

УДК 669.034

**Б. В. Борц<sup>1</sup>, Н. И. Даниленко<sup>2</sup>, А. А. Пархоменко<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
Харьков, Украина<sup>2</sup>Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, Киев, Украина**ИЕРАРХИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТВЕРДОФАЗНОМ СОЕДИНЕНИИ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

*Впервые установлена последовательность структурных уровней волновых процессов, протекающих на макро-, микро- и нано-уровнях, на границах раздела материалов, соединяемых высокотемпературной прокаткой в твердой фазе.*

*Ключевые слова:* композиционные материалы, сварка прокаткой, волновые процессы, структура.

*Рис. 3. Лит. 4.*

**Б. В. Борц, Н. И. Даниленко, О. О. Пархоменко****ІЄРАРХІЯ ХВИЛЬОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ТВЕРДОФАЗНОМУ З'ЄДНАННІ  
МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ**

*Вперше встановлено послідовність структурних рівней хвильових процесів, що протікають на макро-, мікро- та нано-рівнях, на границях поділу матеріалів, які з'єднуються високотемпературною прокаткою у твердій фазі.*

*Ключові слова:* композиційні матеріали, зварювання прокатуванням, хвильові процеси, структура.

**B. V. Borts, N. I. Danilenko, A. A. Parkhomenko****WAVE HIERARCHY PROCESS IN CONNECTION SOLID METALLIC MATERIALS**

*For the first time, the following sequence of structural levels of wave processes at the macro, micro and nano-levels at the interfaces of materials, joined the high-rolling in the solid phase was established.*

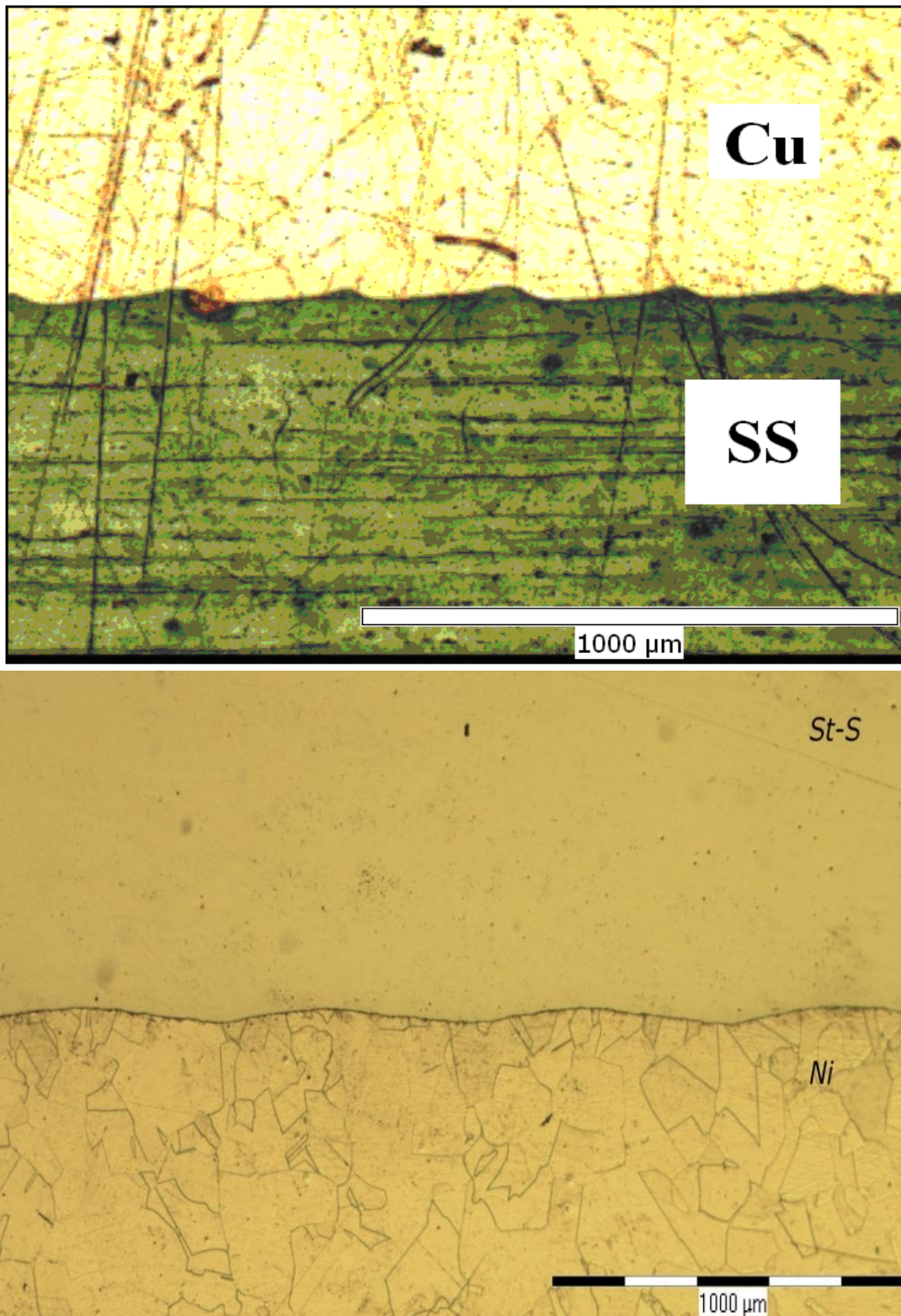
*Keywords:* composite materials, welding, rolling, wave processes, structure.

Несмотря на то, что методом вакуумной прокатки получен целый набор многослойных материалов, сочетающих все положительные свойства различных составляющих пакета, многие вопросы связанные процессами, протекающими на границах раздела композитов остаются не выясненными. Среди них – определение механизмов структурирования и массопереноса, проходящих вблизи границы раздела металлов - составляющих композита, на различных структурных уровнях.

**Материалы и методики.** Соединение в твердой фазе осуществлялось в общем пакете St. steel-Cu-Nb –Ti при температуре 950 °С в вакууме  $p = 10^{-2} \div 10^{-3}$  Па на прокатном стане ДУО – 170 [1]. Деформация прокатки составляла 27-30%. Из сваренного пакета на электроискровом станке отрезалась пластина толщиной 0,15 мм, из которой изготавливались образцы для электронно-микроскопических исследований. Электронная микроскопия высокого разрешения (микроскоп JEM-2100F) была использована для анализа процессов, проходящих на границе раздела биметаллов, соединенных высокотемпературной вакуумной прокаткой. Основным объектом исследований был биметалл Cu-Nb, компоненты которого практически нерастворимы между собой. Выбор материалов обусловлен тем, что эта пара материалов используется в качестве переходных слоев при создании соединений типа сталь-титан, перспективных для использования в ядерной технике.

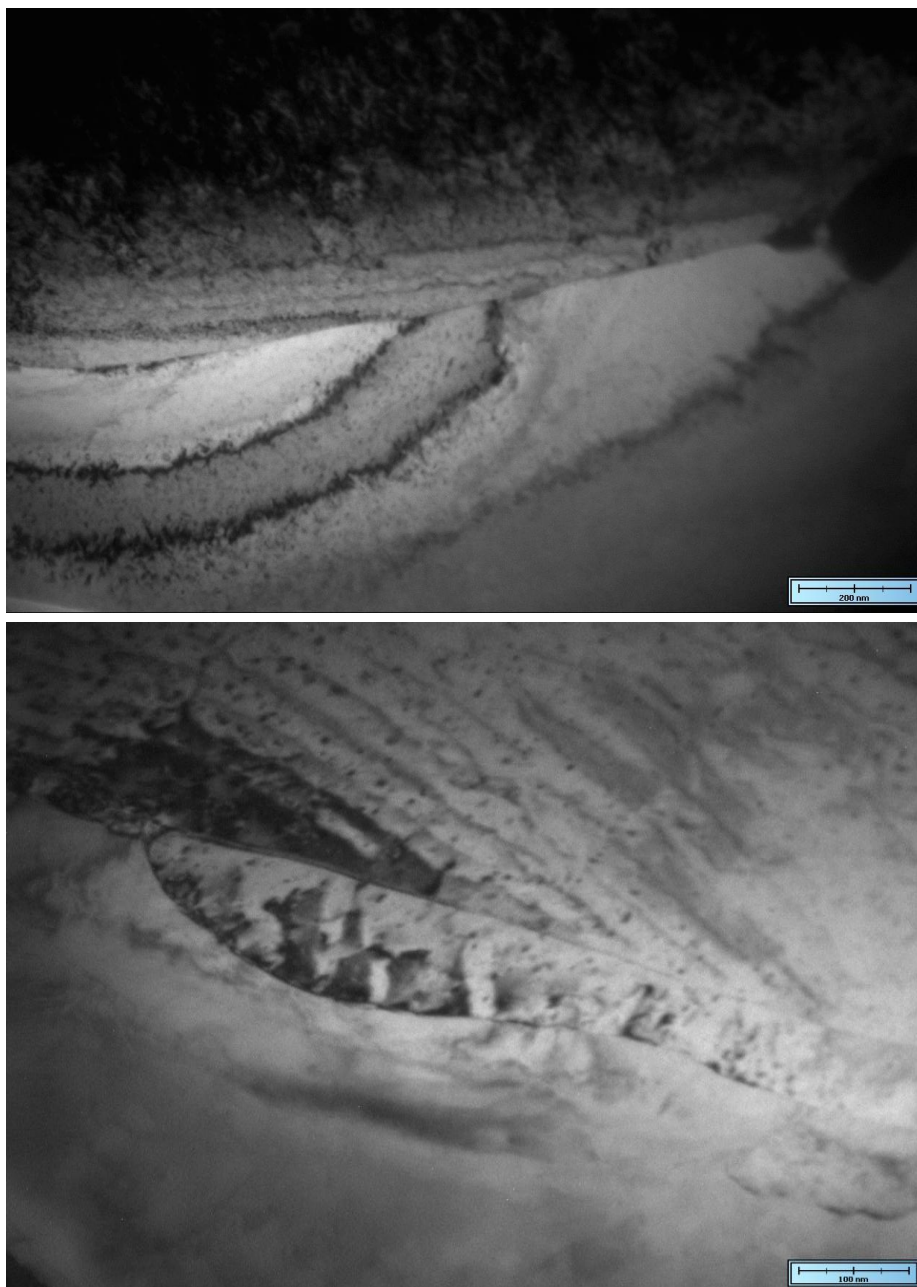
**Результаты и обсуждение.** Рассмотрим последовательность структурных уровней волновых процессов, протекающих на макро-, микро- и нано-уровнях, на границах раздела конструкционных материалов, соединяемых высокотемпературной прокаткой.

**1. Макроструктурный уровень.** На границах раздела различных соединений, созданных высокотемпературной прокаткой обнаружено протекание поверхностных волны типа Кельвина – Гельмгольца с длинами волн-100-800 мкм. Примеры таких процессов показаны на Рис.1. Необходимо отметить, что такие же упорядоченные волновые структуры обнаруживаются в этих же материалах и при совершенно других условиях твердофазного соединения, на пример, при сварке взрывом.



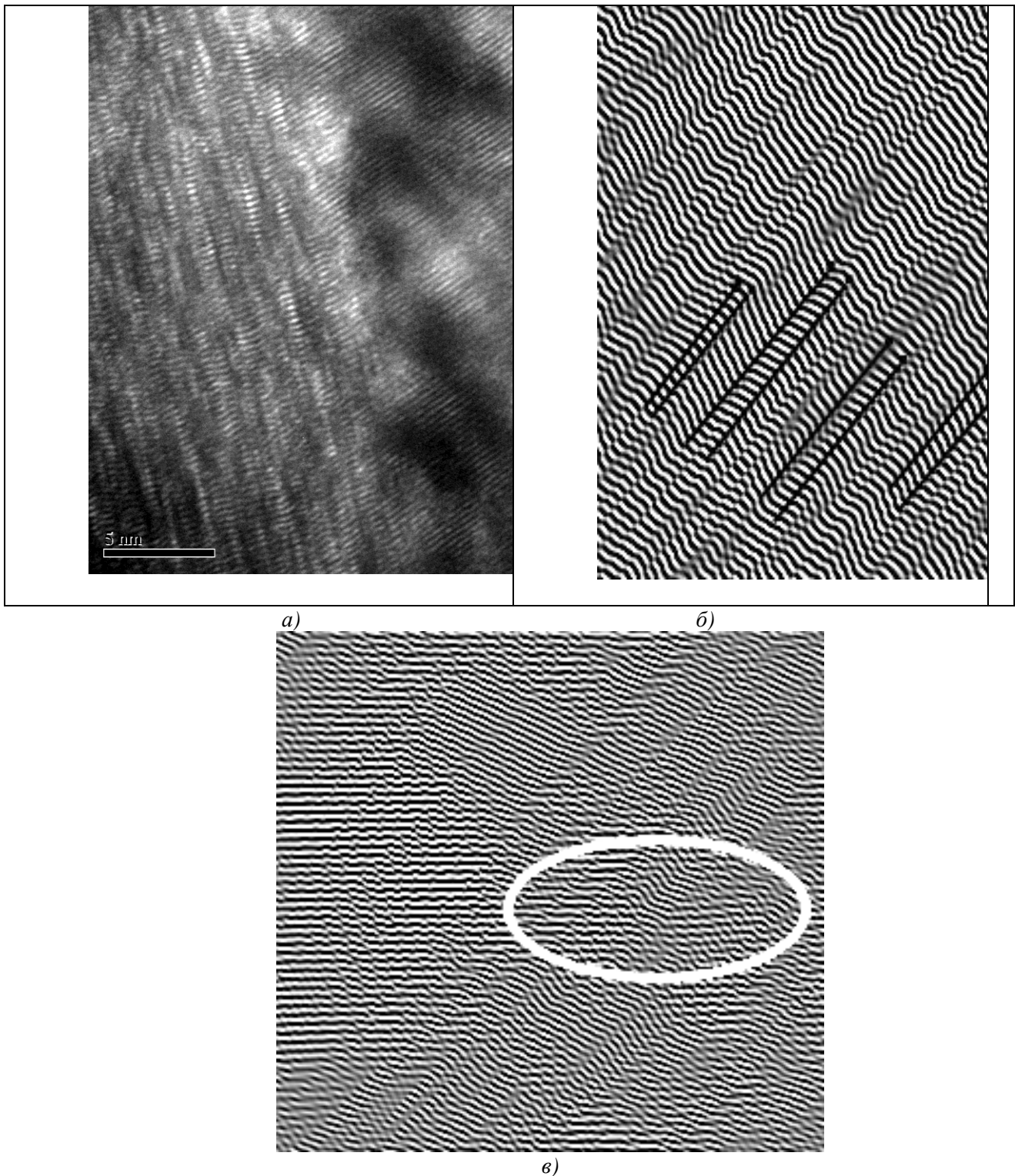
**Рис. 1.** Волновые диссипативные структуры макро-масштабного структурного уровня вблизи области интерфейса биметаллов медь-сталь 08X18H10T (верхний снимок), и никель-сталь 08X18H10T (нижний снимок)

**2. Микро-масштабный, дислокационный структурный уровень.** Рассмотрим теперь примеры процессов, проходящих в соединяемых в твердой фазе материалах на другом-микро-масштабном, дислокационном структурном уровне на примере соединений медь-ниобий и медь – нержавеющая сталь. Рождение дислокаций на границе поверхности соединения двух металлов обеспечивает захват, и массоперенос разнородных перемешанных приповерхностных атомов металла с границы раздела по дислокациям вглубь материала.



**Рис. 2.** Упорядоченная микро-масштабная дислокационная структура на границах раздела Nb-Cu (верхний снимок), и медь - нержавеющая сталь (нижний снимок), (масштаб-200 нм)

**3. Нано- структурный уровень.** Ранее [1], с помощью электронной микроскопии высокого разрешения, были начаты структурные исследования границы раздела твердофазного соединения ниобий-медь. На нано-уровне обнаружен эффект образования в приграничных областях деформационной структуры названной авторами квазипериодическим «волновым фронтом» деформации кристаллической решетки, указывающий на гидродинамическое течение материала в переходной зоне. В этой работе было также показано, что в прокатываемых композитах (нержавеющая сталь – медь, Nb-Cu) на границе раздела медь-ниобий проходят процессы динамической нано-рекристаллизации, заканчивающиеся созданием зерен размером несколько нм, имеющих сильно разориентированные границы, что может являться следствием протекания процессов ротационной пластичности. На Рис.3 показана граница раздела биметаллического композита Nb-Cu, созданного деформацией прокатки на 27-30%, при температуре 950<sup>0</sup>С. Установлено, что эта область состоит из набора квазипериодических нанополос (иногда шириной меньше нм), образованных системой сдвигов высокой плотности (вплоть до 10<sup>6</sup> ....10<sup>7</sup> см<sup>-1</sup>). Их границы -гребни фронта- созданы коллективными сдвигами, как полных, так и частичных дислокаций.



**Рис. 3. Структура границы раздела медь-ниобий: *a* – «тонкая» структура переходной области между составляющими композита, которая имеет волновую природу; *б* – дефекты в нано-полосах сдвига области «волнового фронта», которые можно интерпретировать, как «диполи частичных нано-дисклинаций» (отмечены линиями). Получено с применением метода IFFT (метод очистки изображения с помощью Фурье преобразований); *в* – специфические представители ротационных мод деформации-«нано-дисклинации кручения» в виде двойных спиралей(отмечены овалом), (масштаб – см. на рис. 3.а)**

Большинство этих полос представляют собой дефекты, которые можно назвать *нано-полосы переориентации*, т.к. они являются представителями ротационной пластичности на самом низком уровне деформации.

Применение метода Фурье-очистки позволило обнаружить новый тип дисклинаций, которые можно назвать «нано-дисклинациями кручения» (Рис. 3в). Действительно, в ставшей классической монографии [2], прямолинейные дисклинации с вектором Франка параллельным линии дефекта, называют клиновыми, а дисклинации с вектором Франка, перпендикулярным линии – дисклинациями кручения. Однако, все эти дефекты являлись дефектами мезоструктурного уровня. Так, Панин с соавторами наблюдали подобные мезо дефекты в виде «жгутов» (двойных спиралей) на интерфейсе покрытий с металлической подложкой [3]. Большинство показанных на данном рисунке нанодисклинаций кручения имеют мощность «вектора Франка» от  $\pi$  до  $2\pi$ . Как показали недавние исследования [4], в специфических условиях деформирования кручением на наковальнях Бриджмена в сплавах молибдена и ванадия, при высоких значениях истинных логарифмических деформаций ( $\epsilon=5$ ), возможно формирование нанодиполей частичных дисклинаций с размерами несколько нанометров. В данном исследовании мы видим формирование таких специфических дефектов при высокотемпературной прокатке биметаллов при величинах истинных деформаций не превышающих 30 %, т.е. на несколько порядков ниже. Отметим, что движение таких дефектов происходит в направлении перпендикулярном направлению распространения сдвиговых нанополос. Можно полагать, что именно благодаря этому механизму, который ограничивает величину сдвига в полосе, не происходит достижение в ней критического значения сдвига, приводящего к образованию зародышей трещин. Из рис. 3в видно, что там где образовались двойные спирали сдвиг дальше не распространяется.

Известно [3] что, одним из условий устранения растрескивания и проведения качественного проката разнородных биметаллических композитных материалов, является создание условий понижения сдвиговой устойчивости приграничных зон. В свою очередь, как показано в этой работе, на самом низком из возможных- нано-структурном уровне, это условие обеспечивается возникновением высокой плотности полос, ограниченных нано-дисклинациями, как носителями сдвигово-ротационной неустойчивости.

#### **Выводы**

Впервые установлена последовательность структурных уровней волновых процессов, протекающих на макро-, микро- и нано-уровнях, на границах раздела материалов, соединяемых высокотемпературной прокаткой:

- показано, что на макро-уровне возникают поверхностные волны типа Кельвина-Гельмгольца,
- на микро-уровне установлен факт взаимного периодического массопереноса атомов контактирующих материалов с помощью дислокаций от границы раздела;
- на нано-уровне обнаружен эффект образования квазипериодического волнового фронта деформации кристаллической решетки, связанного с образованием набора квазипериодических нано-полос, образованных системой сдвигов высокой плотности, появлением ротационных мод деформации – частичных нано-дисклинаций и нано-дисклинаций кручения.

1. Борц Б. В., Даниленко Н. И., Неклюдов И. М., Пархоменко А. А., Фирстов С. А. Наноструктурирование и массоперенос вблизи границ раздела металлов, свариваемых методом горячей прокатки в вакууме. Металлофизика и новейшие технологии. – Т. 33, №8, 2011. – С. 1035–1046.
2. Владимиров В. И., Романов А. Е. Дисклинации в кристаллах. – Л-д., 1986. – 207 с.
3. Панин В. Е., Гриняев Ю. В., Данилов В. И. и др. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. – М.: Наука. 1990, – 255 с.
4. Тюменцев А. Н., Дитенберг И. А. Физическая мезомеханика. – Том 14, №3, 2011. – С. 55–68.

Стаття надійшла до редакції 25.04.2015.