

ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ СТЕКЛЕ У ПОЛОС СДВИГА ТИПА ВОЛНИСТЫХ ЛУЧЕЙ

А.А. Рюмцев, О.М. Остриков

Предложена методика расчета полей напряжений у полос сдвига типа изогнутых лучей формы с гармонической составляющей, формирующихся у поверхности металлического стекла. Представлен схематически вид полосы в трехмерном пространстве. Получены и описаны поля напряжений у полосы сдвига в различных плоскостях. Выявлены места, где сконцентрированы наибольшие напряжения и, соответственно, с наибольшей вероятностью дальнейшего развития в них трещин

Ключевые слова: металлические стекла, полоса сдвига, дислокационный подход

В работах [1]–[4] был предложен подход к моделированию пластической деформации в металлических стеклах на базе моделирования дислокационных процессов. Так как металлическое стекло является материалом нового поколения с большими перспективами использования его в различных сферах производства [3], оно нуждается в тщательном изучении его физических и механических свойств, границ условий и режимов его использования. В работах [1]–[3] описываются каналы сдвиговой деформации в металлических стеклах, а именно полосы сдвига, которые в зависимости от величины приложенной нагрузки могут быть двух типов: полосы сдвига типа лучей и типа чешуйчатых навалов [1], [2]. На данный момент еще не построена общая теория по тематике полос сдвига и моделированию процессов их возникновения и поведения в материале. В частности, не описана картина распределения полей напряжений в металлических стеклах у полос сдвига типа изогнутых лучей с гармонической составляющей, формирующихся у поверхности материала. Этот вопрос важен в виду того, что гармоническая составляющая в форме следа полосы сдвига присутствует при активном взаимодействии с другими полосами сдвига, монокристаллическими зернами, концентраторами напряжений и т.д., что является распространенным случаем формирования полос сдвига [1].

Цель работы заключается в разработке численно-аналитического метода расчета полей напряжений в металлических стеклах у полос сдвига типа изогнутых лучей формы с гармонической составляющей, формирующихся у поверхности металлического стекла.

Постановка задачи. Полосы сдвига с гармониками, образующиеся у поверхности материала в сечении, перпендикулярном ее образующей линии на поверхности материала и самой поверхности, имеют вид, представленный на рис. 1.

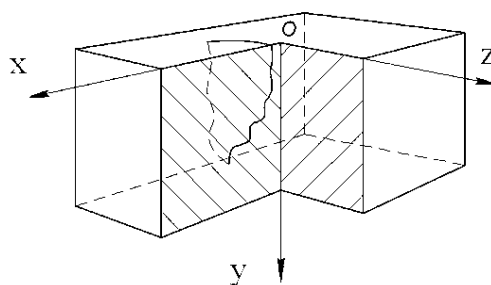


Рис. 1. Схематическое изображение полосы сдвига типа изогнутого луча с гармонической составляющей формы у поверхности аморфного материала в разрезе

На рис. 2 схематически изображен след криволинейной полосы сдвига в форме изогнутых лучей с гармонической составляющей формы в плоскости разреза у поверхности металлического стекла. Гармоническая составляющая формы полосы сдвига обусловлена ее активным взаимодействием с другими полосами сдвига, монокристаллическими зернами, концентраторами напряжений и т.д.

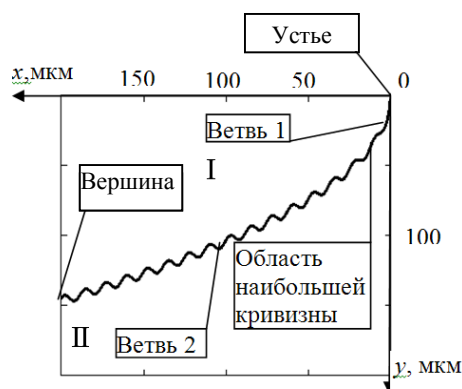


Рис. 2. Схематичное изображение полосы сдвига типа изогнутых лучей с гармонической составляющей формы

При формировании полосы сдвига на поверхности аморфного материала образуется ступенька величиной δ . В этом случае напряжения, создаваемые криволинейной полосой сдвига,

Рюмцев Александр Александрович – ГГТУ им. П.О. Сухого, аспирант, e-mail: alexrumceff@gmail.com
Остриков Олег Михайлович – ГГТУ им. П.О. Сухого, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: omostrikov@mail.ru

определяются с помощью криволинейного интеграла:

$$\sigma_{ij} = \int_{L_{AB}} \rho \sigma_{ij}^{(0)} ds, \quad (1)$$

где L_{AB} – задает профиль полосы сдвига; ρ – плотность дислокаций, формирующих полосу сдвига; $\sigma_{ij}^{(0)}$ – напряжения, создаваемые единичной дислокацией.

Методика расчета полей напряжений в металлических стеклах у полос сдвига типа изогнутых лучей с гармониками у поверхности аморфного материала базируется на использовании дислокационного подхода в моделировании картины полей напряжений в материале [1]. Основываясь на теории дислокационных трещин [5] понятие дислокации аналогично понятию квазидислокаций, применяемого для удобства математического описания явления.

Криволинейный интеграл (1) по общеизвестным правилам [5] сводится к определенному интегралу:

$$\sigma_{ij}(x, y) = \int_{a+\delta}^L \sqrt{1 + (f'(\xi))^2} \rho(\xi) \sigma_{ij}^{(0)}(x, y, \xi) d\xi, \quad (2)$$

где L – длина полосы сдвига, равная проекции L_{AB} на ось OY ; a – глубина залегания источника дислокаций; $f(\xi)$ – функция, определяющая форму полосы сдвига; $\rho(\xi)$ – линейная плотность дислокаций в полосе сдвига; ξ – параметр интегрирования; $\sigma_{ij}^{(0)}(x, y, \xi)$ – напряжения, создаваемые единичной дислокацией, которые находятся по формулам [3]:

$$\sigma_{xz}^{(0)}(x, y, \xi) = B_b \cdot \left[\frac{y - f_1(\xi)}{(x - \xi)^2 + (y - f_1(\xi))^2} - \frac{y + f_1(\xi)}{(x - \xi)^2 + (y + f_1(\xi))^2} \right], \quad (3)$$

$$\sigma_{yz}^{(0)}(x, y, \xi) = -B_b \cdot \left[\frac{x - \xi}{(x - \xi)^2 + (y - f_1(\xi))^2} - \frac{x - \xi}{(x - \xi)^2 + (y + f_1(\xi))^2} \right],$$

где

$$B_b = \frac{\mu b_b}{2\pi}. \quad (4)$$

Здесь μ – модуль сдвига; ν – коэффициент Пуассона; b_b – модуль вектора Бюргерса винтовой дислокации, образующей полосу сдвига.

Форма полосы сдвига, представленная на рис. 2, может быть описана функцией

$$f(\xi) = A_1 \cdot \ln(\xi) + B_1 \cdot \xi^{1/2} + C_1 \cdot \sin(D_1 \cdot \xi), \quad (5)$$

где A_1, B_1, C_1 и D_1 – эмпирические коэффициенты.

Функция (5) описывает параболическую кривую, соответствующую форме полосы сдвига в виде чешуйчатого навала, окаймляющего отпечаток индентора [1], без волнистости формы.

В данной работе рассмотрим четыре варианта распределения плотности дислокаций $\rho(\xi)$. Пусть в первом случае плотность дислокаций постоянна

$$\rho(\xi) = 10^5 \text{ м}^{-1}. \quad (6)$$

Во втором – закон распределения дислокаций описывается линейной функцией

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

где A_3, B_3 – эмпирические коэффициенты.

В третьем случае закон распределения дислокаций описывается квадратичной функцией типа

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

где A_4, B_4 , и C_4 – эмпирические коэффициенты.

Пусть в четвертом случае плотность дислокаций изменяется по гармоническому закону, и для варианта, описанного формулами (4) закон распределения дислокаций пусть будет задан функцией

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

где A_5 – эмпирический коэффициент.

Результаты расчетов полей напряжений и их обсуждение.

В случае, когда форма полосы сдвига описывается функцией (5), где $A_1 = 1$ мкм, $B_1 = 10 \text{ мкм}^{\frac{1}{2}}$; $C_1 = 5$ мкм; $D_1 = 1/2$ мкм; при распределении плотности дислокаций по закону, описываемому функцией (6), где $\rho(\xi) = 10^5 \text{ м}^{-1}$,

наибольшие напряжения σ_{zx} сконцентрированы у устья полосы сдвига и постепенно убывают при удалении от него, при этом в области I значения напряжений убывают медленно в положительном направлении по оси OX . До вершины полосы сдвига поля напряжений меняются на положительные вокруг него и в области II имеют максимум положительных значений у отрезка полосы сдвига у вершины. Данные напряжения убывают при удалении от этой зоны и вокруг отрезка полосы сдвига против часовой стрелки у ее устья вновь становятся отрицательными, как это показано на рис. 3, а.

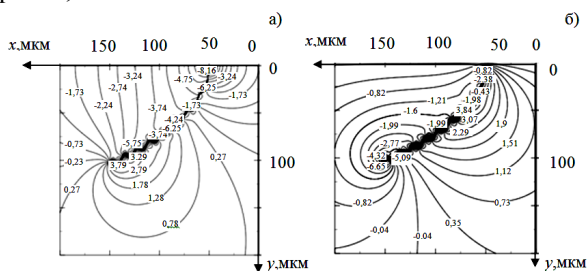


Рис. 3. Распределение напряжений у полосы сдвига, описываемой функцией (5), при законе распределения плотностей дислокаций, описываемом функцией (7): а) σ_{zx} ; б) σ_{zy} .

В области II максимальные напряжения σ_{zy} сконцентрированы у отрезка при устье полосы сдвига и постепенно убывают при удалении от этой зоны. Данные напряжения положительные. Следует отметить, что в области II напряжения знакопеременны и меняются с отрицательных на положительные вокруг отрезка у вершины полосы сдвига.

В области I наибольшие по модулю и отрицательные напряжения σ_{zy} сконцентрированы у вершины, и постепенно убывают преимущественно в отрицательном направлении по оси OY , согласно рис. 3, б.

В случае, когда форма полосы сдвига описывается функцией (5), где $A_1 = 1$ мкм, $B_1 = 10 \text{ мкм}^{\frac{1}{2}}$; $C_1 = 5$ мкм; $D_1 = 1/2$ мкм; при линейном распределении плотности дислокаций, описываемом функцией (7), где $A_3 = 0,9[10^5 \text{ м}^{-2}]$; $B_3 = 6[10^5 \text{ м}^{-1}]$.

Наибольшие напряжения σ_{zx} в области II наблюдаются у отрезка полосы сдвига у вершины. При удалении от этой зоны напряжения убывают. Стоит отметить, что в области II напряжения знакопеременны. Напряжения становятся отрицательными вокруг отрезка полосы сдвига от ее устья до середины ветви 2. В области I вокруг вершины полосы сдвига напряжения становятся отрицательными и достигают максимальных по модулю значений у отрезка полосы сдвига у вершины.

В области II наибольшие напряжения сконцентрированы у середины ветви 2 полосы сдвига и постепенно убывают при удалении от этой зоны в отрицательном направлении оси OX и положительном вдоль оси OY . Данные напряжения положительны.

В области I наибольшие по модулю напряжения сконцентрированы у вершины полосы сдвига и убывают при удалении от этого конца. В области II у отрезка полосы сдвига у вершины в положительном направлении по оси OY по часовой стрелке вокруг этой зоны напряжения становятся отрицательными. Также в области I напряжения сконцентрированы у отрезка полосы сдвига у ее устья.

Для следующего варианта формы полосы сдвига, которая описывается функцией (5), где

$A_1 = 1$ мкм, $B_1 = 10 \text{ мкм}^{\frac{1}{2}}$; $C_1 = 5$ мкм; $D_1 = 1/2$ мкм при нелинейном распределении плотности дислокаций, описываемом функцией (8), где $A_4 = 1/10[10^5 \text{ м}^{-3}]$; $B_4 = 1/5[10^5 \text{ м}^{-2}]$; $C_4 = 5[10^5 \text{ м}^{-1}]$.

В области II напряжения знакопеременны. Наибольшие положительные напряжения сконцентрированы у отрезка полосы сдвига у вершины. Данные напряжения убывают при удалении от этой зоны преимущественно в положительном направлении по оси OX .

Вокруг середины ветви 2 полосы сдвига против часовой стрелки напряжения становятся отрицательными и ближе к вершине против часовой стрелки напряжения становятся положительными.

В области II наибольшие положительные напряжения сконцентрированы у середины ветви 2 и убывают при удалении от этой зоны преимущественно в отрицательном направлении по оси OX . В области I наибольшие по модулю и отрицательные напряжения сконцентрированы у вершины и убывают при удалении от этой зоны.

Следует отметить, что в положительном направлении по оси OY от вершины полосы сдвига вокруг него против часовой стрелки напряжения становятся положительными.

Также в области I наблюдаются положительные напряжения с наибольшими значениями у отрезка полосы сдвига у ее устья и убывают преимущественно в отрицательном направлении по оси OY .

Для полосы сдвига формы, описываемой функцией (6), где $A_1 = 1$ мкм, $B_1 = 10 \text{ мкм}^{\frac{1}{2}}$; $C_1 = 5$ мкм; $D_1 = 1/2$ мкм; распределение плотности дислокаций по гармоническому закону, описываемому функцией (10), где $A_6 = 0,3[10^5 \text{ м}^{-2}]$; $B_6 = 20[10^5 \text{ м}^{-1}]$, наибольшие напряжения σ_{zx} сконцентрированы у полосы сдвига у ветви 1 и быстро убывают при удалении от этой зоны в области I и II. Данные напряжения отрицательны. При этом данные поля напряжений примыкают к линии поверхности материала.

От устья полосы сдвига до ее вершины поля напряжений имеют гармонический вид. Причем в пиках гармоник напряжения минимальны и положительны, ближе к средней линии гармоник напряжения достигают максимальных по модулю и отрицательных значений. В положительном и отрицательном направлениях по оси OX от полосы сдвига наблюдаются области относительно небольших напряжений.

Наибольшие напряжения σ_{zy} сконцентрированы у ветви 1 полосы сдвига и быстро убывают при удалении от этой зоны, причём в области II напряжения положительны, а в области I – отрицательны. На протяжении остального участка полосы сдвига поля напряжений имеют вид гармоник с максимальными по модулю и отрицательными по значению напряжениями. У вершины в области II в положительном по оси OX направлении наблюдается небольшая область концентрации положительных напряжений.

Методика расчета полей напряжений у полос сдвига, имеющих форму изогнутых лучей, у поверхности аморфного материала, находящейся у поверхности аморфного материала, предложенная в данной статье, при большом увеличении, при котором форма полосы сдвига имеет искривления и волнистости, вызванные активным взаимодействием с другими полосами сдвига, монокристаллическими зёрнами, концентраторами напряжений и т.д.,

позволяет создать теоретическую базу для моделирования процесса деформации и распределения напряжённостей в материале, что в свою очередь позволит прогнозировать места концентрации наибольших напряжений.

Литература

1. Верещагин М.Н., Шепелевич В.Г., Остриков О.М. Негомогенная пластическая деформация аморфных сплавов на основе железа. Монография. - Гомель: Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», 2004. – 134 с.
2. Остриков О.М. Дислокационная гармоническая модель полосы сдвига в аморфном материале // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2007, № 4. – С. 41–48.
3. Остриков О.М. Уравнение равновесия криволинейной полосы сдвига, находящейся у поверхности аморфного материала // Материалы. Технологии. Инструменты. — 2012. — Т. 17, № 4. — С. 17 — 21.
4. Верещагин М.Н., Остриков О.М. Аналогии и различия в развитии сдвиговой пластической деформации при локальном деформировании аморфных и монокристаллических материалов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2003, № 3. – С. 35 – 37.
5. Астафьев В.И., Радаев Ю.Н., Степенова Л.В. Нелинейная механика разрушения. – Самара: «Самарский университет», 2001. – 562 с.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. – М.: Наука, 1974. – 832 с.

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

STRESS FIELD IN METALLIC GLASSES HEVE SHEAR BANDS TYPE WAVY RAY

A.A. Rumtsau, O.M. Ostrikov

The method of calculating the stress field at the shear bands have been considered on the anvil of metal glass. These bands are located near the surface and have the shape of curved beams with harmonic component formed. It is based on the dislocation approach description of the plastic deformation in an metallic glass. Mathematically modeled the process of deformation and as a result of the stress field are described in the material caused by the shear bands in different planes. It makes possible to predict the development of cracks and their direction

Key words: metal glass, shear band, dislocation approach