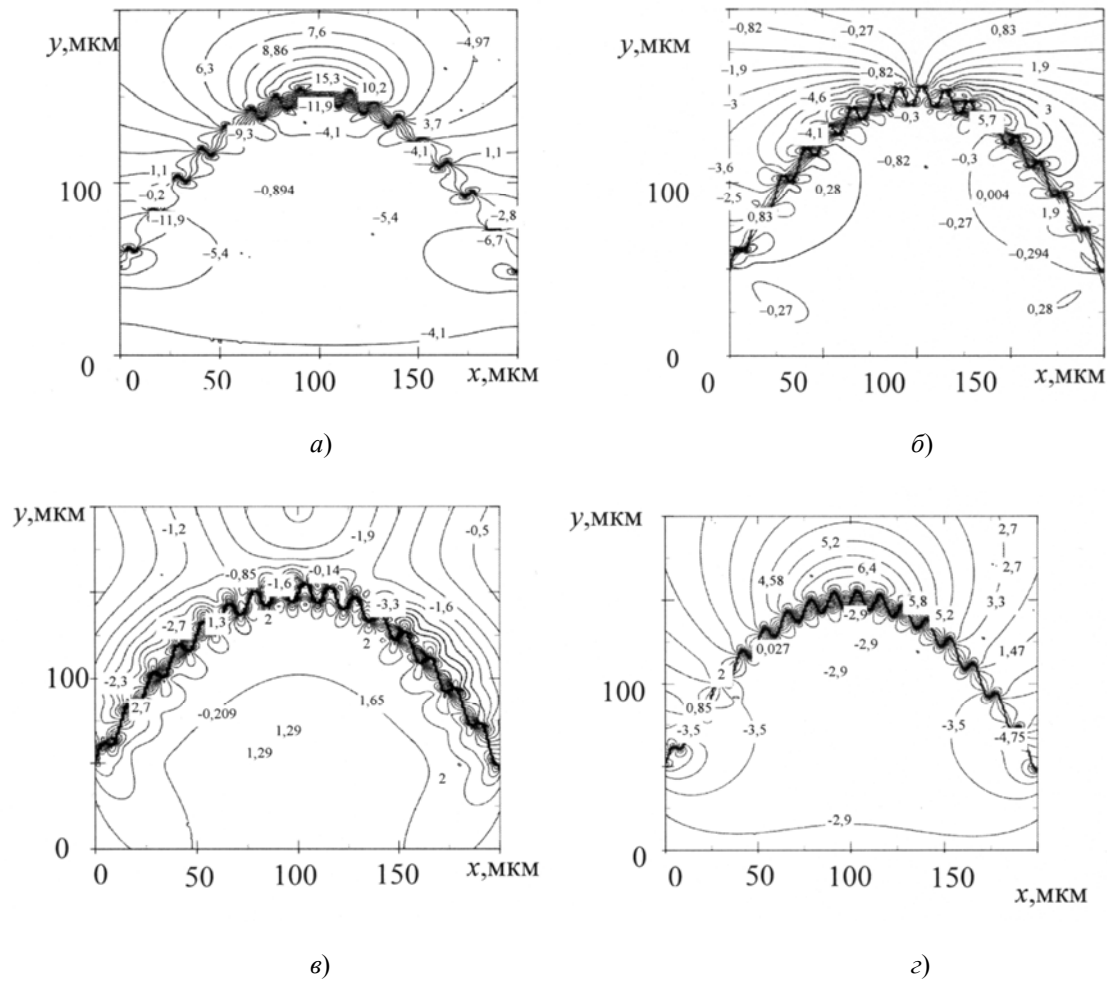


Рис. 4. Распределение напряжений у полосы сдвига формы, описываемой функцией (5), при законе распределения плотностей дислокаций, описываемом функцией (6):
 а – σ_{xx} ; б – σ_{xy} ; в – σ_{yy} ; г – σ_{zz}

В случае когда форма полосы сдвига описывается функцией (5), где $A_2 = -1/100 \text{ мкм}^{-1}$; $B_2 = 100 \text{ мкм}$; $C_2 = 5 \text{ мкм}$; $D_2 = 1/2$, при линейном распределении плотности квазидислокаций, описываемом функцией (7), где $A_3 = 0,9 \cdot 10^6 \text{ м}^{-2}$; $B_3 = 6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$; наибольшие напряжения σ_{xx} в области I локализованы в отрицательном и в положительном направлении оси OX от вершины и постепенно убывают при удалении от этих зон (рис. 5, а). Причем в отрицательном направлении оси OX от полосы наблюдаются отрицательные напряжения, а в положительном направлении оси OX – положительные. В области, расположенной в положительном направлении оси OY от вершины, напряжения меняются по знаку. В области II наибольшие напряжения сконцентрированы у концов 1, 2 и постепенно убывают при удалении от этих зон. У конца 1 напряжения положительны, у конца 2 – отрицательны. Под вершинами гармоник ветви 1 наблюдаются значительные напряжения, по сравнению с напряжениями над впадинами, и отрицательны, в отличие от напряжений над впадинами. У ветви 2 наблюдается обратная закономерность. Притом напряжения в области I и на некотором расстоянии от вершины в положительном направлении

оси OX несколько больше напряжений левее вершины по модулю. В области II закономерности распределения напряжений аналогичны, но в положительном направлении оси OX от вершины напряжения отрицательны.

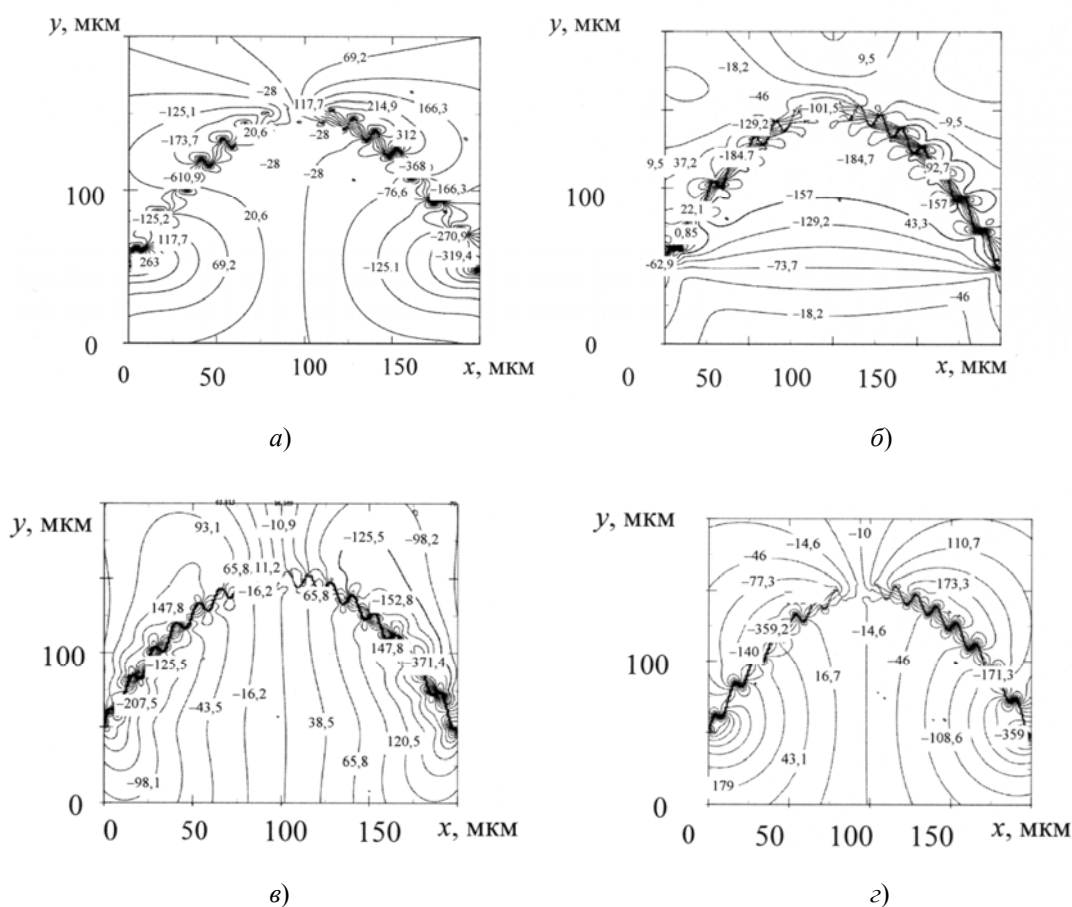


Рис. 5. Распределение напряжений у полосы сдвига формы, описываемой функцией (5), при линейном законе распределения плотностей дислокаций, задаваемом функцией (7):

$$a - \sigma_{xx}; \quad b - \sigma_{xy}; \quad v - \sigma_{yy}; \quad z - \sigma_{zz}$$

В области I напряжения σ_{xy} локализованы у вершины и у ветвей 1, 2, причем значения напряжений в положительном и в отрицательном направлении оси OX от полосы равны, а линейный закон распределения плотности квазидислокаций отражен в смещении полей напряжений в положительном и в отрицательном направлении оси OX от полосы, а также в их относительных размерах (рис. 5, б). Наибольшие напряжения в области II сконцентрированы в области, ограниченной полосой сдвига до середины расстояния от вершины до основания полосы сдвига оси OY , и постепенно убывают в направлении к основанию полосы сдвига. Данные напряжения отрицательны.

Напряжения σ_{yy} локализованы у середин ветвей 1, 2 и убывают при удалении от этих зон в положительном направлении оси OY , меняясь с отрицательных в положительном направлении оси OY от ветви 2 на положительные – над ветвью 1 (рис. 5, в). Притом, по модулю напряжения в положительном направлении оси OX от вершины больше тех, что вызываются в отрицательном направлении оси OX . Напряжения в области II также знакопеременны и имеют максимумы ближе к концам 1, 2 полосы сдвига, изменяясь вдоль оси OX от положительных у конца 2 к отрицательным у конца 1.

В области I напряжения σ_{zz} сконцентрированы у полосы сдвига на некотором расстоянии от вершины напряжений в положительном и в отрицательном направлении оси OX (рис. 5, з). Причем напряжения носят знакопеременный характер: в отрицательном направлении оси OX напряжения отрицательны, в положительном направлении оси OX – положительны. Значения напряжений по модулю в положительном направлении оси OX от вершины несколько больше напряжений в отрицательном направлении оси OX . В области I в положительном направлении от вершины напряжения меняют знак. В области II напряжения сконцентрированы у концов 1, 2, постепенно уменьшаясь при удалении от этих зон, причем, напряжения у конца 2 несколько больше по модулю напряжений у конца 1.

Заключение

Используя математическое моделирование дислокационных процессов для описания деформирования аморфных материалов, основываясь на методе функций Грина, была предложена методика расчета полей напряжений у параболических полос сдвига в металлических стеклах. Были приведены результаты апробации предложенной методики расчета полей напряжений при различных законах распределения квазидислокаций. Выявлены основные закономерности распределения полей напряжений при различных законах распределения плотностей квазидислокаций.

Литература

1. Верещагин, М. Н. Негомогенная пластическая деформация аморфных сплавов на основе железа / М. Н. Верещагин, В. Г. Шепелевич, О. М. Остриков. – Гомель : ГГТУ им. 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 // Изв. высш. учеб. заведений. Черная металлургия. – 2003. – № 3. – С. 35–37.
3. Gusakova, O. Effect of melt cooling rate on microstructure of Sn-Bi and Sn-Pb eutectic alloys / O. Gusakova, V. Shepelevich, L. Scherbachenko // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 856. – P. 236–240.
4. Цзинцзе, Ван. Быстрозатвердевшие фольги индия / Ван Цзинцзе, В. Г. Шепелевич // Металлургия. – Минск : РИВШ, 2011. – 172 с.
5. Гусакова, О. В. Быстрозатвердевшие сплавы олова / О. В. Гусакова, В. Г. Шепелевич // Металлургия. – Минск : РИВШ, 2012. – 150 с.
6. Сивцова, П. А. Быстрозатвердевшие сплавы алюминия с переходными металлами / П. А. Сивцова, В. Г. Шепелевич // Металлургия. – Минск : РИВШ, 2013. – 176 с.
7. Глезер, А. М. Структура и механические свойства аморфных сплавов / А. М. Глезер, Б. В. Молотиллов. – М. : Металлургия, 1992. – 208 с.
8. Остриков, О. М. Механика двойникования твердых тел / О. М. Остриков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 301 с.
9. Судзуки, К. Аморфные металлы / К. Судзуки, Х. Фудзимори, К. Хасимото ; под ред. Ц. Масумото. – М. : Металлургия, 1987. – 328 с.
10. Прецизионные сплавы. Сплавы с минимальными температурными коэффициентами линейного расширения / А. И. Радьков [и др.]. – М. : Металлургия, 1980. – С. 11–16.

11. Металлические стекла / под ред. Д. Д. Гильмана, Х. Д. Лими. – М. : Металлургия, 1984. – 264 с.
12. Золотухин, И. В. Физические свойства аморфных металлических материалов / И. В. Золотухин. – М. : Металлургия, 1986. – 176 с.
13. Конверистый, Ю. К. Физико-химические основы создания аморфных металлических сплавов / Ю. К. Конверистый, Э. К. Осипов, Е. А. Трофимова. – М. : Наука, 1983. – 145 с.
14. Структура аморфных металлических сплавов / Ю. А. Скаков [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия : тез. докл. МИСиС, 1980. – С. 83.

Получено 14.01.2015 г.