

PACS numbers: 34.35.+a, 46.50.+a, 61.72.Lk, 62.20.mt, 79.77.+g, 81.70.-q, 83.60.Uv

Роль кулонівського вибуху в зародженні деформаційних тріщин (дискусійні повідомлення)

М. О. Васильєв, Б. М. Мордюк

*Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,
бульв. Академіка Вернадського, 36,
03142 Київ, Україна*

У роботі запропоновано гіпотезу дислокаційно-електронного механізму вибухоподібного характеру зародження деформаційних тріщин у металах. В основі цієї гіпотези лежить кулонівське відштовхування позитивно заряджених йонів з порушенням нейтрального стану йонно-електронної системи в кристалічній ґратниці, що приводить до нанолокального кулонівського вибуху та виникнення зародкових тріщин.

Ключові слова: кристалічна ґратниця, тріщини, дислокації, електрони, кулонівський вибух.

The paper proposes the hypothesis of the explosive-nature dislocation-electronic mechanism of the deformation cracks in the metals' nucleation. This hypothesis is based on the Coulomb repulsion of the positively-charged ions. when the neutral state of the ion–electron system in the crystal lattice is disturbed that leads to the nanolocal Coulomb explosion and the appearance of the nucleated cracks.

Key words: crystal lattice, cracks, dislocations, electrons, Coulomb explosion.

(Отримано 22 листопада 2023 р.; остаточн. варіант — 11 грудня 2023 р.)

Corresponding author: Mykhaylo Oleksiyovych Vasylyev
E-mail: vasil1934@ukr.net

*G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,
36 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

Citation: M. O. Vasylyev and B. M. Mordyuk, The Role of Coulomb Explosion in the Initiation of Deformation Cracks (Discussion Report), *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 46, No. 1: 71–80 (2024) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.46.01.0071](https://doi.org/10.15407/mfint.46.01.0071)

1. ВСТУП

Фізичною основою виникнення «кулонівського вибуху» є Кулонів закон, встановлений Шарлем Огюстеном Кулоном (Charles-Augustin de Coulomb) у 1785 році [1]. Цей закон характеризує силу взаємодії між двома точковими електричними зарядами у вакуумі. Відповідно до Кулонового закону, сила F_{12} дається виразом:

$$F_{12} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r_{12}^2},$$

де q_1 та q_2 — заряди двох частинок, r_{12} — віддаль між ними, а ϵ_0 — електрична стала. Таким чином, сила взаємодії двох точкових зарядів у вакуумі пропорційна їхнім величинам і обернено пропорційна квадрату віддалі між ними. Для різних знаків зарядів вона характеризує силу притягання (або силу відштовхування за однакових знаків зарядів).

Як відомо, метал зберігає свою об'ємну форму завдяки динамічній рівновазі електростатичних сил взаємодії йонів кристалічних ґратниць із навколишніми валентними електронами. Таким чином, дану зарядову рівновагу зумовлено нейтральним станом йонно-електронної системи. Якщо за допомогою будь-яких зовнішніх енергетичних впливів порушити цю рівновагу, можна очікувати прояви «кулонівського вибуху» як наслідок відштовхування позитивно заряджених йонів у разі порушення нейтрального стану йонно-електронної системи в кристалічній ґратниці твердого тіла.

Спочатку існувала думка, що процес кулонівського вибуху має гальмуватися у металах, оскільки ефект екранування (нейтралізації) у них переважає за наявності великої кількості вільних електронів (електронів провідності) з високою рухливістю. Однак результати недавніх теоретичних розрахунків та експериментів показали, що електричні поля, що генеруються, наприклад, збудженням фемтосекундним лазерним імпульсом під час певних режимів, забезпечують виникнення в поверхневому шарі ефекту кулонівського вибуху, що приводить до розриву хемічних зв'язків. Можливість реалізації такого кулонівського вибуху в металах було передбачено у роботах [2–4].

Як показали теоретичні й експериментальні роботи, кулонівський вибух у металевих матеріалах можливий в умовах, за яких енергія осциляцій валентних електронів набагато перевищує енергію Фермі та роботу виходу. Така можливість і реалізується під час опромінення металу потужним фемтосекундним імпульсом ультрафіолетового лазерного випромінювання, зокрема, за наступних режимів опромінювання для досліджених металів: Al (800 нм, 90 фс, 17,7 мДж см⁻²); Cu (800 нм, 100 фс, 100–400 мДж см⁻²); Au (800 нм, 25 фс, 400 мДж см⁻²); Ag (800 нм, 75 фс, 300 мДж см⁻²). За вказаних

режимів поле лазерного випромінення проникає у метал без послаблення, приводячи електрони в осциляційний рух з енергією, набагато більшою за роботу виходу, що дає змогу їм легко залишати метал без його істотного розігріву, полишаючи позитивно заряджені атоми кристалічної ґратниці [5–13].

Іншим прикладом реалізації кулонівського вибуху в металах може бути дослідження природи виникнення такого явища за взаємодії лужних металів з водою [14–24]. За взаємодії лужного металу з водою кулонівський вибух викликається масовим зарядом поверхні рідкого металу з швидкою міграцією електронів у воду, що передує і фактично сприяє перебігу відомої вибухонебезпечної реакції рідкого лужного металу (Na, K) з водою за кімнатної температури. Ці електрони проникають у воду та сприяють перебігу реакції з утворенням молекулярного Гідрогену та гідроксиду в процесі реакції, яку раніше було змодельовано у роботах [25, 26]. Найбільш важливим для цього явища є те, що таким чином поверхня кластера лужного металу набуває великого позитивного заряду практично відразу після контакту з поверхнею води товщиною близько 0,5 нм.

Ще один із прикладів реалізації кулонівського вибуху в напівпровідникових і металевих матеріалах наведено у теоретичних та експериментальних роботах, пов'язаних з розпорошенням мішеней інтенсивними плазмовийонними потоками. Авторами [27–29] передбачається, що ефект аномального розпорошення інтенсивними плазмовийонними потоками поверхні мішені пов'язаний з емісією електронів і лавиноподібним зменшенням поверхневої енергії зв'язку йонізованих атомів (когезії). Останнє приводить до кулонівського мікробибуху з утворенням кратерів розпорошення мішені у вигляді кластерів.

2. ДИСЛОКАЦІЙНІ МЕХАНІЗМИ ЗАРОДЖЕННЯ ТА ЗРОСТАННЯ ТРІЩИН

Відомо, що руйнування твердих тіл є складним багатостадійним і різномасштабним кінетичним процесом. Однією з фундаментальних проблем фізики міцності є встановлення механізмів утворення та розвитку мікротріщин у твердих тілах. Непередбачене руйнування конструкцій викликається, як правило, поступовим або швидким поширенням у них тріщин. Небезпечними стають тріщини меншого розміру, здатні переходити в критичну стадію відразу ж після утворення або швидкого зростання під навантаженням. За певних механічних навантажень в окремих областях металевого зразка напруження перевищують межу міцності металу, що призводить до його руйнування. Цей процес складається з низки послідовних стадій, що включають зародження субмікроскопічних зародкових тріщин (ЗТ), подальше зростання їх і, нарешті, макроскопі-

чний поділ зразка на окремі частини [30–42].

Встановлення фізичних механізмів зародження та деформації у вершинах ЗТ є найважливішим завданням сучасної металофізики, враховуючи, що деформаційно-напружений стан у вершинах тріщин складніший, аніж у областях з однорідною деформацією. Зокрема, вважається, що причиною утворення ЗТ є неоднорідність перебігу мікропластичної деформації у твердих тілах, яка зумовлює виникнення на локальних ділянках кристалічних ґратниць потужних полів мікронапружень, достатніх для утворення ЗТ.

У переважній більшості випадків перебіг пластичної деформації пов'язаний з рухом і розмноженням дислокацій [43]. В результаті руху та взаємодії дислокацій за різноманітних зовнішніх впливів на кристал утворюються складні дислокаційні ансамблі. Їхній вплив на механічні властивості кристалу буде істотно різним, залежно від Бюргерсових векторів, густини та розподілу дислокацій в ансамблях.

Дислокаційна природа зародження ЗТ розглядається в даний час найбільш ймовірно. Запропоновано кілька дислокаційних схем утворення субмікротріщин. Відповідно до найпростішого моделю Стро–Мотта, сильна концентрація напружень, достатня для зародження тріщини, виникає, коли перед різними перешкодами утворюються пласкі скупчення ковзних дислокацій. За іншим механізмом, запропонованим Коттреллом, дислокації рухаються в двох смужках ковзання, що перетинаються. За Гілмановим моделем дислокації можуть накопичуватися біля межі зерна та водночас відбувається вигин смуги ковзання й тріщина розкривається в площині ковзання. Орованів модель заснований на перетині вертикальних дислокаційних стін смугами ковзання і сильної дезорієнтації субзерен та обриву субмеж. У всіх випадках для формування ЗТ необхідний розрив міжатомових зв'язків, величина яких значно менша за теоретичну міцність на розрив. Наявні феноменологічні теоретичні моделі не дають уявлення про природу розриву міжатомових зв'язків із утворенням нових поверхонь на атомарно-молекулярному й електронному рівнях.

3. ЕЛЕКТРОН-ДИСЛОКАЦІЙНІ ВЗАЄМОДІЇ

Як показали численні теоретичні й експериментальні дослідження, дислокації впливають не тільки на механічні характеристики кристалічних матеріалів, таких як міцність і пластичність, але й на різні фундаментальні фізичні властивості [44–50]. Виникнення обірваних атомових зв'язків у ядрі дислокації може вести до захоплення електронів і пов'язаного з цим впливом дислокації на електричний опір, люмінесцентні та магнетні властивості матеріалу. Відомо, що дислокації, які знаходяться в напівпровідниковому криста-

лі, є електрично активними та здатні істотно впливати на електрофізичні параметри кристалу [51, 52]. Крім цього, у літературі аналізуються дислокаційні схеми зародження мікротріщин з урахуванням тієї обставини, що дислокації у напівпровідниках є зарядженими. Від густини дислокаційних зарядів відповідно змінюється й умова зародження тріщини [53–57]. Водночас зазначається, що кулонівська електростатична взаємодія порівнянна з пружністю і може істотно впливати на рівноважні положення заряджених дислокацій у скупченні, що приводить до істотної зміни умови зародження в них мікротріщин. Згідно з [51], у напівпровідниковому кристалі ядро дислокації може або накопичувати у собі заряди, або, навпаки, віддавати їх, тобто має місце надлишок і дефіцит (щодо його середнього значення в кристалі) густини електронів.

У металах поля деформацій дислокацій характеризуються протяжними областями згущення та розрідження заряду йонного кістяка кристалу. Такі неоднорідності екрануються електронами провідності, що приводить до появи навколо лінійних дефектів неоднорідного розподілу електронної густини й електростатичного потенціалу. Внаслідок цього істотно змінюється характер руху та структури енергетичного спектру як окремого електрона, так і колективних плазмових мод. Встановлені зміни, зумовлені впливом дислокацій на електронну структуру металу, приводять до певних змін фізичних властивостей. До останніх можна віднести, зокрема, роботу виходу та контактні явища, намагнетованість, електроопір, оптичні явища, пов'язані з плазмовими властивостями електронів провідності [58–64]. Ефекти впливу слабких магнетних полів на механічні характеристики металів також пояснюються посиленням динамічного гальмування дислокацій електронами провідності [65–69].

В рамках гіпотези, запропонованої авторами даної роботи, важливо відзначити припущення авторів [70] про те, що утворення ЗТ у вершині дислокаційного скупчення має «вибухоподібний характер».

4. ВИСНОВКИ

Наведена вище аналіза літературних даних про механізми прояву ефектів кулонівського вибуху у різних металевих матеріалах дає авторам даної роботи можливість запропонувати гіпотезу, яка пояснює «вибухоподібний характер» виникнення ЗТ. В основі цієї гіпотези лежать наступні фізичні постулати.

1. Механізм пластичної деформації зумовлений рухом і розмноженням дислокацій.

2. Зародження ЗТ відбувається у місцях деформаційних дислокацій та їхніх скупчень.

3. Дислокації є електрично активними та здатні істотно впливати на електрофізичні властивості металевого кристалу.

4. Навколо лінійних дефектів є неоднорідний розподіл електронної густини й електростатичного потенціалу.

5. Шляхом тунельного механізму частина електронів провідності має можливість переходу в структуру дислокацій, що приводить до виникнення позитивно заряджених йонів атомів кристалічних ґратниць у нанорозмірній ділянці.

6. Кулонівське відштовхування позитивно заряджених йонів через порушення нейтрального стану йонно-електронної системи в кристалічній ґратниці твердого тіла приводить до нанолокального кулонівського вибуху та виникнення ЗТ.

7. Отже, механізм виникнення ЗТ має електростатичну природу.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. C. A. Coulomb, *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France*, **88**: 569 (1785).
2. А. А. Рухадзе, К. З. Рухадзе, В. П. Тараканов, *Краткие сообщения по физике ФИАН*, **7**: 12 (2007).
3. А. А. Рухадзе, У. Юсупалиев, *ЖТФ*, **74**: 127 (2004).
4. А. А. Рухадзе, У. Юсупалиев, *Краткие сообщения по физике ФИАН*, **7**: 36 (2003).
5. M. Rusek, I. Logatec, and T. Blensky, *Phys. Rev. A*, **63**: 013203 (2000).
6. H. Dachraoui and W. Husinsky, *Appl. Phys. Lett.*, **89**: 104102 (2006).
7. Sh. Bashir, M. Sh. Rafique, and W. Husinsky, *Defects in Solids: Incorporating Plasma Science and Plasma Technology*, **168**: 902 (2013).
8. M. Hashida, Sh. Namba, K. Okamuro, Sh. Tokita, and Sh. Sakabe, *Phys. Rev. B*, **81**: 115442 (2010).
9. S. Li, S. Li, F. Zhang, D. Tian, H. Li, D. Liu, Y. Jiang, A. Chen, and M. Jin, *Appl. Surf. Sci.*, **355**: 681 (2015).
10. S. Tao and B. Wu, *Appl. Surf. Sci.*, **298**: 90 (2014).
11. A. A. Rukhadze, K. Z. Rukhadze, and V. P. Tarakanov, *Tech. Phys.*, **53**: 264 (2008).
12. N. M. Bulgakova, R. Stoian, A. Rosenfeld, I. V. Hertel, and E. E. B. Campbell, *Phys. Rev. B*, **69**: 054102 (2004).
13. H. Dachraoui and W. Husinskya, *Appl. Phys. Lett.*, **89**: 104102 (2006).
14. Z. Lin, L. V. Zhigilei, and V. Celli, *Phys. Rev. B*, **77**: 075133 (2008).
15. S. C. Li, S. Y. Li, F. J. Zhang, D. Tian, H. Li, D. L. Liu, Y. F. Jiang, A. M. Chen, and M. X. Jin, *Appl. Surf. Sci.*, **355**: 681 (2015).
16. M. Djouder, O. Lamrous, M. D. Mitiche, T. E. Itina, and M. Zemirli, *Appl. Surf. Sci.*, **280**: 711 (2013).
17. E. B. Yakovlev, O. N. Sergaeva, and V. V. Svirina, *J. Opt. Technol.*, **78**: 487 (2011).
18. E. Axente, S. Noel, J. Hermann, M. Sentis, and I. N. Mihailescu, *Appl. Surf. Sci.*, **255**: 9734 (2009).
19. M. Hashida, A. F. Semerok, O. Gobert, G. Petite, Y. Izawa, and J. F. Wagner, *Appl. Surf. Sci.*, **197**: 862 (2002).

20. T. Yatsushashi and N. Nakashima, *J. Photochem. Photobiol. C*, **34**: 52 (2018).
21. S. Bashir, M. S. Rafique, and W. Husinsky, *Appl. Surf. Sci.*, **255**: 8372 (2009).
22. A. Grubelnik, V. R. Meyer, P. Bützer, and U. W. Schönenberger, *J. Chem. Educ.*, **85**: 634 (2008).
23. B. B. Alchagirov, L. Kh. Afaunova, F. F. Dyshekova, Z. A. Kegadueva, A. G. Mozgovoi, R. Kh. Arkhestov, T. M. Taova, and Kh. B. Khokonov, *Inorg. Mater. Appl. Res.*, **2**: 461 (2011).
24. P. E. Mason, F. Uhlig, V. Vaněk, T. Buttersack, S. Bauerecker, and P. Jungwirth, *Nat. Chem.*, **7**: 250 (2015).
25. C. J. Mundy, J. Hutter, and M. Parrinello, *J. Am. Chem. Soc.*, **122**: 4837 (2000).
26. F. Mercuri, C. J. Mundy, and M. Parrinello, *J. Phys. Chem. A*, **105**: 8423 (2001).
27. A. M. Gabovich, V. F. Semeniuk, and N. I. Semeniuk, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **52**: 185201 (2019).
28. Hai-Ping Cheng and J. D. Gillaspay, *Comp. Mater. Sci.*, **9**: 285 (1998).
29. Hai-Ping Cheng and J. Gillaspay, *Phys. Rev. B*, **55**: 2628 (1997).
30. S. M. Ohr, *Mater. Sci. Eng.*, **72**: 72 (1985).
31. В. А. Федоров, Ю. И. Тялин, В. А. Тялина, *Дислокационные механизмы разрушения двойникующихся материалов* (Москва: Машиностроение: 2004).
32. В. Н. Гриценко, Ю. Я. Мешков, Ю. А. Полушкин, А. В. Шиян, *Металлофиз. новейшие технол.*, **37**, № 7: 961 (2015).
33. В. И. Владимиров, *Физическая природа разрушения металлов* (Москва: Металлургия: 1984).
34. С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, *Проблемы прочности*, **2**: 55 (2009).
35. С. А. Котречко, *Проблемы прочности*, **4**: 14 (2003).
36. П. Парис, Дж. Си, *Прикладные вопросы вязкости разрушения* (Москва: Мир: 1968), с. 64 (пер. з англ.).
37. А. Я. Красовский, В. Н. Красико, *Трещиностойкость сталей магистральных трубопроводов* (Киев: Наукова думка: 1990).
38. Г. П. Черепанов, *Механика хрупкого разрушения* (Москва: Наука: 1974).
39. Дж. Хирт, И. Лоте, *Теория дислокаций* (Москва: Атомиздат: 1972) (пер. з англ.).
40. Ю. Я. Мешков, К. Ф. Сорока, *Металлофиз. новітні технол.*, **43**, № 6: 781 (2021).
41. Ю. Я. Мешков, Г. П. Зіміна, *Металлофиз. новітні технол.*, **44**, № 6: 807 (2022).
42. Yu. Ya. Meshkov, G. P. Zimina, and N. M. Stetsenko, *Prog. Phys. Met.*, **23**: 744 (2022).
43. Ж. Фридель, *Дислокации* (Москва: Мир: 1967) (пер. з англ.).
44. W. P. Mason, *Appl. Phys. Lett.*, **6**: 111 (1965).
45. A. D. Brailsford, *Phys. Rev.*, **186**: 959 (1969).
46. Н. Ашкрофт, Н. Мермин, *Физика твердого тела. Т. 2* (Москва: Мир: 1979) (пер. з англ.).
47. Т. Судзуки, Х. Ёсинага, С. Такеути, *Динамика дислокаций и пластичность* (Москва: Мир: 1989) (пер. з яп.).
48. В. М. Жолкевский, Г. А. Денисенко, *Физика твердого тела*, **43**: 1828 (2001).
49. Ю. И. Головин, *Физика твердого тела*, **46**: 769 (2004).
50. М. А. Васильев, *Успехи физ. мет.*, **8**: 65 (2007).
51. Т. Судзуки, Х. Ёсинага, С. Такеути, *Динамика дислокаций и пластичность* (Москва: Мир: 1989) (пер. з яп.).
52. В. Петренко, Э. Штейнман, В. Тимофеев, Ю. Осипьян, С. Бредихин,

- В. Кведер, Н. Классен, В. Негрий, И. Смирнова, С. Шмурак, *Электронные свойства дислокаций в полупроводниках* (Москва: Эдиториал УРСС: 2000).
53. T. Figielski, *Phys. Stat. Sol.*, **10**:75 (1965).
 54. В. Г. Еременко, Б. Я. Фарбер, Е. Б. Якимов, *Физика и техника полупроводников*, **17**: 1313 (1983).
 55. Ю. И. Тялин, В. М. Финкель, *Докл. АН СССР*, **279**: 1984 (1126).
 56. Р. М. Пелещак, Б. А. Лукиянец, *Письма в ЖТФ*, **24**: 37 (1998).
 57. Ю. И. Тялин, В. А. Тялина, *Вестник ТГУ*, **14**: 1105 (2009).
 58. Дж. Займан, *Электронны и фононы* (Москва: Изд-во иностр. лит.: 1962) (пер. з англ.).
 59. В. Д. Нацик, Л. Г. Потемкина, *ЖЭТФ*, **79**: 2398 (1980).
 60. В. Д. Нацик, С. Н. Смирнов, Н. Э. Тихоненков, *Физика низких температур*, **19**: 931 (1993).
 61. В. Д. Нацик, С. Н. Смирнов, *Физика низких температур*, **21**: 663 (1995).
 62. I. N. Guven, *Solid State Commun.*, **52**: 315 (1984).
 63. W. P. Mason, *Appl. Phys. Lett.*, **6**: 111 (1965).
 64. A. D. Brailsford, *Phys. Rev.*, **186**: 959 (1969).
 65. J. M. Galligan, T. H. Lin, and C. S. Pang, *Phys. Rev. Lett.*, **38**: 405 (1977).
 66. J. M. Galligan and C. S. Pang, *J. Appl. Phys.*, **50**: 6253 (1979).
 67. В. П. Лебедев, В. С. Крыловский, *Физика твердого тела*, **27**: 1285 (1985).
 68. М. И. Молоцкий, *Физика твердого тела*, **33**: 3112 (1991).
 69. В. П. Лебедев, В. С. Крыловский, *Вопросы атомной науки и техники*, **4**: 15 (2006).
 70. С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, *Успехи физ. мет.*, **10**: 207 (2009).

REFERENCES

1. C. A. Coulomb, *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France*, **88**: 569 (1785).
2. A. A. Rukhadze, K. Z. Rukhadze, and V. P. Tarakanov, *Kratkie Soobshcheniya po Fizike FIAN*, **7**: 12 (2007) (in Russian).
3. A. A. Ruhadze and U. Yusupaliev, *ZhTF*, **74**: 127 (2004) (in Russian).
4. A. A. Ruhadze and U. Yusupaliev, *Kratkie Soobshcheniya po Fizike FIAN*, **7**: 36 (2003) (in Russian).
5. M. Rusek, I. Logates, and T. Vlensky, *Phys. Rev. A*, **63**: 013203 (2000).
6. H. Dachraoui and W. Husinsky, *Appl. Phys. Lett.*, **89**: 104102 (2006).
7. Sh. Bashir, M. Sh. Rafique, and W. Husinsky, *Defects in Solids: Incorporating Plasma Science and Plasma Technology*, **168**: 902 (2013).
8. M. Hashida, Sh. Namba, K. Okamuro, Sh. Tokita, and Sh. Sakabe, *Phys. Rev. B*, **81**: 115442 (2010).
9. S. Li, S. Li, F. Zhang, D. Tian, H. Li, D. Liu, Y. Jiang, A. Chen, and M. Jin, *Appl. Surf. Sci.*, **355**: 681 (2015).
10. S. Tao and B. Wu, *Appl. Surf. Sci.*, **298**: 90 (2014).
11. A. A. Rukhadze, K. Z. Rukhadze, and V. P. Tarakanov, *Tech. Phys.*, **53**: 264 (2008).
12. N. M. Bulgakova, R. Stoian, A. Rosenfeld, I. V. Hertel, and E. E. B. Campbell, *Phys. Rev. B*, **69**: 054102 (2004).
13. H. Dachraoui and W. Husinskya, *Appl. Phys. Lett.*, **89**: 104102 (2006).

14. Z. Lin, L. V. Zhigilei, and V. Celli, *Phys. Rev. B*, **77**: 075133 (2008).
15. S. C. Li, S. Y. Li, F. J. Zhang, D. Tian, H. Li, D. L. Liu, Y. F. Jiang, A. M. Chen, and M. X. Jin, *Appl. Surf. Sci.*, **355**: 681 (2015).
16. M. Djouder, O. Lamrous, M. D. Mitiche, T. E. Itina, and M. Zemirli, *Appl. Surf. Sci.*, **280**: 711 (2013).
17. E. B. Yakovlev, O. N. Sergaeva, and V. V. Svirina, *J. Opt. Technol.*, **78**: 487 (2011).
18. E. Axente, S. Noel, J. Hermann, M. Sentis, and I. N. Mihailescu, *Appl. Surf. Sci.*, **255**: 9734 (2009).
19. M. Hashida, A. F. Semerok, O. Gobert, G. Petite, Y. Izawa, and J. F. Wagner, *Appl. Surf. Sci.*, **197**: 862 (2002).
20. T. Yatsuhashi and N. Nakashima, *J. Photochem. Photobiol. C*, **34**: 52 (2018).
21. S. Bashir, M. S. Rafique, and W. Husinsky, *Appl. Surf. Sci.*, **255**: 8372 (2009).
22. A. Grubelnik, V. R. Meyer, P. Bützer, and U. W. Schönenberger, *J. Chem. Educ.*, **85**: 634 (2008).
23. B. B. Alchagirov, L. Kh. Afaunova, F. F. Dyshekova, Z. A. Kegadueva, A. G. Mozgovoï, R. Kh. Arkhestov, T. M. Taova, and Kh. B. Khokonov, *Inorg. Mater. Appl. Res.*, **2**: 461 (2011).
24. P. E. Mason, F. Uhlig, V. Vaněk, T. Buttersack, S. Bauerecker, and P. Jungwirth, *Nat. Chem.*, **7**: 250 (2015).
25. C. J. Mundy, J. Hutter, and M. Parrinello, *J. Am. Chem. Soc.*, **122**: 4837 (2000).
26. F. Mercuri, C. J. Mundy, and M. Parrinello, *J. Phys. Chem. A*, **105**: 8423 (2001).
27. A. M. Gabovich, V. F. Semeniuk, and N. I. Semeniuk, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **52**: 185201 (2019).
28. Hai-Ping Cheng and J. D. Gillaspay, *Comp. Mater. Sci.*, **9**: 285 (1998).
29. Hai-Ping Cheng and J. Gillaspay, *Phys. Rev. B*, **55**: 2628 (1997).
30. S. M. Ohr, *Mater. Sci. Eng.*, **72**: 72 (1985).
31. V. A. Fedorov, Yu. I. Tyalin, and V. A. Tyalina, *Dislokatsionnyye Mekhanizmy Razrusheniya Dvoynikuyushchikhsya Materialov* [Dislocation Mechanisms of the Destruction of Twinning Materials] (Moskva: Mashinostroiye: 2004) (in Russian).
32. V. N. Grishenko, Yu. Ya. Meshkov, Yu. A. Polushkin, and A. V. Shiyan, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **37**, No. 7: 961 (2015) (in Russian).
33. V. I. Vladimirov, *Fizicheskaya Priroda Razrusheniya Metallov* [Physical Nature of Fracture of Metals] (Moskva: Metallurgiya: 1984) (in Russian).
34. S. A. Kotrechko and Yu. Ya. Meshkov, *Problemy Prochnosti*, **2**: 55 (2009) (in Russian).
35. S. A. Kotrechko, *Problemy Prochnosti*, **4**: 14 (2003) (in Russian).
36. P. C. Paris and J. C. *Prikladnyye Voprosy Vyazkosti Razrusheniya* [Applied Problems of Fracture Viscosity] (Moskva: Mir: 1968), p. 64 (Russian translation).
37. A. Ya. Krasovskiy and V. N. Krasiko, *Treshchinostoičnost' Staley Magistralnykh Truboprovodov* [Crack Resistance of Main Pipeline Steels] (Kiev: Naukova Dumka: 1990) (in Russian).
38. G. P. Cherepanov, *Mekhanika Khrupkogo Razrusheniya* [Brittle Fracture Mechanics] (Moskva: Nauka: 1974) (in Russian).
39. J. P. Hirth and J. Lothe, *Teoriya Dislokatsiy* [Theory of Dislocations] (Moskva: Atomizdat: 1972) (Russian translation).
40. Yu. Ya. Meshkov and K. F. Soroka, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 6: 781 (2021) (in Ukrainian).
41. Yu. Ya. Meshkov and G. P. Zimina, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 6:

- 807 (2022) (in Ukrainian).
42. Yu. Ya. Meshkov, G. P. Zimina, and N. M. Stetsenko, *Prog. Phys. Met.*, **23**: 744 (2022).
 43. J. Friedel, *Dislokatsii* [Dislocations] (Moskva: Mir:1967) (Russian translation).
 44. W. P. Mason, *Appl. Phys. Lett.*, **6**: 111 (1965).
 45. A. D. Brailsford, *Phys. Rev.*, **186**: 959 (1969).
 46. N. W. Ashcroft and N. D. Mermin, *Fizika Tverdogo Tela* [Physics of Solid State]. Vol. 2 (Moskva: Mir: 1979) (Russian translation).
 47. T. Suzuki, S. Takeuchi, and H. Yoshinaga, *Dinamika Dislokatsiy i Plastichnost'* [Dislocation Dynamics and Plasticity] (Moskva: Mir: 1989) (Russian translation).
 48. V. M. Zholkevskiy and G. A. Denisenko, *Fizika Tverdogo Tela*, **43**: 1828 (2001) (in Russian).
 49. Yu. I. Golovin, *Fizika Tverdogo Tela*, **46**: 769 (2004) (in Russian).
 50. M. A. Vasiliev, *Prog. Phys. Met.*, **8**: 65 (2007) (in Russian).
 51. T. Suzuki, S. Takeuchi, and H. Yoshinaga, *Dinamika Dislokatsiy i Plastichnost'* [Dislocation Dynamics and Plasticity] (Moskva: Mir: 1989) (Russian translation) (Moskva: Mir: 1989) (in Russian).
 52. V. Petrenko, E. Shtejnman, V. Timofeev, Yu. Osipyan, S. Bredihin, V. Kveder, N. Klassen, V. Negrij, I. Smirnova, and S. Shmurak, *Elektronnyye Svoystva Dislokacij v Poluprovodnikah* [Electronic Properties of Dislocations in Semiconductors] (Moscow: Editorial URSS: 2000) (in Russian).
 53. T. Figielski, *Phys. Stat. Sol.*, **10**:75 (1965).
 54. V. G. Eremenko, B. Ya. Farber, and E. B. Yakimov, *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*, **17**: 1313 (1983) (in Russian).
 55. Yu. I. Tyalin and V. M. Finkel, *Dokl. AN SSSR*, **279**: 1984 (1126) (in Russian).
 56. R. M. Peleshchak and B. A. Lukiyanev, *Pisma v ZhETF*, **24**: 37 (1998) (in Russian).
 57. Yu. I. Tyalin and V. A. Tyalina, *Vestnik TGU*, **14**: 1105 (2009) (in Russian).
 58. J. M. Ziman, *Ehlektrony i Fonony* [Electrons and Phonons] (Moskva: Izd. Inostr. Lit.: 1962) (Russian translation).
 59. V. D. Nacik and L. G. Potemkina, *ZhETF*, **79**: 2398 (1980) (in Russian).
 60. V. D. Nacik, S. N. Smirnov, and N. E. Tihonenkov, *Fizika Nizkikh Temperatur*, **19**: 931 (1993) (in Russian).
 61. V. D. Natsik and S. N. Smirnov, *Fizika Nizkikh Temperatur*, **21**: 663 (1995) (in Russian).
 62. I. N. Gumen, *Solid State Commun.*, **52**: 315 (1984).
 63. W. P. Mason, *Appl. Phys. Lett.*, **6**: 111 (1965).
 64. A. D. Brailsford, *Phys. Rev.*, **186**: 959 (1969).
 65. J. M. Galligan, T. H. Lin, and C. S. Pang, *Phys. Rev. Lett.*, **38**: 405 (1977).
 66. J. M. Galligan and C. S. Pang, *J. Appl. Phys.*, **50**: 6253 (1979).
 67. V. P. Lebedev and V. S. Krylovskiy, *Fizika Tverdogo Tela*, **27**: 1285 (1985) (in Russian).
 68. M. I. Molotskiy, *Fizika Tverdogo Tela*, **33**: 3112 (1991) (in Russian).
 69. V. P. Lebedev and V. S. Krylovskiy, *Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki*, **4**: 15 (2006) (in Russian).
 70. S. A. Kotrechko, Yu. Ya. Meshkov, and A. V. Shiyan, *Prog. Phys. Met.*, **10**: 207 (2009) (in Russian).