

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ У КРИВОЛИНЕЙНОЙ ПОЛОСЫ СДВИГА ТИПА ЧЕШУЙЧАТОГО НАВАЛА, НАХОДЯЩЕГОСЯ У ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СТЕКЛА

Введение. Методика расчета полей напряжений у криволинейной полосы сдвига, находящейся у поверхности аморфного материала, базируется на использовании квазидислокационного подхода в решении задачи расчета полей напряжений, ввиду подобия процесса развития пирамидального скольжения в монокристаллах и неомогенной пластической деформации в аморфных средах при их локальном деформировании [1–7]. Данный подход к разработке методики расчета полей напряжений позволяет воспользоваться уже известными приемами математического моделирования дислокационных процессов [1].

Цель данной работы – разработка численно-аналитического метода расчета полей напряжений у криволинейной полосы сдвига, находящейся у поверхности аморфного материала.

Постановка задачи. Согласно [1, 2], форма полос сдвига в зависимости от усилия, приложенного к индентору, может представлять собой луч или параболическую кривую (чешуйчатый навал). В данной работе рассматриваются только полосы сдвига в виде параболической кривой, схематическое изображение которых представлено на рис. 1. В данном случае, согласно [1], принимается краевой тип квазидислокаций. При большом масштабе рассмотрения полосы сдвига форма ее не является абсолютно гладкой (рис. 1, а), а имеет искривления в виде волнистостей, вызванных активным взаимодействием с другими полосами сдвига, монокристаллическими зернами, концентраторами напряжений и т.д. [1, 2]. Подобные искривления формы полосы сдвига можно условно представить как синусоиду, наложенную на параболу. Изображение схематическое данной формы полосы сдвига представлено на рисунке 1, б.

Напряжения, создаваемые криволинейной полосой сдвига, определяются с помощью криволинейного интеграла:

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

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

Криволинейный интеграл по общеизвестным правилам [3] сводится к определенному интегралу:

$$\sigma_{ij}(x, y) = \int_0^L \frac{1}{\sqrt{1+(f'(x))^2}} \sigma_{ij}^{(0)}(x, y) dx, \quad (2)$$

где L – величина проекции L_{AB} на ось OY ; $f(x)$ – функция, определяющая форму полосы сдвига; $f'(x)$ – линейная плотность квазидислокаций в полосе сдвига; dx – параметр интегрирования;

$\sigma_{ij}^{(0)}(x, y)$ – напряжения, создаваемые единичной квазидислокацией у поверхности металлического стекла, которые находятся по

формулам [4]:

$$\sigma_{xx}^{(0)}(x, y) = B_{кр} \frac{(x - f_1(x))[(x - f_1(x))^2 - (y - y_0)^2]}{[(x - f_1(x))^2 + (y - y_0)^2]^2} + B_{кр} \frac{(x - f_1(x))[(x - f_1(x))^2 - (y + y_0)^2]}{[(x - f_1(x))^2 + (y + y_0)^2]^2} + 4B_{кр} \frac{(x - f_1(x))y_0[(x - f_1(x))^2 - 3(y - y_0)^2 - (y + y_0)^2]}{[(x - f_1(x))^2 + (y - y_0)^2]^3},$$

$$\sigma_{yy}^{(0)}(x, y) = B_{кр} \frac{(x - f_1(x))[(x - f_1(x))^2 + 3(y - y_0)^2]}{[(x - f_1(x))^2 + (y - y_0)^2]^2} + B_{кр} \frac{(x - f_1(x))[(x - f_1(x))^2 + 3(y + y_0)^2]}{[(x - f_1(x))^2 + (y + y_0)^2]^2} \quad (3)$$

$$4B_{кр} \frac{(x - f_1(x))y[(x - f_1(x))^2 - 3(y - y_0)^2 - 3(y + y_0)^2]}{[(x - f_1(x))^2 + (y - y_0)^2]^3},$$

$$\sigma_{xy}^{(0)}(x, y) = B_{кр} \frac{(y - y_0)[(x - f_1(x))^2 - (y - y_0)^2]}{[(x - f_1(x))^2 + (y - y_0)^2]^2} + B_{кр} \frac{(y + y_0)[(x - f_1(x))^2 - (y + y_0)^2]}{[(x - f_1(x))^2 + (y + y_0)^2]^2}$$

$$2B_{кр} \frac{(x - f_1(x))^4 - 6(x - f_1(x))^2 y(y - y_0) + (y - y_0)(y + y_0)^3}{[(x - f_1(x))^2 + (y - y_0)^2]^3},$$

где

$$B_{кр} = \frac{b_{кр}}{2(1 - \nu)}. \quad (4)$$

Здесь $b_{кр}$ – модуль сдвига; ν – коэффициент Пуассона; $b_{кр}$ – модуль краевой квазидислокации, образующей полосу сдвига.

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

$$f(x) = A_1 x^2 + B_1, \quad (5)$$

где A_1 и B_1 – эмпирические коэффициенты.

Функция (5) 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

$$f(x) = A_2 x^2 + B_2 + C_2 \sin(D_2 x), \quad (6)$$

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

Рюмцев Александр Александрович, аспирант кафедры «Инженерная графика» Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого.

Остриков Олег Михайлович, к.физ.-мат.н., доцент, зав. кафедрой «Инженерная графика» Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого.

Беларусь, ГГТУ, 246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.

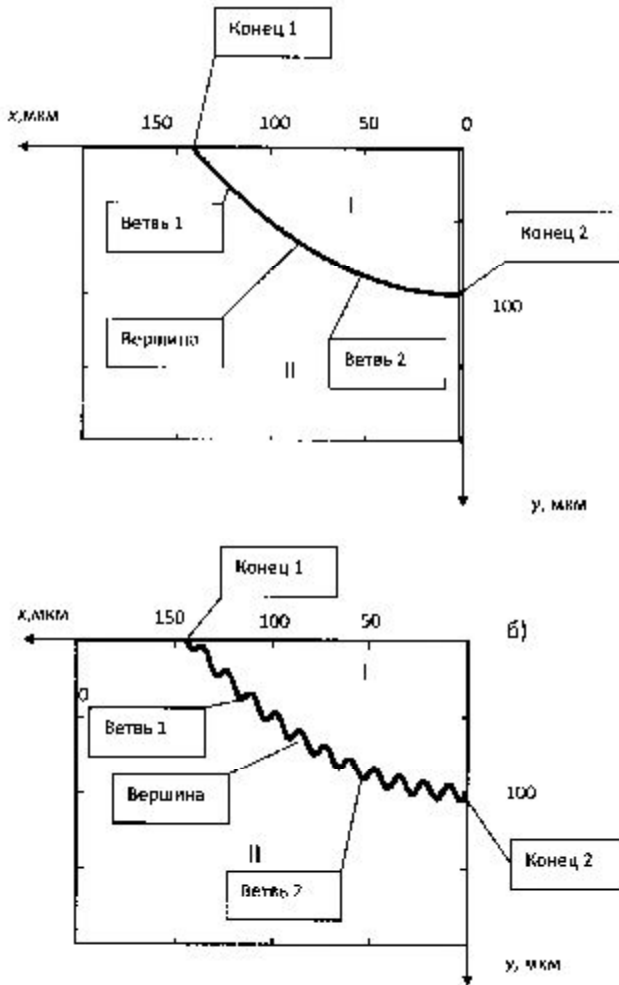


Рис. 1. Сечение твердого тела с полосой сдвига: а) схематичное изображение форм полос сдвига в виде чешуйчатых навалов, форма которых описывается функцией (5); б) в виде чешуйчатых навалов, форма которых описывается функцией (6)

В данной работе рассмотрим четыре варианта распределения плотности квазидислокаций ρ . Пусть в первом случае плотность квазидислокаций постоянна

$$\rho = 10^6 \text{ м}^{-1}. \quad (7)$$

Во втором закон распределения квазидислокаций описывается линейной функцией

$$\rho = A_3 \times x + B_3, \quad (8)$$

где A_3, B_3 — эмпирические коэффициенты.

В третьем случае закон распределения квазидислокаций описывается квадратичной функцией типа

$$\rho = A_4 \times x^2 + B_4 \times x + C_4, \quad (9)$$

где A_4, B_4, C_4 — эмпирические коэффициенты.

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

$$\rho = A_5 \times \sin(x), \quad (10)$$

где A_5 — эмпирический коэффициент.

Результаты расчетов полей напряжений и их обсуждение.

Для формы полосы сдвига, описываемой функцией (5), где примем $A_1 = 1/200 \text{ мкм}^{-1}, B_1 = 100 \text{ мкм}$; при распределении плотности квазидислокаций по закону, описываемому функцией (7), где $\rho = 10^6 \text{ м}^{-1}$, наибольшие напряжения σ_{xx} сконцентрированы у

полосы сдвига на некотором удалении от конца 2 в отрицательном удалении по оси OY в области I, II, причем в области II наблюдаются отрицательные напряжения, а в области I — положительные. Смена знака происходит у конца 2 полосы сдвига. Также напряжения локализованы у конца 1 как в области I, так и в области II, а также на некотором расстоянии от него у полосы сдвига в области II между концом 1 и вершиной полосы сдвига (рис. 2, а).

Для напряжений σ_{xy} характерны несколько зон концентрации напряжений (рис. 2, б). Одна из них расположена у конца 1 одновременно в двух областях, при этом в области II напряжения положительны, а в области I — отрицательны. Однако в области I напряжения быстро уменьшаются у поверхности и значительно медленнее убывают вдоль полосы сдвига в положительном направлении по оси OY. В области I напряжения уменьшаются в положительном направлении по оси OY и создают удаленные центры локализации напряжений в положительном направлении по оси OX от конца 1 полосы сдвига. Данные напряжения положительны. Также на уровне вершины полосы сдвига по оси OY и на некотором удалении от конца 1 полосы по оси OX в положительном направлении, находится зона отрицательных напряжений. В свою очередь в области II напряжения сконцентрированы у полосы сдвига в зоне от конца 2 до вершины полосы сдвига и уменьшаются в положительном направлении по оси OX и в положительном направлении по оси OY, но намного медленнее, чем в ранее указанном направлении (рис. 2, б).

В области I напряжения σ_{yy} локализованы у поверхности материала на некотором расстоянии от конца 1 полосы сдвига в отрицательном направлении по оси OX, а также у полосы сдвига в зоне между вершиной полосы и ее концом 1, а также на некотором удалении от конца 2 в отрицательном направлении по оси OX. Данные напряжения отрицательны и медленно убывают по модулю в направлении от этих зон. В области II напряжения локализованы у конца 1 и равномерно убывают от этой зоны. Также зоной локализации напряжений является зона у конца 2 полосы сдвига, при этом напряжения у конца 2 отрицательны и меняются на положительные вокруг вершины полосы сдвига (рис. 2, в).

Для полосы сдвига формы, описываемой функцией (5), где $A_1 = 1/200 \text{ мкм}^{-1}, B_1 = 100 \text{ мкм}$; при линейном распределении плотности квазидислокаций, описываемой функцией (8), где $A_3 = 0,9 \times 10^6 \text{ м}^{-2}; B_3 = 6 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$, напряжения σ_{xx} (рис. 3, а) локализованы на конце 1 у поверхности материала, а также на некотором удалении от данного конца в положительном и в отрицательном направлениях по оси OX у поверхности. В свою очередь в области II напряжения локализуются на некотором расстоянии от конца 2 у полосы сдвига, причем уменьшение их значений по модулю происходит в положительном по оси OX направлении и в отрицательном направлении по оси OY, а также в положительном направлении по оси OY, но с меньшей скоростью, нежели в указанном ранее направлении. Притом, данные напряжения положительны и меняют знак вокруг конца 2 (рис. 3, а).

Для рассматриваемой плоскости напряжения σ_{xy} (рис. 3, б) в области I локализованы у полосы сдвига в зоне между концом 2 и вершиной полосы сдвига, при этом эпицентр локализации напряжений смещен у полосы сдвига ближе к концу 2 напряжения уменьшаются по модулю при удалении от полосы сдвига и в направлении поверхности материала. Данные напряжения отрицательны (рис. 3, б). Напряжения в области I также локализованы у конца 2 и на некотором расстоянии от него у полосы сдвига и уменьшаются при удалении от этой зоны. Причем, непосредственно у конца 2 значения напряжений по модулю значительно медленнее убывают, чем в иных участках данной зоны полосы сдвига. Данные напряжения положительны. Также у полосы сдвига в зоне между вершиной и концом 1 полосы сдвига локализованы отрицательные напряжения. В результате действия указанных выше напряжений возникают две удаленные зоны локализации напряжений. Одна, расположенная на некотором расстоянии от поверхности материала, в положительном направлении по оси OX от полосы сдвига, с положительными значениями, вторая, расположенная на уровне конца 2 полосы сдвига по оси OY на некотором расстоянии от полосы в положительном направлении по оси OX — с отрицательными (рис. 3, б).

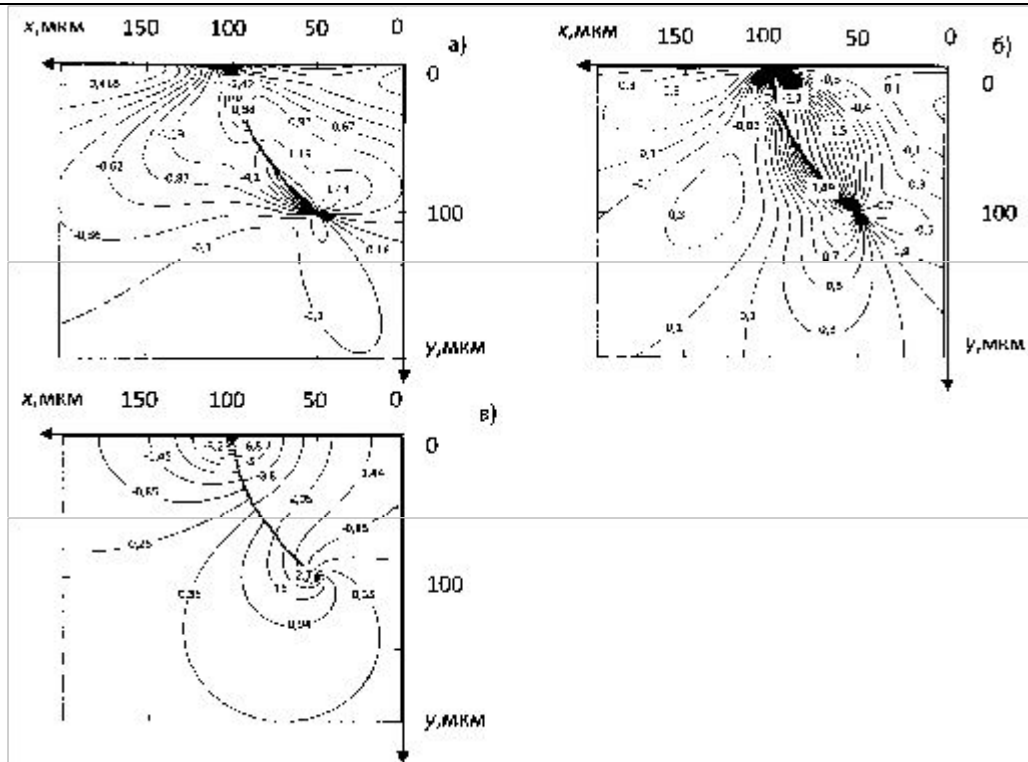


Рис. 2. Распределение напряжений у полосы сдвига, описываемой функцией (5), при законе распределения плотностей квазидислокаций, описываемом функцией (7): а) σ_{xx} ; б) σ_{yy} ; в) σ_{xy} (МПа)

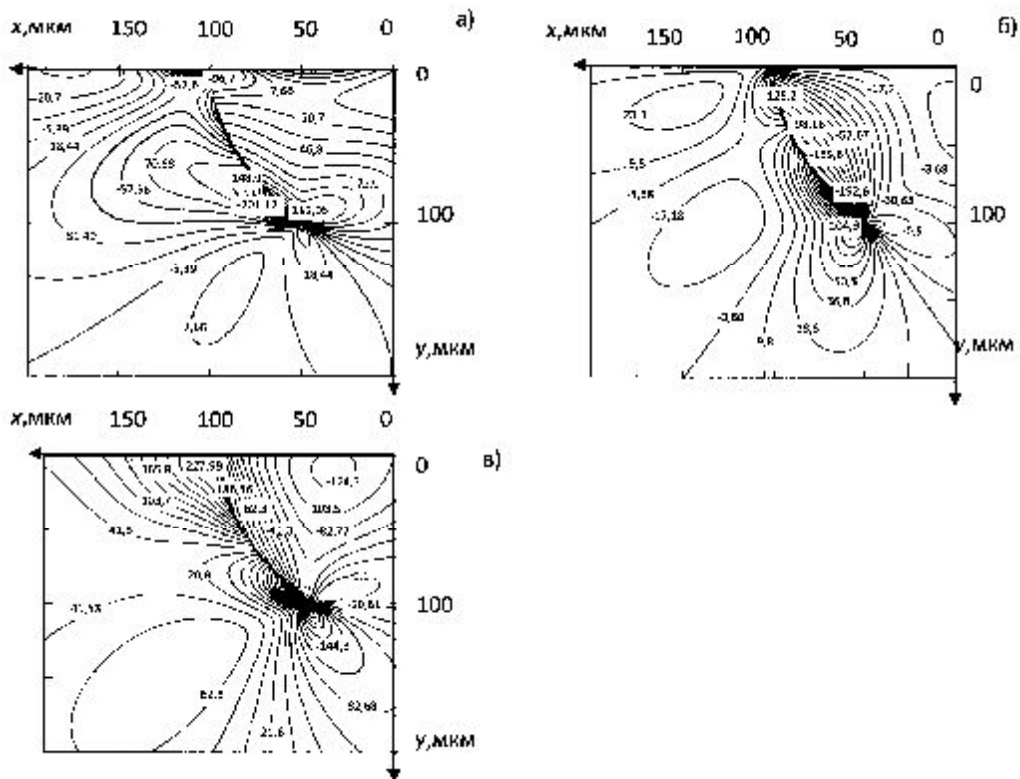


Рис. 3. Распределение напряжений у полосы сдвига, описываемой функцией (5), при нелинейном распределении плотности квазидислокаций, описываемом функцией (8): а) σ_{xx} ; б) σ_{xy} ; в) σ_{yy} (МПа)

Напряжения σ_{yy} (рис. 3, в) в области II локализованы на некотором удалении от конца 1 в положительном направлении по оси OX и уменьшаются при удалении от этой зоны в положительном направлении по оси OX и OY, с максимумом напряжений в области II в зоне у полосы сдвига от конца 2 до вершины полосы (рис. 3, в). Данные на-

пряжения уменьшаются преимущественно в положительном направлении по оси OX. В области I наблюдаются знакопеременные напряжения. В зоне у полосы сдвига от ее вершины до конца 1 сосредоточены положительные напряжения, которые уменьшаются в отрицательном направлении по оси OX и меняют знак, принимая отрица-

тельные значения, локализуясь на удалении от конца 1 полосы. Также в области I локализуются отрицательные напряжения, в зоне от конца 2 в положительном направлении по оси OY и отрицательном по оси OX , уменьшаясь в том же направлении. Данные напряжения, взаимодействуя с полями вышеперечисленных напряжений, создают зону положительных напряжений, близких к нулю у конца 2 полосы сдвига. Также отрицательные напряжения у конца 2 при взаимодействии с положительными напряжениями в области II создают локальную удаленную зону положительных напряжений на удалении от конца 2 в положительном направлении по оси OX .

Для полосы сдвига формы, описываемой функцией (5), где $A_1=1/200$ мкм⁻¹, $B_1=100$ мкм; при нелинейном распределении плотности квазидислокаций, описываемом функцией (9), где $A_4=1/10 \times 10^6$ м⁻³; $B_4=1/5 \times 10^6$ м⁻²; $C_4=5 \times 10^6$ м⁻¹, напряжения

σ_{xx} локализованы в зоне у конца 1 у поверхности (рис. 4, а). Данные напряжения отрицательны и уменьшаются по модулю при удалении от этой зоны. В области I напряжения локализованы у поверхности на удалении от конца 1 в отрицательном направлении по оси OX и уменьшаются при удалении от этой зоны. Также еще одним центром концентрации напряжений по оси OX является зона, расположенная у конца 2 в отрицательном направлении по оси OY от него. Данные напряжения положительны и постепенно уменьшаются при удалении от этой зоны в отрицательных направлениях по осям OY и OX . В области II у конца 2 сосредоточены отрицательные напряжения, которые уменьшаются в положительном направлении по оси OY . Также на некотором расстоянии от конца 2 у полосы сдвига сосредоточены отрицательные напряжения, которые уменьшаются в положительном направлении по оси OY . В свою очередь на некотором расстоянии от конца 2 у полосы сдвига сосредоточены отрицательные напряжения, уменьшающиеся по модулю в положительном направлении по оси OX и в отрицательном направлении по оси OY .

Наибольшие напряжения σ_{xy} (рис. 4, б) в области I наблюдаются в зоне у полосы сдвига в отрицательном направлении по оси OY от конца 2, и уменьшаются также в отрицательном направлении по оси OY к поверхности материала (рис. 4, б). На некотором расстоянии от поверхности в материале данные поля напряжения пересекают и огибают линию полосы сдвига, примыкая к зоне от конца 1 полосы сдвига до ее вершины в области II. Также напряжения локализуются в области I в отрицательном направлении по оси OX от конца 2 и уменьшаются в отрицательном направлении по оси OX . Данные поля напряжений на некотором удалении от полосы сдвига объединяются с полями напряжений, указанными выше. Данные напряжения отрицательны. В области II напряжения сконцентрированы у полосы сдвига в положительном направлении от конца 2 и до середины отрезка от конца 2 полосы сдвига до ее вершины, и уменьшаются в положительном направлении по оси OY от конца 2 при удалении от середины отрезка от вершины полосы сдвига до ее конца 2. При этом скорость падения значений напряжений, возникающих у конца 2, значительно ниже скорости уменьшения напряжений, возникающих у середины отрезка от конца 2 до вершины полосы сдвига. Также следует отметить, что данные полосы сдвига пересекаются и объединяются, не имея границ перехода. Также в области II формируется удаленная от полосы сдвига зона напряженности, расположенная в положительном направлении по оси OX отрезка от вершины полосы сдвига до ее конца 2 и имеющая отрицательные значения (рис. 4, б). Также на некотором расстоянии от поверхности и на удалении в положительном направлении по оси OX от полосы сдвига расположена еще одна зона локализации положительных напряжений.

Наибольшие по модулю и отрицательные напряжения σ_{yy} сконцентрированы в области II у конца 2 в отрицательном направлении по осям OX и OY от него (рис. 4, в). Также они уменьшаются в направлении вектора вышеуказанного направления. Другая зона локализации напряжений расположена на некотором расстоянии от конца 1 в положительном направлении по оси OX и на удалении от поверхности в материале. Данные напряжения постепенно убывают при удалении от этой зоны вдоль поверхности материала. Перечисленные напряжения положи-

тельны. В области I напряжения локализованы на небольшом удалении от поверхности материала и на расстоянии от полосы сдвига в отрицательном направлении по оси OX и уменьшаются при удалении от этой зоны. Также в области I напряжения локализованы вдоль полосы сдвига и убывают при удалении от нее в отрицательном направлении по оси OX . Данные напряжения положительны, но на некотором расстоянии от полосы сдвига данные напряжения становятся отрицательными и локализуются на удалении от полосы сдвига в направлении к поверхности материала. Также в области I напряжения локализованы в двух зонах, расположенных в отрицательном направлении от конца 2 по оси OX и в отрицательном и положительном направлениях по оси OY соответственно. Напряжения, которые расположены в отрицательном направлении по оси OY , положительны, а те, что расположены в положительном направлении – отрицательны. В области II также удаленно локализованы положительные напряжения, которые уменьшаются при удалении от этой зоны, преимущественно в положительных направлениях по осям OX и OY , меняясь на отрицательные на некотором удалении от этой зоны (рис. 4, в).

У полосы сдвига формы, описываемой функцией (5), где $A_1=1/200$ мкм⁻¹, $B_1=100$ мкм; распределение плотности квазидислокаций по гармоническому закону, описываемому функцией (10), где $A_5=0,3 \times 10^6$ м⁻¹, поля напряжений σ_{xx} плотно прилегают к полосе сдвига. Ширина полосы, составленной максимальными амплитудами, незначительно увеличивается к концу 2 полосы сдвига (рис. 5, а). Напряжения вдоль полосы сдвига отрицательны. Также в областях I и II точно локализованы напряжения в отрицательном и положительном направлениях по оси OX на уровне вершины полосы сдвига до поверхности материала по оси OY .

Подобная картина наблюдается и для напряжений σ_{xy} , за исключением того, что у конца 2 в отрицательных направлениях по осям OX и OY от него появляются поля положительных напряжений (рис. 5, б). Также здесь присутствуют точечные напряжения в положительном направлении по оси OX от полосы сдвига и по оси OY на уровне полосы сдвига и в положительном направлении от нее.

Напряжения σ_{yy} локализованы у полосы сдвига в виде плотно расположенных гармоник примерно равной амплитуды, пики которых образуют полосу, немного расширяющуюся к концу 2 (рис. 5, в). У конца 2 поля напряжений расположены лучами, исходящими из него. Данные напряжения чередуются по знаку и значению. Наибольшие по модулю – отрицательные, положительные же близки к нулю. На некотором расстоянии от конца 1 у полосы сдвига наблюдаются и в области I, и в области II симметрично расположенные относительно полосы сдвига поля напряжений. При этом, в области II поле положительных напряжений, в области I – отрицательных. Также в области I и в области II образуются точечные локализации напряжений. В области I они локализованы в отрицательном направлении по оси OX от полосы сдвига на некотором удалении от поверхности материала. Данные напряжения отрицательны. В области II в положительном направлении по оси OY на некотором удалении от конца 2 точно локализованы отрицательные напряжения. В области II в положительном направлении по осям OX и OY расположены четыре точки локализации положительных напряжений.

В случае, когда форма полосы сдвига описывается функцией (6), где $A_2=1/200$ мкм⁻¹; $B_2=100$ мкм; $C_2=5$ мкм; $D_2=1/2$; при распределении плотности квазидислокаций по закону, описываемому функцией (7), где $() = 10^6$ м⁻¹, в области I наблюдаются положительные напряжения σ_{xx} с максимумом у конца 2 полосы сдвига и, в отрицательных направлениях от него по осям OX и OY , уменьшаются при удалении от полосы сдвига к поверхности материала, а также вокруг конца 2 по часовой стрелке (рис. 6, а). В области II напряжения отрицательны с максимальным по модулю значением у полосы сдвига у отрезка между вершиной полосы и ее концом 1 и уменьшаются в положительном направлении по оси OX . В положительном направлении от конца 2 по оси OY напряжения преимущественно постоянны по модулю и отрицательны.

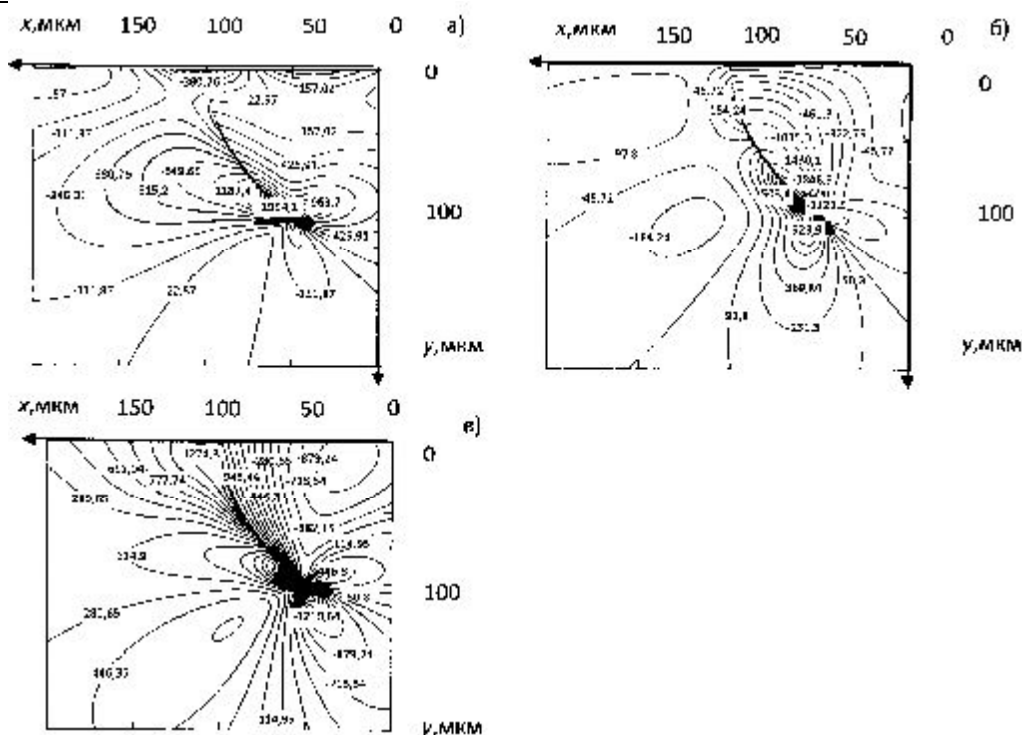


Рис. 4. Распределение напряжений у полосы сдвига, описываемой функцией (5), при гармоническом законе распределения плотности квазидислокаций, описываемом функцией (9): а) σ_{xx} ; б) σ_{xy} ; в) σ_{yy} (МПа)

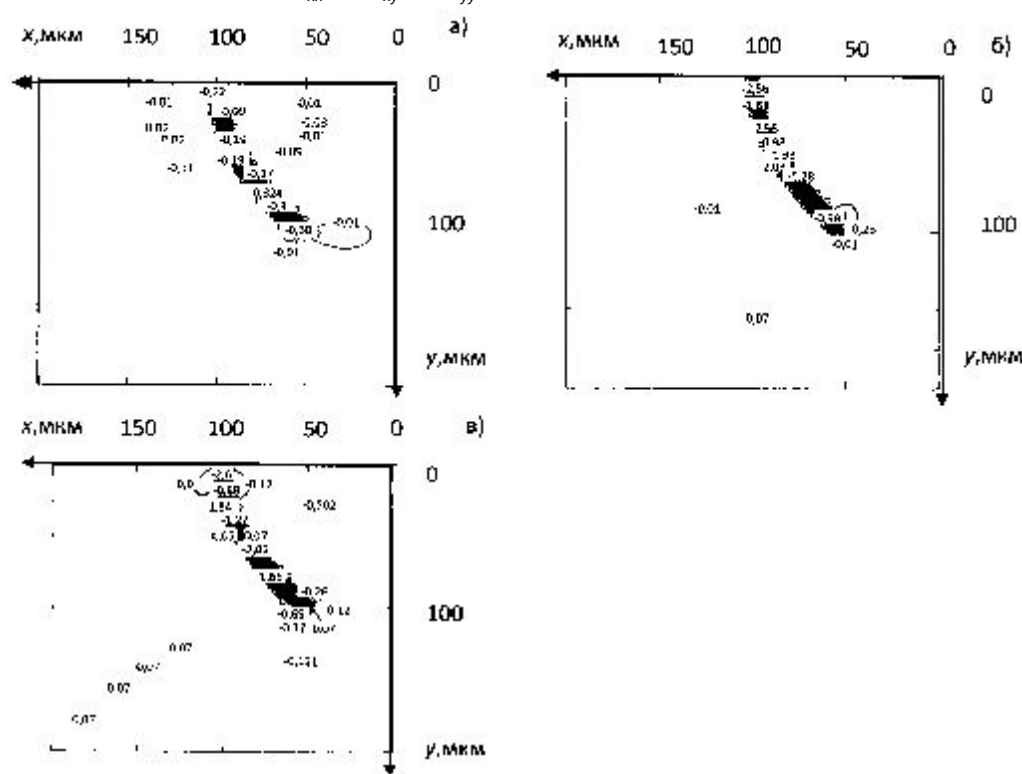


Рис. 5. Распределение напряжений у полосы сдвига, описываемой функцией (5), при законе распределения плотностей квазидислокаций, описываемом функцией (10): а) σ_{xx} ; б) σ_{xy} ; в) σ_{yy} (МПа)

В области I напряжения σ_{xy} в этом случае локализируются у полосы сдвига у зоны от вершины до конца 1 и уменьшаются при удалении от полосы сдвига в отрицательном направлении по оси OX и в направлении к поверхности. В области II напряжения знакопеременны (рис. 6, б). Максимумы положительных напряжений наблюдаются у полосы сдвига у отрезка от конца 2 полосы до ее вершины и умень-

шаются в положительном направлении от полосы сдвига и на некотором расстоянии от поверхности. Между этими зонами положительных напряжений имеется зона напряжений отрицательных, которая берет свое начало у полосы сдвига и уменьшается в положительных направлениях по осям OX и OY.

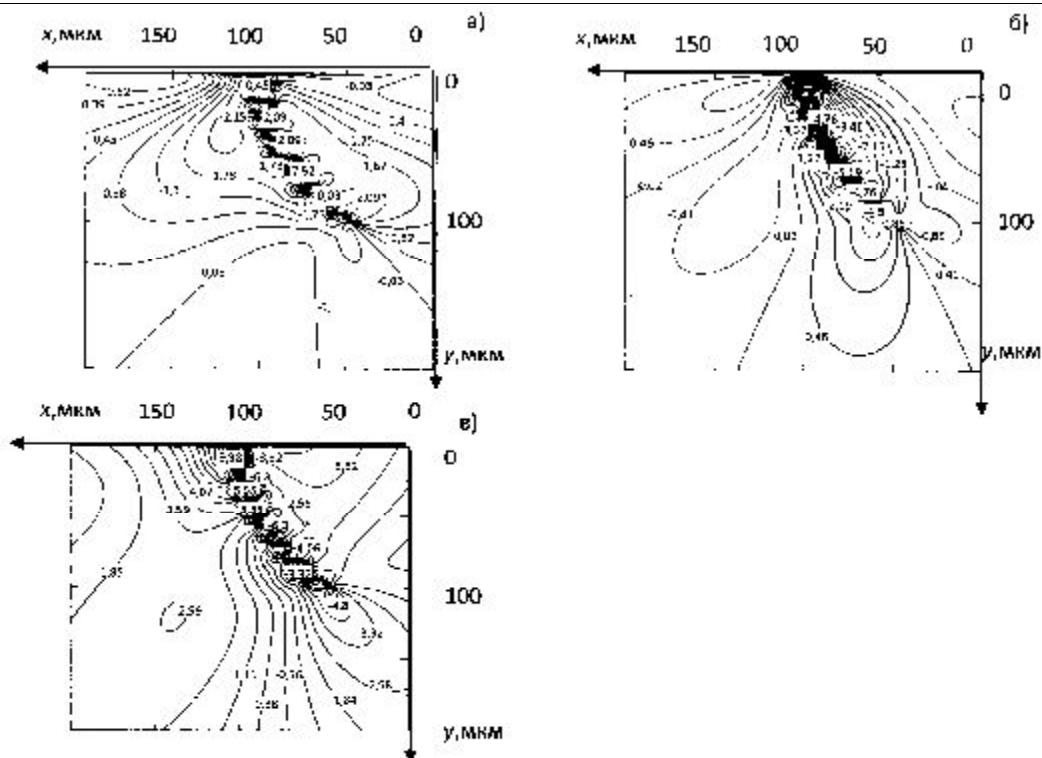


Рис. 6. Распределение напряжений у полосы сдвига, описываемой функцией (6), при линейном законе распределения плотностей квазидислокаций, задаваемой функцией (7): а) σ_{xx} ; б) σ_{xy} ; в) σ_{yy} (МПа)

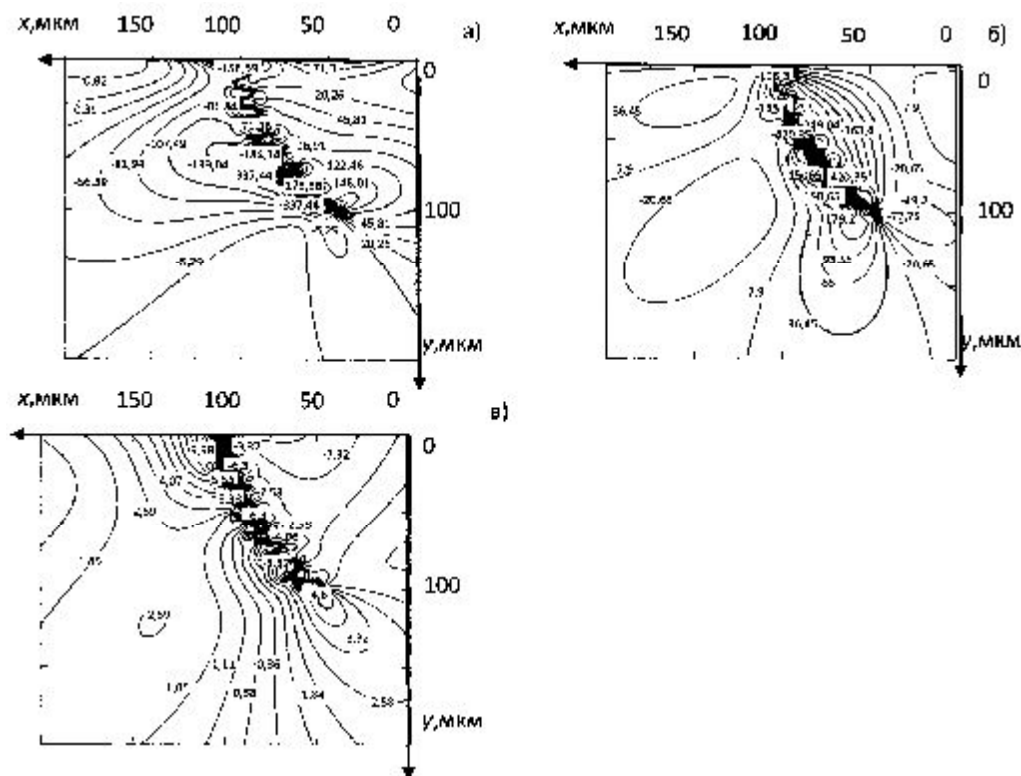


Рис. 7. Распределение напряжений у полосы сдвига, описываемой функцией (6), при нелинейном распределении плотности квазидислокаций, описываемом функцией (8): а) σ_{xx} ; б) σ_{xy} ; в) σ_{yy} (МПа)

Напряжения σ_{yy} в области I отрицательны и имеют максимум на некотором удалении от полосы сдвига в отрицательном направлении по оси OX у поверхности материала (рис. 6, в). Также максимумы напряжений наблюдаются у полосы сдвига у зоны при ее вершине. Они

отрицательны, и поля напряжений, созданные данными двумя эпицентрами напряжений, объединяются и уменьшаются в направлении отрицательном по оси OX и положительном по оси OY. В области II в положительном по оси OY направлении от конца 2 расположен макси-

мум отрицательных напряжений, которые убывают при удалении от этой зоны и меняют свои значения на положительные вокруг вершины полосы сдвига. Напряжения у вершины 1 положительные и убывают при удалении от этой зоны, достигая некоего постоянного значения в положительном направлении от полосы сдвига по оси OX в значительном объеме материала.

В случае, когда форма полосы сдвига описывается функцией (6), 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 (8), где $A_3 = 0,9 \times 10^6 \text{ м}^{-2}$; $B_3 = 6 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$, напряжения σ_{xx} в области I локализованы на некотором расстоянии от полосы сдвига в отрицательном направлении по оси OX у поверхности материала и положительны, а также у конца 1 также у поверхности (рис. 7, а). Еще максимум положительных напряжений наблюдается у конца 2 в отрицательных направлениях по осям OX и OY от него, и уменьшаются в направлении к поверхности и вокруг конца 2. В области II напряжения локализованы у полосы сдвига у отрезка от вершины полосы до ее конца 2 и уменьшаются в положительном направлении по оси OX . Данные напряжения отрицательны.

Напряжения σ_{xy} в области II локализованы у полосы сдвига в зоне у вершины и уменьшаются при удалении от этой зоны (рис. 7, б). Также наблюдается максимум напряжений у конца 2 в отрицательном направлении по оси OX от него. При дальнейшем удалении от этих зон, поля напряжений объединяются в одну зону и уменьшаются в отрицательном направлении по оси OX от полосы сдвига и вокруг конца 2, где напряжения становятся положительными. В области II напряжения положительны и максимальны у конца 2 и у отрезка от конца 2 до вершины полосы сдвига и убывают преимущественно в положительном направлении по оси OX . Также наблюдается удаленная от полосы сдвига зона концентрации положительных напряжений в положительном направлении по оси OX на некотором расстоянии от поверхности материала. Между этими зонами положительных напряжений расположена зона значительных размеров с отрицательными напряжениями. Также зоной локализации отрицательных напряжений является зона у конца 1 полосы сдвига на некотором расстоянии от поверхности материала.

Напряжения σ_{yy} в области I отрицательны и локализуются на некотором удалении в отрицательном направлении по оси OX от конца 1 у поверхности материала и убывают при удалении от этой зоны (рис. 7, в). Также напряжения локализуются у полосы сдвига в зоне у ее вершины. Еще одним центром локализации напряжений является зона у конца 2 в положительном направлении по оси OY от него и отрицательном направлении по оси OX . Напряжения уменьшаются также в данном направлении и обходят вокруг отрезка от конца 2 полосы сдвига до вершины в области II со сменой напряжений на положительные. Также на удалении от полосы сдвига в положительном направлении по оси OX наблюдается локальная область концентрации положительных напряжений. Также напряжения положительные в области II локализованы у полосы сдвига у конца 1 у поверхности материала и убывают при удалении от этой зоны.

Для следующего варианта формы полосы сдвига, которая описывается функцией (7), где $A_2 = -1/200 \text{ мкм}^{-1}$; $B_2 = 100 \text{ мкм}$; $C_2 = 5 \text{ мкм}$; $D_2 = 1/2$, при нелинейном распределении плотности квазидислокаций, описываемом функцией (9), где $A_4 = 1/10 \times 10^6 \text{ м}^{-3}$; $B_4 = 1/5 \times 10^6 \text{ м}^{-2}$; $C_4 = 5 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$, напряжения σ_{xx} локализованы в области I у поверхности на некотором удалении от полосы сдвига в отрицательном направлении по оси OX , и убывают при удалении от поверхности (рис. 8, а). Также напряжения локализуются у конца 2 полосы сдвига и убывают в отрицательном направлении по оси OY к поверхности материала и вокруг самого конца 2, где в положительном направлении от конца 2 при условном переходе в область 2 наблюдается удлиненная область отрицательных напряжений в положительном направлении по оси OY . В области II напряжения максимальны по модулю и отрицательны у полосы сдвига у отрезка от конца 2 полосы до ее вершины, и убывают в положительном направлении по оси OX . При этом поля данных на-

пряжений огибают поле положительных напряжений, расположенное на некотором удалении от полосы сдвига в положительном направлении по осям OX и OY . Также следует отметить концентрацию напряжений непосредственно у конца 1 у поверхности. Данные напряжения убывают при удалении от этой зоны.

Напряжения σ_{xy} в области I отрицательны и максимальны по модулю в зоне у вершины полосы сдвига, а также у конца 2 полосы в отрицательном направлении от него по оси OX (рис. 8, б). Убывают данные напряжения при удалении от этих зон, при этом поля напряжений ближе к поверхности материала огибают полосу сдвига. Стоит отметить, что значения напряжений меняются на отрицательные вокруг конца 2. В области II напряжения максимальны у конца 2 в положительном направлении от него по оси OY , а также у самой полосы сдвига у отрезка от конца 2 до вершины, убывая, преимущественно, в положительном направлении по оси OY . Также положительные напряжения сконцентрированы на некотором расстоянии от поверхности материала, на удалении от полосы сдвига в положительном направлении по оси OX . Между областями концентрации положительных напряжений, на некотором удалении от полосы сдвига, в положительном направлении по оси OX расположена область с отрицательными напряжениями.

Напряжения σ_{yy} в области I знакопеременны (рис. 8, в). У полосы сдвига у отрезка от конца 1 до ее вершины напряжения положительные и уменьшаются в отрицательном направлении по оси OX , при этом на некотором расстоянии от полосы сдвига напряжения становятся отрицательными и имеют максимальные значения по модулю на удалении от полосы сдвига у поверхности материала. Также положительные напряжения сконцентрированы у конца 2 в отрицательных направлениях по осям OX и OY от него и убывают при удалении этой зоны. В области II напряжения также знакопеременны. У конца 2 в положительном направлении по оси OY от него сконцентрированы отрицательные напряжения. У полосы сдвига, у отрезка от конца 2 до вершины полосы, сконцентрированы отрицательные напряжения, которые постоянны в положительном направлении по оси OY от этой зоны и уменьшаются в положительном направлении по оси OX . При этом на некотором расстоянии от полосы сдвига в положительном направлении по оси OX напряжения становятся положительными и достигают максимума в зоне, расположенной на расстоянии от полосы сдвига в положительных направлениях по осям OX и OY . Еще одним центром концентрации положительных напряжений является зона у конца 1 у поверхности. Напряжения уменьшаются при удалении от этой зоны вокруг вершины полосы сдвига.

Для полосы сдвига формы, описываемой функцией (6), где $A_1 = 1/200 \text{ мкм}^{-1}$, $B_1 = 100 \text{ мкм}$; распределение плотности квазидислокаций по гармоническому закону, описываемому функцией (10), где $A_5 = 0,3 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$, напряжения σ_{xx} знакопеременны и сконцентрированы у полосы сдвига (рис. 9, а). Причем ближе к средней линии полосы сдвига напряжения максимальны по модулю и отрицательны. У вершин амплитуд напряжения знакопеременны и значительно меньше по модулю напряжений у средней линии полосы сдвига.

Также, в области I имеются две точки локализации отрицательных напряжений. Одна расположена в положительном направлении по оси OX от вершины полосы сдвига, а другая – в положительном направлении от конца 2 полосы сдвига по оси OY .

Напряжения σ_{xy} знакопеременны и максимальны у полосы сдвига в пиках вершин (рис. 9, б). Причем, наибольшие по модулю напряжения располагаются ближе к поверхности материала. Также на некотором расстоянии от поверхности материала в области I образуется зона положительных напряжений одинаковых значений в положительном направлении от конца 2 полосы сдвига по оси OY . Данные напряжения по модулю незначительны. Также и в области I, и в области II образуются точечные концентрации напряжений, причем в области II – положительные, в области I – отрицательные.

Напряжения σ_{yy} сконцентрированы у полосы сдвига и знакопеременны (рис. 9, в). Вдоль средней линии полосы сдвига напряжения

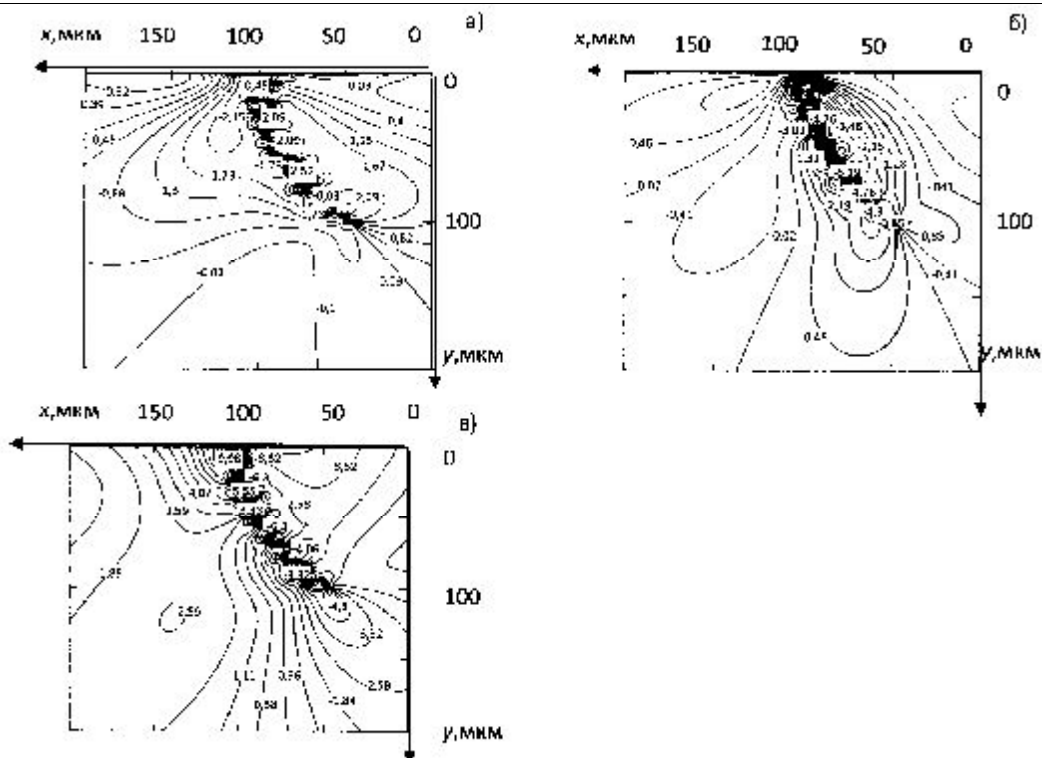


Рис. 8. Распределение напряжений у полосы сдвига описываемой функцией (6), при гармоническом законе распределения плотностей квазидислокаций, описываемом функцией (9): а) σ_{xx} ; б) σ_{xy} ; в) σ_{yy} (МПа)

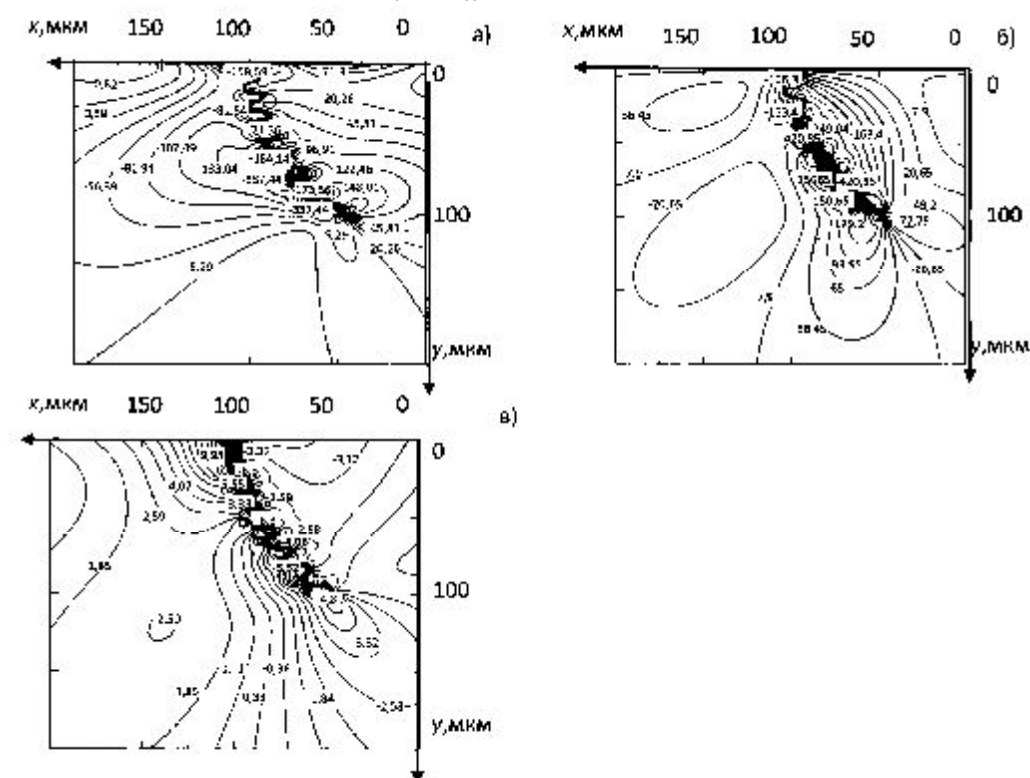


Рис. 9. Распределение напряжений у полосы сдвига, описываемой функцией (6), при законе распределения плотностей квазидислокаций, описываемом функцией (10): а) σ_{xx} ; б) σ_{xy} ; в) σ_{yy} (МПа)

максимальны по модулю и отрицательны. На периферии полосы сдвига напряжения знакопеременны и незначительны. Также в области II локализуются точечные напряжения, причем в положительном направлении по оси Ox от конца 2 полосы сдвига — напряжения отрицательны, а на удалении в положительных направлениях по осям Ox и

Oy от конца 2 — положительны. В области I напряжения точно локализованы и отрицательны.

Заключение. Методика расчета полей напряжений у криволинейной полосы сдвига, находящейся у поверхности аморфного материала

ла, предложенная в данной статье, позволяет составить достаточно полную картину полей напряжений в аморфном материале, вызванной полосою сдвига формой чешуйчатого навала. Полученные распределения полей напряжений позволяют определить наиболее опасные места в аморфном материале для зарождения разрушения.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Верещагин, М.Н. Особенности пластической деформации при индентировании пирамидой Виккерса поверхности аморфного сплава Fe-Cr-Mo-V-B-Si / М.Н. Верещагин, В.Г. Шепелевич, О.М. Остриков, С.Н. Цыбранкова // Физика металлов и металловедение. – 2002 – Т. 93 – № 5. – С. 101–104.
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. Корн, Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн – М.: Наука, 1974. – 832 с.
4. Остриков, О.М. Механика двойникования твердых тел: монография. – Гомель: Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», 2008. – 301 с.
5. Верещагин, М.Н. Моделирование напряженного состояния у полосы сдвига в аморфном материале / М.Н. Верещагин, О.М. Остриков, Д.Б. Зюков // Доклады НАН Беларуси. – 2003. – Т. 47. – № 3. – С. 113–115.
6. Верещагин, М.Н. Дислокационная модель полисинтетических полос сдвига в аморфных материалах / М.Н. Верещагин, О.М. Остриков // Прикладная механика и техническая физика. – 2003. – Т. 44. – № 3. – С. 164–168.
7. Верещагин, М.Н. Дислокационная модель полос сдвига в аморфных материалах / М.Н. Верещагин, О.М. Остриков, С.Н. Цыбранкова // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2004 – № 4. – С. 98–105.
8. Остриков, О.М. Дислокационная гармоническая модель полосы сдвига в аморфном материале // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2007. – № 4. – С. 41–48.
9. Глезер, А.М. Структура и механические свойства аморфных сплавов / А.М. Глезер, Б.В. Молотиллов – М.: Металлургия, 1992. – 208 с.

Материал поступил в редакцию 10.12.15

RYUMISEV A.A., OSTRIKOV O.M. Method of calculation of fields of tension at a curvilinear strip of shift like the scaly naval which is at a surface of metal glass

The method of calculation of fields of tension at the curvilinear strip of shift which is at a surface of amorphous material is offered. This technique allowed to describe nature of distribution of napryzhennost in amorphous material at shift strips a form of scaly naval at various regularities of distribution of quasisdislocations. Probable places of concentration of the greatest tension in which cracks – irreversible defects can arise are defined.