ISSN 2079-424X

УДК 539.67:539.374

Аналіз результатів, одержаних на лужно-галоїдних кристалах методом амплітудно-незалежного внутрішнього тертя

О.М. Петченко,
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

Г.О. Петченко
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail: gdaeron@ukr.net

Аннотація - на сьогоднішній час немає робіт, які б узагальнили результати, одержані в області амплітудно-незалежного внутрішнього тертя. Зважаючи на користь появи у літературі огляду і порівняльного аналізу результатів дослідження динаміки дислокацій методами амплітудно-незалежного внутрішнього тертя, і оцінку перспективних подальших експериментальних і теоретичних робіт у вказаному напрямку за мету даної роботи ми поклали саме це. Проведено аналіз основних результатів, одержаних в напрямку дослідження динаміки дислокацій з використанням методу амплітудно-незалежного внутрішнього тертя на різних об'єктах дослідження – металах і ЛГК. Виявлено перспективні напрямки для подальших експериментальних робіт за даною проблематикою. Можна констатувати, що перспективними напрямками для подальших робіт у вказаному напрямку на ЛГК є такі. По-перше, це проведення досліджень впливу магнітного поля на локалізацію частотних спектрів дислокаційного поглинання ультразвуку в кристалах. Наявність сучасних робіт переконливо свідчить про високу чутливість кінетики дислокацій до ступеню магнітної обробки зразків. Обробка даних вказаного експерименту в рамках теорії Гранато –Люкке дозволить визначити вплив магнітної обробки на динамічні і структурні характеристики кристалів, а порівняння в термінах теорії Альшиця – Інденбома вказаних даних із тими, що були одержані раніше за умов зміни температури, ступеню попередньої деформації і Х-опромінення зразків дозволить зробити важливі висновки щодо активації процесу дислокаційного руху магнітним полем. По-друге, це виконання термоактиваційного аналізу для ще недосліджених ЛГК, насамперед, NaCl. Низька температура Дебая для вже вивчених кристалів – CsJ, KBr, KCl дозволила вивчати процеси відкріплення при не дуже підвищених температурах (до ~ 430 К). Перехід до кристалів з більш високими температурами Дебая призведе до необхідності модернізувати експериментальне обладнання для роботи при більш високих температурах. Також залишається високою актуальність подальшої роботи у напрямку вивчення процесів релаксації і скидоутворення у кристалах методом амплітудно-незалежного внутрішнього тертя.

Ключьові слова: динаміка дислокацій, амплітудно-незалежне внутрішнє тертя, частотні спектри дислокаційного поглинання ультразвуку, попередня деформація, процеси відкріплення, температура Дебая, термоактиваційний аналіз

I. Вступ

Авторами [1] було запропоновано теорію, яка надає зв'язок між акустичними характеристиками (дислокаційне згасання α і декремент Δ_d, частота f і швидкість v УЗ-хвиль) із динамічними (коефіцієнт демпфування B) і структурними (густина дислокацій Λ і середня ефективна довжина дислокаційного сегменту L) характеристиками кристалу. Струнна модель дислокації, на якій базується теорія [1], послідовно розвивалась авторами робіт [2–5] і у її прикінцевому варіанті [1] надала описання низки фізичних процесів, пов'язаних із взаємодією рухливих дислокацій в кристалі з дефектами його структури.

Загальновідома робота [6], у якій було розкрито і узагальнено ієрархію фононних механізмів гальмування дислокацій у кристалах [7–10], істотно підсилила струнну модель [1]. З'явилась унікальна можливість не тільки фіксувати змінення динамічних і структурних характеристик кристалів, що має важливе значення для фізики пластичності і міцності [11], але і трактувати одержані результати в рамках теоретичної картини фононного гальмування дислокацій, яке є одним з визначальних механізмів гальмування дислокацій при їх надбар'єрному русі для будь-яких твердих тіл і єдиним – для іонних кристалів (внаслідок звуження загальної складової гальмування дислокацій при взаємодії з газом елементарних збуджень до лише однієї компоненти – фононної).

Експерименти з дослідження дислокаційної динаміки розділились [6, 11, 12] на дві основні групи – роботи з використанням методу амплітудно-залежного внутрішнього тертя (АЗВТ) та інших методик дослідження рухливості дислокацій і роботи в області амплітудно-незалежного внутрішнього тертя.

Перша група робіт є дуже значною, існує ціла низка написаних оглядів та монографій і накопичено значний обсяг як експериментального, так і теоретичного матеріалу [11–43]. Друга група робіт представлена низкою експериментальних і теоретичних праць закордонних і вітчизняних авторів, інтенсивність появи яких у літературі є досить низькою. Пояснення такої нерівномірності розвитку двох гілок спільної методики пов'язане з пересиченням дослідницьких лабораторій досить простими стандартними приладами, необхідними для проведення експериментів в області АЗВТ і практично повна відсутність унікальних нестандартних експери-

 DOI: 10.33042/2079-424X-2019-1-54-30-39

ментальних приладів, необхідних для проведення прецизійних вимірювань акустичних характеристик в амплитудно-незалежній області частот. У той же час, розробники теорії [1] зазначали, що для досліджень тонких фізичних процесів, пов'язаних із взаємодією дислокацій зі стопорами різної фізичної природи (домішки, радіаційна і магнітна обробка, пластична деформація), а також фононною підсистемою кристалу більш підходить саме амплітудно-незалежна область вимірювань, як така, що найбільш відповідає ідеології струнної моделі.

Визнаючи високу структурну чутливість АЗВТ-методики ($\alpha \sim L^4$) [1, 12] до наявних у кристалі перешкод дислокаційному руху, немає ніяких підстав стверджувати, що зазначена методика є ефективною щодо дослідження динаміки дислокацій у кристалах.

Прямими свідченнями цьому є класичні роботи [6, 44–45] у яких було виконано ґрунтовне порівняння результатів, одержаних методами АЗВТ і методами амплітудно-незалежного внутрішнього тертя і зроблено висновок про те, що останні є єдиним надійним джерелом для вивчення процесів відкріплення від стопорів різної фізичної природи в результаті зовнішнього впливу, у тому числі, термічної активації. На сьогоднішній час робіт, які б узагальнили результати одержані в області амплітудно-незалежного внутрішнього тертя немає.

Зважаючи на користь появи у літературі огляду і порівняльного аналізу результатів дослідження динаміки дислокацій методами амплітудно-незалежного внутрішнього тертя, і оцінку перспективних подальших експериментальних і теоретичних робіт у вказаному напрямку за мету даної роботи ми поклали саме це.

II. Матеріали і експериментальні технології

Результати по металам

Мідь. У праці [46] наведено результати дослідження дислокаційних втрат ультразвуку в частотному діапазоні 7,5…100 МГц на монокристалах високочистої міді (99.999 %) і сплаву Cu – 0,13 % Mn. Автори намагались встановити температурну залежність величини *B*. Через використання ними ранніх теорій динамічного гальмування дислокацій [47–49] коректно його встановити не вдалось, проте серед позитивних рис роботи можна відзначити зміщення резонансного максимуму в бік більших амплітуд і менших частот, а також і монотонне збільшення *B* з ростом температури. Певним доповненням і продовженням [46] можна вважати працю [50], в якій автор розширив розгляд сплавів міді – Cu–Mn, Cu–Ni, Cu–Ge, Cu–Pd, Cu–Pt. Автори [51–52] вивчали на опромінених зразках Cu частотні, температурні і орієнтаційні залежності дислокаційних втрат ультразвука. Вони ввели поняття "ефективної чистоти" матеріала, що змінюється в результаті радіаційної обробки зразків, внаслідок чого із збільшенням дози опромінення спостерігається зміщення резонансних кривих дислокаційного декремента $\Delta_d(f)$ у бік вищих частот і менших значень Δ_d. Також принципово новим ефектом було те, що всі частотні спектри дислокаційного поглинання мали збіжні високочастотні асимптоти, що відрізняє досліджуваний ефект опромінення від температурних досліджень, при яких вказані асимптоти $\Delta_d(f)$ не збігаються для різних *T*. Можна констатувати, що в працях [51–52] започатковано розгляд радіаційної обробки матеріалу як способу впливу на його динамічні і дислокаційні характеристики, хоча сама концепція впливу опромінення на рухливість дислокацій була відомою набагато раніше [53]. На міді також виконано три важливі праці [44,54–55], що мають фундаментальне значення для узагальнення всього масиву експериментальних і теоретичних робіт в рамках теорій [1, 6]. Для порівняння вищевказаних результатів, отриманих на кристалах Cu і його сплавах з різним станом дислокаційної структури, які не узгоджувались як поміж собою, так і з теоретичними даними, а також для фундаментальної перевірки теорії [1], Наундорфом і Люкке [44] було використано установку, що реалізує відразу два режими вимірювань акустичних характеристик - методи амплітудно-незалежного і амплітудно-залежного внутрішнього тертя. Аналізуючи результати комплексних вимірювань, автори [10] прийшли до висновку, що намагання опису даних, одержаних у низькочастотній і високочастотній областях, єдиним профілем є неправильним, і всі попередні спроби екстраполяції результатів амплітудно-незалежного внутрішнього тертя на низькочастотну область є неприпустимими. Виявилось, що єдиного механізму затухання для кГц і МГц діапазонів частот не існує і єдиним теоретичним профілем вони не описується. На думку авторів, можна казати про узагальнений профіль лише у контексті суперпозиції двох профілів, що мають вигляд кривих з максимумом. При цьому розташування низькочастотного профілю є завищеним по осі декременту порівняно з високочастотним, що пояснює незбігання за порядком величини параметра *B* у різних дослідах. Було також відзначено, що високочастотні дані краще описуються теорією Гранато-Люкке, ніж низькочастотні. У праці [54] запропоновано методику урахування тонких змін у процесі дислокаційного поглинання ультразвуку при переході від високих до низьких частот на підставі вивчення у міді впливу довжини дислокаційного сегменту, що коливається у полі УЗ–хвилі на величину *B*. Автори [54] відзначили, що високочастотні дані більш підходять для перевірки квантово-механічної теорії [6], але дані з низьких частот можуть бути оброблені шляхом відокремлення з загально виміряної величини *B* релаксаційної складової, внаслідок чого залишиться лише в'язка складова, що забезпечує дислокаційні втрати у високочастотній області. Автори праці [54] уперше сформулювали важливе поняття про те, що константа динамічного гальмування дислокацій є фундаментальною характеристикою матеріалу, що не залежить від попередньої обробки досліджуваних зразків і визначається лише взаємодією рухливих дислокацій з газом елементарних збуджень. У праці [55] аналізується весь масив існуючих на той час даних по металам і ЛГК (зокрема, розглядаються дані по міді) з метою встановлення ієрархії фононних і електронних механізмів гальмування дислокацій, діючих у досліджуваних кристалах. Встановлено, що для вивчених різними авторами зразків міді електронні механізми динамічного гальмування дислокацій менш ефективні, ніж фононні.

Алюміній. Переважна більшість робіт з дослідження дислокаційної кінетики у Al виконана із залученням методів, не пов'язаних з високочастотним внутрішнім тертям, про які вже йшлося у попередніх підрозділах.

Існуючі ж праці [48, 56] по вимірюванням дислокаційного поглинання ультразвуку у МГц – області частот на Al чистотою 99,99% викликають ряд запитань щодо технології проведення, обробки даних і зіставлення з теорією. Зокрема, автор [56] зробив сумнівний висновок про те, що довжини дислокаційних сегментів є практично незмінними при деформуванні кристалів. До того ж, автори [48, 56] спиралися на ранні недостатньо розвинуті на той час теорії динамічного гальмування дислокацій [47–49], внаслідок чого результати їх робіт є, на жаль, некоректними. Абсолютні значення *B*, отримані на Al різними методами, знаходяться в інтервалі від $5\cdot10^{-4}$ до 10^{-6} Па·с.

Слід зауважити, що автори [55] для проведення аналізу існуючих експериментальних даних по вивченню величини *B* на кристалах Al в рамках теорії [6] скористалися лише тими прецизійними даними, які були отримані по високочастотній асимптоті резонансної кривої $\Delta_d(f)$.

Залізо. Відома праця [57], у якій наведено стислий опис виконаних у вигляді технічного звіту досліджень по кристалам Fe різного ступеню чистоти, попередньої обробки і дислокаційної структури. Судячи з теоретичних джерел [47, 49], на які посилаються автори, до їх результатів можуть виникнути запитання.

Сталь. Рання праця [58], яка датується 1952 р. демонструє дані щодо вимірювання імпульсним методом поглинання у різних марках сталі. Робота не має дислокаційної спрямованості, але є цікавою з точки зору ранніх технологій і авторських рекомендацій щодо проведення акустичних вимірювань.

Ніобій. Мезон і Макдоналд [59] виконали комплексну працю на зразках 99.98 % ніобію з домішками W, Mo, Ta, орієнтованих близько до кристалографічного напрямку <110>. Розраховувалась величина орієнтаційного фактору, визначались пружні модулі C_{11}, C_{12} і C_{44} і величина швидкості, дефект модуля, константа демпфування і її температурних хід. Зіставлення з теорією [6] автори [59] не проводили і динамічне гальмування розглядали в термінах концепції Лейбфріда [49]. Як важливий результат роботи можна відзначити спостережуване авторами монотонне зниження *B* із зменшенням температури, яке якісно відповідає результатам подальших робіт на інших матеріалах.

Сурьма. Групою В.І. Старцева [60] на зразках високочистої сурьми було виконано дослідження, результати якого оброблялись в рамках струнної дислокаційної теорії [1] і квантово-механічної теорії [6]. Авторами було встановлено, що в досліджуваному температурному інтервалі 100–300 К за динамічне гальмування дислокацій у досліджуваних зразках є відповідальною суперпозиція фононного вітру і релаксації "повільних" фононів, що відповідає теоретичним передбаченнями авторів [6].

Вісмут. Автори [61] досліджували частотні і амплітудні залежності дислокаційного поглинання ультразвуку у 99.999% вісмуті в інтервалі температур 4,2…300 К. Інтервал високочастотних вимірювань становив 7,5…142,5 МГц. В основному, вивчались амплітудні залежності внутрішнього тертя для різних температур і аналізувався їх хід, особливо при низьких температурах. За даними амплітудно-незалежного внутрішнього тертя автори достатньо коректно встановили величину *B* при кімнатній температурі.

Результати по іонним кристалам

Для ЛГК дослідження були більш інтенсивними внаслідок модельності цих кристалів і можливості дослідження фонон-дислокаційної взаємодії у чистому вигляді (без урахування електронної складової динамічного демпфування дислокацій). Розглянемо основні досягнуті результати по дослідженню динаміки дислокацій у ЛГК методом амплітудно-незалежного внутрішнього тертя.

NaCl. Група Л.Г. Меркулова [62–64] займалась дослідженнями поглинання і швидкості ультразвуку у ЛГК в області високих частот. Діапазон вимірювань їх установки складав 5…200 МГц. Ними були виміряні частотні (зокрема, для різних температур), амплітудні і часові залежності дислокаційного поглинання, а також швидкості звуку для ряду ЛГК, у тому числі NaCl, на підставі чого було розраховано пружні модулі кристалів. Через відсутність на той час квантово-механічної теорії Альшиця-Інденбома [6] результати [62–64] не могли спиратись на неї, але щодо струнної теорії моделі [1], то її автори відзначали деякі результати [28–30], що виявилися корисними в плані перевірки дієвості моделі. Група Я.М. Сойфера [65–66] також виконувала користі роботи щодо оцінок величини *B* і її температурного ходу на базі високочастотних вимірювань у інтервалі 30 – 150 МГц. Праці авторів [67–70] містять результати апробації метода внутрішнього тертя для вивчення ефектів, пов'язаних з рухливістю дислокацій. Праця [68] містить як дані щодо вимірювань *B(T),* так і оглядові дані по тематиці, праці [67, 70] містять цікаві результати перших у світі досліджень дисперсії швидкості у NaCl і впливу радіаційного опромінення на декремент дислокаційного поглинання ультразвуку і дефект модуля. Виконані у цих роботах оцінки абсолютної величини і температурного ходу B виконувались з залученням ранніх теорій фонон-дислокаційної взаємодії Лейбфріда і Мезона, тому, на жаль вони не зовсім коректні. Завершує розгляд вказаних досліджень праці [71–74] виконані на багатофункціональній установці [75] групою О.М. Петченка. У цих працях на підставі вимірювання швидкості і поглинання ультразвуку акустичними методами було виявлено ефект зміщення частотних спектрів дислокаційного поглинання ультразвуку з температурою і деформацією та коректно визначено відповідні залежності ефективної довжини дислокаційного сегменту, в результаті чого після обробки даних в рамках теорії [1] розраховано абсолютну величину і температурний хід параметра *B*. Встановлено в термінах [6] ефективні фононні механізми, що лімітують рухливість дислокацій у досліджених кристалах NaCl. Показано, що величина *B* не залежить від густини рухливих дислокацій, що підтверджує думку авторів [54] про те, що константа демпфування *B* є фундаментальною характеристикою матеріалу, залежною лише від взаємодії рухливих дислокацій з фононною підсистемою кристалу і незалежною від його дислокаційної структури. Крім того у [73–74] ретельно досліджено ефект дисперсії звукових хвиль, що попередньо розглядався у [67, 70]. Використовуючи можливість [1] визначати параметри *B* і *L* за даними вимірювання час-

 DOI: 10.33042/2079-424X-2019-1-54-30-39

тотних залежностей дефекту модуля, автори змогли встановити залежності B і L від Λ та порівняти їх з аналогічними залежностями, визначеними на тих же зразках іншим методом - по спадним гілкам частотних залежностей $\Delta_d(f)$ для зразків з різними ступенями попередньої деформації. Виявилось що залежності B і L від густини дислокацій в кристалах Λ у працях [71–74] якісно однакові, але кількісно відрізняються, що є прямим підтвердженням правильності висновків праці Наундорфа і Люкке [44] про неможливість описання даних, одержаних з високочастотної і низькочастотної областей єдиним профілем.

Треба також окремо згадати серію праць, виконаній на монокристалах хлористого натрію групою О.М. Петченка [76–79]. У цих роботах вперше в світі досліджувався вплив швидкості пластичного деформування, ступеню попередньої деформації і дислокаційної структури (сітка дислокацій "лісу" і домішкові центри закріплення на дислокаціях) на глибину релаксації напруги в досліджуваних кристалах, причому для індикації релаксаційних процесів залучались акустичні методи дослідження (вимірювання дислокаційного поглинання і швидкості ультразвуку), які надто чутливі до процесів тонких структурних змін у кристалах. За одержаними результатами розраховувались значення ефективної довжини дислокаційного сегмента у кристалах, що поступово знижувалась внаслідок релаксаційних процесів у кристалах. Серед іншого авторами було визначене критичне значення швидкості пластичного деформування ~ $5\cdot10^{-6}$ c^{-1}, при якому глибина релаксації у кристалах була фактично нульовою, а дислокації рівномірно заповнювали об'єм кристалу без утворення смуг ковзання, що є принципово важливим результатом для вимірювань у амплітудно-незалежній області. Це важливо, так як автори [6] єдиним джерелом похибок при вимірюваннях резонансних дислокаційних втрат визначили похибку визначення густини дислокацій за методом вибіркового травлення, величину якої вважали суттєвою через ускладнення підрахунку ямок протравлювання у смугах ковзання.

CsJ. У роботі [80] автори вивчали вплив температури в інтервалі 1.5…80 К на швидкість і поглинання ультразвуку у продеформованих та опромінених зразках. Зниження поглинання з температурою демонструє ефект "заморожування" стопорів на дислокаціях, підсилення ефекту з деформацією і опроміненням, що віддзеркалюється на "просіданні" спостережуваної кривої $\Delta_d(T)$ відбувається через додаткове закріплення дислокаційних сегментів "сильними" стопорами (вузли дислокаційної сітки) і "слабкими" стопорами – дефектами радіаційного походження. До речі, по залежностям, наведеним авторами [80] видно, що деформація найефективніше закріплює дислокаційні сегменти – верхня крива $\Delta_d(T)$ відповідає неопроміненому і недеформованому стану зразка, під нею розташовується крива для опроміненого кристала, а ще нижче – для продеформованого. Щодо температурних залежностей швидкості, то тут ситуація зворотна, тобто всі вказані залежності, навпаки, зростають із зменшенням температури. Це також якісно цілком зрозуміло – чим нижче температура, тим менш виразними стають процеси поглинання зовнішньої енергії і тим, відповідно, має бути вища швидкість проходження звуку через кристал. У роботі [81] авторами встановлено температурних хід константи демпфування і середньої ефективної довжини дислокаційного сегменту. Зниження L і B із зменшенням температури демонструє ефекти скорочення дислокаційного сегменту внаслідок зниження імовірності термічного відкріплення дислокації від стопорів і "вимороження" фононного газу відповідно. Проведено зіставлення одержаних результатів з теорією Альшиця-Інденбома і зроблено висновки щодо фононних механізмів, відповідних за динамічне гальмування дислокацій у CsJ. Дослідження залежності $B(\Lambda)$, що традиційно виконувалась групою О.М. Петченка на всіх ЛГК, для CsJ виконане не було. У роботах [82–84], виконаних групою О.М. Петченко, наведено яскравий приклад використання методу внутрішнього тертя для вивчення процесів скидоутворення у зразках. Автори [82–84] уперше в світі застосували ультразвукове зондування кристалів одночасно з його навантаженням для вивчення тонких релаксаційних процесів у кристалах, що тривають до досягнення границі скидоутворення. Експерименти проводились на кристаллах з різними кутами разорієнтування відносно кристалографічного напрямку <100> (напрямок, заборонений для деформування для CsJ), на яких досліджувався вплив температури і швидкості деформування на процеси скидоутворення. Показано, що збільшення температури (починаючи з 400 К) і кута разорієнтування зменшує величину границі скидоутворення (при фіксованій швидкості деформування). Уперше продемонстровано процеси, що передують скидоутворенню. Технологія експеримента була такою. Зразки ступінчато навантажували, і, після кожної з зупинок штоків розривної машини, фіксували механічну релаксацію у вигляді спаду затухання $\Delta\alpha$. Спочатку при збільшенні рівня навантаження спостерігалось збільшення $\Delta\alpha$. При переході рівня навантаження за критичну величину $\sigma > 0{,}5\sigma_c$, де σ_c – границя скидоутворення у кристалах спостерігалось зменшення $\Delta\alpha$ за законом, що раніше забезпечував її збільшення. Тільки після згортання процесів релаксації ($\Delta\alpha \to 0$) починався процес скидоутворення. У даному випадку немонотонна поведінка $\Delta\alpha$ показувала, як у кристалі розвивалися процеси релаксації, та як кристал намагався найти можливість позбавитись зовнішнього навантаження і понизити свою внутрішню енергію. По мірі вичерпання всіх можливостей релаксаційного зниження механічної напруги, остання починала накопичуватись і кристал виходив на рівень напруги, необхідної для скидоутворення. Можна бачити, що внутрішнє тертя надає можливість досліджувати тонкі структурні процеси у кристалах у той час, коли традиційні методики є цілком непридатними. У працях [85–86] ті ж автори продемонстрували ще одну з можливостей, що надає метод внутрішнього тертя – проведення термоактиваційного аналізу у квазіпружній області деформацій. Варто відзначити, що вивчення у такий спосіб термоактиваційних параметрів і силового закону взаємодії дислокації зі стопорами проводилось вдруге в світі. Авторами першої праці на міді [87] є Криштал, Головін і Троїцький, якими було створено і експериментально апробовано методику вивчення типу стопорів на дислокаціях в кристалах за результатами експерименту, у якому фіксується одночасний вплив температури і пружного навантаження на дислокаційне поглинання ультразвуку. Після виходу праць [85–86] апро-

бація методики [87] розповсюдилась і на ЛГК, що мало принципове значення.

KCl. Серед ранніх робіт по вивченню пружних, динамічних і дислокаційних характеристик кристалів хлористого калію високочастотним імпульсним ехо-методом (амплітудно-незалежна область) можна відзначити праці [46, 62]. Значення швидкостей для УЗ-хвиль у поздовжньому і поперечному напрямку <100> і <110> та пружних модулів C_{11}, C_{12} і C_{44} досліджувалось у [62], а константа B і вплив радіації на неї (з розрахунком об'ємної концентрації N_f центрів забарвлення, що виникнули в KCl під дією опромінення), а також ефективна довжина дислокаційного сегменту L визначались у [46]. Серйозного аналізу щодо дислокаційних втрат на основі фонон-дислокаційної взаємодії у вказаних роботах не було зроблено (квантово-механічна теорія [6] з'явилася набагато пізніше), але навіть такі попередні дані являли собою безсумнівну цінність. Далі слід відзначити спроби авторів [88–89] встановити значення константи демпфування в KCl і вплив попередньої деформації зразків на неї. Одержані ними результати також можна у цілому оцінити позитивно, хоча вони потребували перегляду – і в плані технології експерименту, і в сенсі теоретичної обробки і описання даних. У працях [90–92] О.М. Петченком зі співавторами вивчався вплив температури і деформації на поведінку залежностей $\Delta_d(f)$ і окремо було встановлено температурну залежність пружних модулів C_{11}, C_{12} і C_{44} на підставі вимірювання швидкості ультразвуку. Обробка результатів проводилась в рамках теорії [1], внаслідок чого були встановлені залежності B і L від Λ і T. Оцінка ролі фононних механізмів, що були відповідними за зниження дислокаційної рухливості здійснювалась в термінах теорії [6]. Можна констатувати, що згадана серія праць [90–92] майже повністю закрила всі питання щодо гальмування дислокацій у хлористому калії при їх надбар'єрному русі. Однак залишалось не до кінця з'ясованим питання щодо отриманої авторами [90] залежності $B(\Lambda)$, яка дещо змінювалась залежно від ступеню попередньої обробки зразків, що потребує додаткових контрольних вимірювань для їх уточнення. Пізніше авторами [93] було проведено додаткові дослідження вказаної проблематики на монокристалах хлористого калію тієї ж серії і ними було доведено незалежність $B(\Lambda)$ у всьому інтервалі ступенів попередньої деформації зразків. Виявилось, що у роботі [90] при розрахунках величини B використовувався нераціональний спосіб обробки експериментальних даних по $\Delta_d(f)$. Ці криві перебудовували у залежності $\Delta_d = \Psi(1/f)$, а величину B визначали з нахилу прямолінійних ділянок цих зворотних залежностей, що не відповідає вимогам теорії [1], де обрахунок параметра B має здійснюватися за високочастотною асимптотою частотних спектрів дислокаційного декременту. У роботах [94–95] виконано термоактиваційний аналіз процесу відкріплення дислокацій від точкових стопорів у кристалах в рамках методики [87].

LiF. Одні з найперших спроб динамічних дислокаційних вимірювань були здійснені авторами [67, 96]. Ці праці було виконано досить ретельно, але зіставлення результатів з фононними теоріями було ускладненим. У праці Мрачека Мітчела [96] на наведеному ним графіку видно, що його дані не збігаються ані з теорією Лейбфріда, ані Мезона. У праці [67] автори намагались встановити температурний хід B і навіть порівняти його у зведених координатах з теорією [6]. Але, в зв'язку з тим, що за їх даними на одну криву практично накладались точки як для NaCl, так і для LiF (при тому, що температури Дебая для цих кристалів відрізняються майже вдвічі) виникає великий сумнів щодо надійності цих даних. Якщо зважати на застосовану авторами методику виділення дислокаційного внеску із загального поглинання шляхом опромінення зразків γ-квантами від джерела Co^{60} до сумарної дози ~ 10^8 рад (тобто, віднімання деякого середнього бездислокаційного фону, що приймається для кристалів всієї серії), то причини таких похибок стають зрозумілими. Автори [97–99] провели весь цикл акустичних вимірювань у амплітудно-незалежній області – включаючи вимірювання дислокаційного поглинання і швидкості ультразвуку, на підставі яких розраховано пружні модулі, необхідні для корректного знаходження параметрів B і L. За результатами проведених досліджень ними встановлено залежності $B(T)$ і $B(\Lambda)$, визначено фононні механізми, що відповідають за гальмування дислокацій у LiF при їх надбар'єрному русі. Слабка залежність від густини дислокацій величини B, як і в разі [90], потребувала додаткового уточнення. У роботі [100] цю невизначеність було усунуто і доведено незалежність $B(\Lambda)$.

Окремим результатом, одержаним для кристалів фтористого літію в напрямку дослідження дислокаційної динаміки методом амплітудно-незалежного внутрішнього тертя є серія нещодавніх робіт [101–109]. У роботах [101–106] імпульсним ехо-методом було визначено вплив рентгенівського опромінення дозами до ~ 1000 Р на локалізацію задемпфованого дислокаційного резонансу в інтервалі частот 22.5 – 232.5 МГц та температурі T = 300 К на монокристалах LiF, попередньо продеформованих до ε = 0.3 %, 0.4 %, 0.65 %, 1 % і 1.5%. Було встановлено, що поступове збільшення ступеню рентгенізації кристалів викликає появу двох ефектів – монотонного зміщення параметрів резонансного максимуму в бік високих частот та процесу гасіння амплітуди дислокаційного резонансу. Одержані результати підтвердили справедливість теоретичних передбачень [52] відносно поведінки параметрів резонансного максимуму кривих $\Delta_d(f)$ – частоти f_m і максимального декременту. Також було визначено залежності середньої ефективної довжини дислокаційного сегменту від часу опромінення для кристалів з різними ε. Зменшення параметра L по мірі зростання дози опромінення пояснюється блокуванням рухливих дислокацій закріплювальними центрами, що з'являються внаслідок збільшення ступеню рентгенізації. На підставі одержаної залежності пояснено монотонне зміщення параметрів резонансного максимуму у вказаному інтервалі доз опромінення. Показано, що довжина дислокаційного сегменту зменшується із збільшенням дози опромінення за закономірністю, передбаченою авторами теорії [52], що відображає процеси закріплення рухливих дислокацій у кристалах радіаційними дефектами. Крім того, було виявлено відсутність впливу опромінення кристалів дозами 0…400 Р на спостережувану незалежність коефіцієнта динамічного гальмування дислокацій B від густини дислокацій у кристалах LiF. Встановлена незмінність характеристики $B(\Lambda)$ від часу рентгенівської експозиції 0…60 хвилин є додатковим і

 DOI: 10.33042/2079-424X-2019-1-54-30-39

яскравим підтвердженням того, що коефіцієнт *B* є фундаментальною характеристикою кристалу і динамічне гальмування дислокацій визначається лише дисипативними процесами у фононній підсистемі кристалу [54].

У роботах [101–108] для кристалів LiF акустичним методом визначено вплив малих доз рентгенівського опромінення на дисперсію швидкості ультразвуку *v(f)* в інтервалі частот 7.5…232.5 МГц у зразках із залишковою деформацією 0.65 % при T = 300 К. Встановлено, що попередня деформація зразків призводить до виникнення чітко вираженої області дисперсії на кривій *v(f)*, що для недеформованих зразків змінюється за лінійним законом. Дисперсійне зміщення кривої *v(f)* особливо помітне на низьких частотах, де посилюється процес розсіювання пружної енергії УЗ–хвиль довгими дислокаційними петлями. Подальше опромінення кристалів LiF рентгенівськими променями приводить до поступового зменшення області дисперсії і повернення форми кривої *v(f)* до первинного вигляду, що пояснюється піннінгом дислокацій дефектами радіаційного походження і зменшенням дефекту модуля. Встановлено вплив часу опромінення на амплітудну і частотну локалізацію дефекту модуля в кристалах LiF. На основі виміряних дисперсійних кривих *v(f)* розраховані функціональні залежності коефіцієнта динамічної в'язкості *B*, середньої ефективної довжини дислокаційної петлі *L* і густини дислокацій *Λ* від часу рентгенівського опромінення. Встановлена незалежність параметра *B* від часу опромінення в інтервалі 0…120 хв. підтверджує закономірність, досліджену нами іншим методом – шляхом вимірювання дислокаційних втрат ультразвуку у амплітудно-незалежній області. Проведене порівняння результатів [101–108], одержаних двома методами, що ґрунтуються на вимірюваннях у області низьких і високих частот, на одних і тих самих кристалах. Показало, що обидва методи дозволяють отримати однакову якісну фізичну картину, але кількісні результати при цьому відрізняються приблизно на порядок, що свідчить на користь того, що дислокаційні втрати у кристалі не описуються в областях низьких і високих частот єдиним механізмом, як це передбачали автори [44]. Додатковим підтвердженням справедливості передбачень [44] є робота [109], у якій на кристалах LiF тієї ж серії, що використовувались у роботах [101–108] було реалізовано ще один незалежний алгоритм розрахунку динамічних і структурних характеристик, запропонованим авторами струнної дислокаційної теорії [1], у якому за основу беруться дані вимірювань поглинання і відносної швидкості ультразвуку в зразку на фіксованій частоті.

KBr. Першою в контексті застосування методів внутрішнього тертя для досліджень динамічних і структурних параметрів кристалу треба згадати ранню роботу групи В.І. Старцева [110], хоча вона, строго кажучи, відноситься до аплітудно-залежної області вимірювань (77.7 кГц). Незважаючи на завищені оцінки *B*, одержані авторами даної праці, можно відзначити високий рівень статті як в плані виконання експерименту, так і в плані фізичного обговорення отриманих результатів. Варто також мати на увазі, що на момент виходу вказаної праці теорії [6] не існувало, а бурхливий розвиток методів внутрішнього тертя тільки починався. Єдиною основою для авторів [110] могли бути лише дані по рухливості індивідуальних дислокацій, які на той час хоча й були застосовні, але ж не виверені стосовно їх достовірності працею С.В. Лубенця [45]. Подальша робота на KBr відображена у працях [111–116]. У працях [111–112, 114–116] в рамках методу амплітудно-незалежного внутрішнього тертя було виконано комплексну роботу на KBr (на зразках одної серії) щодо вивчення температурної поведінки (у інтервалі температур 77–300 К) пружних модулів і частотних спектрів дислокаційного поглинання, а також дослідження впливу дислокаційної структури зразків на поведінку кривих $\Delta_d(f)$. За результатами досліджень було встановлено незалежність *B* від *Λ* для різних *T*, а також температурних хід величини *B(T)* для зразків з різними *Λ* і внески механізмів фононного вітру і релаксації "повільних" фононів у динамічне гальмування дислокацій у бромистому калії. Крім того, у праці [113] в рамках методики [87] і в продовження її апробації [85–86] на ЛГК авторами було виконано термоактиваційний аналіз процесу відкріплення дислокацій у KBr і KCl на основі вивчення серії кривих $\alpha_d(\sigma)$ для різних T інтервалу 300–430 К. Робоча частота ультразвукових вимірювань складала 7.5 МГц. Також було оцінено середню ефективну довжину дислокаційного сегменту, розмір комірки дислокаційної сітки, енергію зв'язку дислокації со стопором. На основі вивчення таких характеристик, як енергія активації і активаційний об'єм в широкому інтервалі пружних навантажень автори встановили емпіричні силові закони взаємодії дислокації з діючими центрами закріплення у досліджуваних кристалах. Після їх перебудови у зведених координатах і порівняння з існуючими теоретичними шаблонами різних видів взаємодії дислокації зі стопорами [117], автори зробили висновки щодо імовірних типів стопорів, що можуть виконувати закріплювальну дію на дислокаціях.

Закінчуючи розгляд результатів, одержаних методом амплітудно-незалежного внутрішнього тертя відзначимо нещодавні роботи [118–119], в яких одночасно з ним застосовувався оптичний метод [120–124], що дозволило визначити природу центрів закріплення рентгенівського походження у досліджуваних кристалах.

III. Висновки

На основі проведеного огляду сучасного стану розвитку проблеми досліджень дислокаційної динаміки методом амплітудно-незалежного внутрішнього тертя можна констатувати, що перспективними напрямками для подальших робіт у вказаному напрямку на ЛГК є такі.

1. Проведення досліджень впливу магнітного поля на локалізацію частотних спектрів дислокаційного поглинання ультразвуку в кристалах. Наявність сучасних робіт [33–42] переконливо свідчить про високу чутливість кінетики дислокацій до ступеню магнітної обробки зразків. Обробка даних вказаного експерименту в рамках теорії Гранато –Люкке дозволить визначити вплив магнітної обробки на динамічні і структурні характеристики кристалів, а порівняння в термінах теорії Альшиця – Інденбома вказаних даних із тими, що були одержані раніше за умов зміни температури, ступеню попередньої деформації і Х-опромінення зразків дозво-

лить зробити важливі висновки щодо активації процесу дислокаційного руху магнітним полем.

2. Виконання термоактиваційного аналізу в рамках методики [87] для ще недосліджених ЛГК, насамперед, NaCl. Низька температура Дебая для вже вивчених кристалів – CsJ, KBr, KCl дозволила вивчати процеси відкріплення при не дуже підвищених температурах (до ~ 430 К). Перехід до кристалів з більш високими температурами Дебая призведе до необхідності модернізувати експериментальне обладнання для роботи при більш високих температурах.

3. Вивчення процесів релаксації і скидоутворення у кристалах методом амплітудно-незалежного внутрішнього тертя, започаткованому авторами [76–79, 82–84]. Вказані праці є єдиним у світі прикладом проведення такого роду досліджень, тому актуальність подальшої роботи у цьому напрямку залишається високою.

Перелік літературних джерел

[1] A. Granato, K.Lücke. String model of dislocation and dislocation ultrasound absorption. Physical acoustic, v. 4, p. A. M.: “Mir”, 1969, p. 261-321.

[2] N.F. Mott. A theory of workhazdening of metal crystals // Phil. mag. 1952, V. 43, № 346, P. 1151 – 1178.

[3] J. Fridel. Anomaly in the rigitity modulus of copper allous for small concentration // Phil. mag. 1953, V. 44, № 351, P. 444 – 448.

[4] J. Weertman. Internal friction of metal single crystals // J. Appl. Phys.1955, V. 26, № 2, P. 202 – 210.

[5] J.S. Koehler. The influence of dislocations and impurities on the damping and the elastic constants of metal single crystals. Imperfections in nearly perfect crystals, New York, 1952, P. 197 – 216.

[6] V.I. Alshits, V.L. Indenbom. Dynamic drag of dislocations // Usp. Fiz. Nauk. 1975, V.115, № 3, P. 3 – 39.

[7] V.I. Alshits. “Phonon wind” and dislocation drag // FTT. 1969, V. 11, № 8, P. 2405 – 2407.

[8] T. Ninomiya. Dislocation vibration and phonon scattering // J. Phys. Soc. Japan. 1968, V. 25, № 3, P. 830 – 840.

[9] V.I. Alshits, Yu.M. Sandler. Flutter mechanism of dislocation drag // Phys. Stat. Sol. (b). 1974, V. 64, № 1, P. 45–49.

[10] V.I. Alshits. Raman scattering as a cause of dislocation drag // FTT. 1969, V. 11, № 5, P. 1336 – 1344.

[11] V.I. Startsev, V.Ya. Ilyichev, V.V. Pustovalov. Plasticity and strength of metals and alloys at low temperatures. M.: Metallurgiya, 1975. – 328 c.

[12] R. Truell, Ch. Elbaum, B. Chik. Ultrasound methods in solid state physics. Moskva: “Mir”, 1972. 307 p.

[13] S.P. Nikanorov, B.K. Kardashov, Elasticity and Dislocation Inelasticity of Crystals. M.:Nauka, 1985, 256 p.

[14] V.S. Postnikov, Inernal friction in metals, M.: Metalurgia, 1969. – 330 p.

[15] M.A. Krishtal, S.A. Golovin, Internal friction and metal structure, M.: Metalurgia,1976. – 375 p.

[16] A.A. Botaki, A.A. Vorobev, V.A. Ulyanov, Radiation physics of ionic crystals, M.: Atomizdat, 1980. – 208 p.

[17] E. Yu. Gutmanas, E.M. Nadgorny, A.V. Stepanov. Study of the motion of dislocations in sodium chloride crystals // FTT. 1963, V. 5, № 4, P. 1021 – 1026.

[18] V.B. Parijsky, S.V. Lubenets, V.I. Startsev. Mobility of dislocations in monocrystals of potassium bromide // FTT. 1966, V.8, № 4, P.1227 – 1238.

[19] S.V. Lubenets, V.I. Startsev. Mobility and interaction of dislocations with an impurity in crystals

[20] KCL:Ba2+ // FTT. 1968, V.10, № 1, P. 23 – 28.

[21] V.B. Parijsky, A.I. Tretyak. Temperature dependence of the mobility of dislocations in KBr single crystals // FTT. 1967, V. 9, № 9, P. 2457 – 2468.

[22] V.B. Parijsky, A.I. Landau, V.I. Startsev. On the discontinuous motion of dislocations in LiF single crystals // FTT. 1963,V. 5, № 5. – P. 1377 – 1385.

[23] V.B. Parijsky, A.I. Landau, V.M. Borzhkovskaya. Spontaneous dislocation jumps in LiF single crystals // FTT. 1963, V. 5, № 9, P. 2570–2575.

[24] G.A. Ermakov, E.M. Nadgorny. The mobility of dislocations in g - irradiated NaCl crystals. High speed range // FTT. 1971, V. 13, № 2, P. 513 – 519.

[25] I.V. Gectina, F.F. Lavrentiev, V.I. Startsev. Temperature dependence of the viscous drag coefficient of dislocations in zinc crystals // Physics of metals and metallography. 1974, V. 37, №.6, P. 1274 – 1277.

[26] O.I. Datsko. Dislocation internal friction of a material with vacancies in pulses of a weak magnetic field // FTT. 2002, V. 44, № 2, P. 289 – 290.

[27] O.I. Datsko, V.I. Alekseenko, A.L. Brusov. Effect of weak magnetic field pulses on grain-boundary relaxation in aluminum // FTT. 1999, V. 41, № 11, P. 1985 – 1987.

[28] E.V. Darinskaya, A.A. Urusovskaya, A.A. Bespalko, G.I. Gering. Investigation of the dynamics of dislocations during deformation of NaCl crystals by ultrashort irradiation pulses in an electron beam // FTT. 1982, V. 24, № 3, P. 940 – 941.

[29] E.V. Darinskaya, I.P. Makarevich, Yu.I. Meshcheryakov, V.A. Morozov, A.A. Urusovskaya. Study of the mobility of edge dislocations in LiF and NaCl crystals under pulsed electron-beam loading // FTT . 1982, V. 24, № 5, P. 1564 – 1566.

[30] E.V. Darinskaya, A.A. Urusovskaya, V.N. Opekunov, G.A. Abramchuk, V.A. Alekhin. Study of viscous dragging of dislocations in LiF crystals by the mobility of individual dislocations // FTT. 1978, V. 20, № 4, P. 1250 – 1252.

[31] E.V. Darinskaya, A.A. Urusovskaya, V.I. Alshits, V.A. Alekhin, A.A. Shemyakova. Features of deformation under pulsed loading of CsJ crystals and the dynamics of individual dislocations // FTT. 1981, V. 23, № 6, P. 1751 – 1755.

[32] E.V. Darinskaya, A.A. Urusovskaya. Temperature dependence of viscous drag of dislocations in LiF crystals // FTT. 1983, V. 25, № 6, P. 1892 – 1894.

[33] E.V. Darinskaya, A.A. Urusovskaya, V.I. Alshits, Yu.I. Meshcheryakov, V.A. Alekhin, R. Voska. Study of the mobility of “fast” dislocations and the kinetics of impulsive deformation under shock loading of NaCl crystals // FTT. 1983, V. 25, № 12, P. 3636 – 3641.

[34] V.I. Alshits, E.V. Darinskaya, M.V. Koldaeva, R.K. Kotowski, E.A. Petrzhik, P.K. Tronczyk. Experimental studies and computer simulations of magnetoplastic effect // Pol.J.Appl.Sci. 2016, 2, P. 21 – 24.

[35] V.I. Alshits, E.V. Darinskaya, M.V. Koldaeva, R.K. Kotowski, E.A. Petrzhik, P.K. Tronczyk. Dislocation kinetics in nonmagnetic crystals: a look through a magnetic window // Uspekhi Fizicheskikh Nauk, 2017, 60(30, P. 305 – 318.

[36] V.I. Alshits, M.V. Koldaeva, E.A. Petrzhik, A.Yu. Belov, E.V. Darinskaya. Determination of the positions of impurity centres in a dislocation core in a NaCl crystals from magnetoplastisity spectra // JETP Letters, 2014, V. 99, № 2, P. 82 – 88.

[37] V.I. Alshits, E.V. Darinskaya, M.V. Koldaeva, E.A. Petrzhik. Electric stimulation of magnetoplastisity hardening in crystals // JETP Letters, 2008, V. 88, № 7, P. 428 – 434.

[38] V.I. Alshits, E.V. Darinskaya, M.V. Koldaeva, E.A. Petrzhik. Electric amplification of the magnetoplastic effect in nonmagnetic crystals // Journal of applied physics, 2009, 105, P. 1 – 9.

[39] V.I. Alshits, E.V. Darinskaya, M.V. Koldaeva, E.A. Petrzhik. Resonanse magnetoplastisity in ultralow magnetic fields// JETP Letters, 2016, V. 104, № 5, P. 353 – 364.

[40] V.I. Alshits, E.V. Darinskaya, M.V. Koldaeva, E.A. Petrzhik. Anisotropic resonant magnetoplastisity of NaCl crystals in the Earth’s magnetic field// Physics of the solid state, 2013, V. 55, № 2, P. 358 – 366.

[41] V.I. Alshits, E.V. Darinskaya, E.A. Petrzhik. S.A. Erofeeva. On the relation between thermaly activated and magnetically stimulated prosesses during dislocation movement in InSb crystals in a magnetic field // JETP, 2006, V. 102, № 4, P. 646 – 651.

 DOI: 10.33042/2079-424X-2019-1-54-30-39

[42] Yu.I. Golovin. Magnetoplastic effects in solids // Physics of the solid state, 2004, V. 46, № 5, P. 769 – 803.

[43] V.I. Alshits, E.V. Darinskaya, M.V. Koldaeva, S.A. Minyukov, E.A. Petrzhik, V.A. Morozov, V.M. Kats, A.A. Lukin, A.E. Naimi. Resonanse magnetoplastisity in EPR scheme under ultralow magnetic fields // Bulletin of the Russian academy of science, 2014, V. 78, № 10, P. 1041 – 1051.

[44] Mobility and interaction dislocations with impurity in crystals KCL:Ba2+ / S.V. Lybenets, V.I. Startsev // FTT. 1968, T.10, № 1, P..23 – 28.

[45] V. Naundorf, K.Lücke. Mechanisms of Internal Friction in Solids. M.:Nauka, 1976, 91 p.

[46] Yu.F. Boiko, S.V. Lubenets, L.S. Fomenko, N.M. Fedirenko. About study of dynamic properties of dislocations by the shock loading sample method // Izv. Vyzov. Fizika. 1978, № 7, P.129 – 131.

[47] T. Suzuki, A. Ikushima, M. Aoki. Acoustic attenuation studies of the frictional force on a fast moving dislocation // Acta met. 1964, V. 12, № 11, P. 1231 – 1240.

[48] W.P. Mason. Drag of dislocations due to termal losses of the phonon–phonon type // J. Appl. Phys. 1964, V. 35, № 9, P. 2779 – 2781.

[49] W.P. Mason, A. Rosenberg. Phonon and electron drag coefficient in single–crystal aluminiun // Phys. Rev. 1966, V. 151, № 2, P. 434 – 441.

[50] G. Leibfried. Uber den einflus therutins engeregter schallwellen auf die plastische deformation // Zs. Phys. 1950, Vl. 127, № 1, P. 344 – 351.

[51] T. Kaneda. Frictional force on a fast moving dislocation in cooper and its dilute allows // J. of the Phys. Soc. of Japan. 1970, V. 28, № 5, P. 1205 – 1211.

[52] G.A. Alers, D.O. Tompson. Dislocation contribution to the modulus and damping in copper at megacycle frequencies // J. Appl. Phys. 1961, V. 32, № 2, P. 283 – 293.

[53] R.M. Stern, A. Granato. Damped dislocation resonance in copper // Internal friction and defects in metals. M.: "Metallurgiya", 1965, P. 149-191.

[54] W.G. Johnston, J.J. Gilman. Dislocation velocities, dislocation densities and plastic flow in lithium fluoride crystals // J. Appl. Phys. 1959, V. 30, № 2, P. 129 – 144.

[55] N.P. Kobelev, Y.M. Soifer, V.I. Alshits. The relation between viscous and relaxation components of dislocation damping of the high-frequency ultrasound in the copper // FTT. 1979, № 4 (21), p. 1172-1179.

[56] V.I. Alshits, A.M. Petchenko. About temperature dependency of dynamic dislocation drag. Mechanisms of internal frictions in solids, M: " Nauka", 1976, P. 29 –33.

[57] L.A. Yakovlev. Investigation of the frequency and amplitude dependences of the dislocation absorption of ultrasound in aluminum // Acoustic journal. 1965. V. XI, №. 2, P. 239 – 242.

[58] R. Hasiguti, N. Igata, M. Shimotomai. Frictional forces of moving dislocation in iron and iron allow crystals // J. of the Phys. Soc. of Japan. 1968, V. 24, P. 424 – 425.

[59] R.L. Roderick, R. Truell. The measurement of ultrasonic attenuation in solids by the pulse technique and some results in steel // J. Appl. Phys. 1952, V. 23, № 2, P. 267 – 279.

[60] W. Mason, MacDonald. Damping of dislocation in niobium by phonon viscosity // Journ. of Appl. Phys. 1971, V. 42, № 5, P. 1836 – 1842.

[61] P. Pal–Val, V. Platkov, V. Startsev. Temperature dependence of the dislocation drag constant in antimony // Phys. stat. sol. 1976, V. 38, P. 383 – 391.

[62] P.P.Pal–Val, V.Ya. Platkov. Dislocation high-frequency internal friction in bismuth single crystals in the interval 4,2 – 300 K // Fizika Nizkikh Temperatur. 1977, V. 3, № 10, P. 1302 – 1313.

[63] L.G.Merculov. Absorption of ultrasonic waves in some alkali halide crystals // Acoustic journal. 1959, V. 5, №. 4, P. 432 – 439.

[64] L.G.Merculov, L.A. Yakovlev. Ultrasound studies of deformed NaCl crystals // Acoustic journal, 1960, V. 6, № 2, P. 244 – 251.

[65] L.G.Merculov, R.V. Kovalionok, E.V. Konovodchenko. Temperature dependence of the absorption of ultrasonic waves in NaCl crystals // FTT. 1971, V. 13, № 4, P. 1171 – 1177.

[66] E.V. Korovkin, Ya.M. Soifer. The effect of dislocations on the attenuation of ultrasound in NaCl crystals // FTT. 1971, V. 13, №. 12, P. 3709 – 3710.

[67] N.P. Kobelev, Ya.M. Soifer. Viscous drag of dislocations in alkali halide crystals // FTT. 1976, V. 18, №. 4, P. 1073 – 1076.

[68] F. Fanti, J. Holder, A.V. Granato. Viscous drag on dislocation in LiF and NaCl // J. Acoust. Soc. Amer. 1969, V. 45, № 6, P. 1356 – 1366.

[69] A. Hikata, J. Deputat, C. Elbaum. Dislocation interactions with phonons in sodium chloride in the temperature range 77–300 K // Phys. Rev. 1972, V. 6, № 10, P. 4008 – 4013.

[70] A. Hicata, B. Chick, C. Elbaum, R. Truell. Dislocation damping in sodium chloride // Appl. Phys. Let. 1963, V. 2, № 1, P. 5 – 6.

[71] A.V. Granato, J. de Clerk, R. Truell. Dispersion of elastic waves in sodium chloride // Phys. Rev. 1957, V. 108, № 3, P. 895 – 896.

[72] A.M. Petchenko, V.I. Mozgovoi, A.A. Urusovskaya. Viscous drag of dislocations in NaCl single crystals at temperatures 77–300 K // FTT. 1988, V. 30, № 10, P. 2992 – 2995.

[73] V.I. Mozgovoi, A.M. Petchenko, A.F. Sirenko. Investigations of the damping of dislocations of acoustic NaCl crystals by ultrasonic pulsed echo-method // Acoustic journal. 1990, V. 36, №. 1, P. 101 – 105.

[74] A.M. Petchenko. Dispersion of the velocity of longitudinal ultrasonic waves in NaCl crystalls // FTT. 1990, V. 2, № 11, P. 3362 – 3365.

[75] A.M. Petchenko. The effect of strain on the velocity dispersion of elastic waves in sodium chloride // Ukrainian journal of physics. 1990, V. 35, № 9, P. 1385 – 1387.

[76] A.M. Petchenko, D.L. Stroilova, V.I. Mozgovoy. Synthesis and investigation of optical materials. Kharkiv: "Institute of Monocrystals", 1987, P. 133-139.

[77] A.A. Urusovskaya, V.I. Mozgovoi, A.M. Petchenko. Effect of pre-strain rate on stress relaxation in single NaCl crystals // JETP Letters. 1988, V. 14, № 13, P. 1176 – 1178.

[78] A.A. Urusovskaya, A.M. Petchenko, V.I. Mozgovoi. Speed sensitivity of stress relaxation in NaCl single crystals // FTT. 1989, V. 31, № 1, P. 195 – 199.

[79] A.M. Petchenko, V.I. Mozgovoi, A.F. Sirenko, A.A. Urusovskaya. Return of attenuation and ultrasound speed during stress relaxation in sodium chloride single crystals // FTT. 1989, V. 31, № 6, P. 127 – 130.

[80] A.A. Urusovskaya, A.M. Petchenko, V.I. Mozgovoi. The influence of strain rate on stress relaxation // Phys. stat. sol.(a).1991, V. 125, № 1, P. 155 – 160.

[81] H. Koizumi, I. Iwasa, M. Kakumoto, T. Suzuki. Study of dislocations in CsJ by simultaneous measurements of ultrasonic velocity and attenuation // J. Journ. of Appl. Phys. 1986, V. 25, P. 52 – 54.

[82] A.M. Petchenko, D.L. Stroilova, A.A. Urusovskaya. Temperature dependence of the coefficient of damping of dislocations in single CsJ crystals // FTT. 1988. V.30, № 11, P. 3455 – 3460.

[83] A.M. Petchenko, D.L. Stroilova, A.A. Urusovskaya, O.M. Smirnova. Dropping in cesium iodide crystals under various deformation conditions // FTT. 1990. V. 32, № 5, P. 1390 – 1393.

[84] A.M. Petchenko. The study of relaxation processes in CsJ acoustic method // Ukrainian journal of physics. 1990. V. 35, № 12, P. 1834 – 1837.

[85] A.M. Petchenko, D.L. Stroilova. Ultrasonic relaxation at droopimg in CsJ // FTT. 1991, V. 33, № 3, P. 938 – 940.

[86] A.M. Petchenko. Dislocation absorption of ultrasound in elastically deformed CsJ crystals // FTT. 1991, V. 33, № 5, P.1541 – 1544.

[87] A.M. Petchenko. The effect of static loading on the attenuation of ultrasound in CsJ at different temperatures // Ukrainian journal of physics. 1991, V. 36, № 5, P. 770 – 773.

[88] M.A. Krishtal, S.A. Golovin, I.V. Troitskij. Study of the parameters of the dislocation structure of copper by the ultra-sound pulse method // Phys. Metals and Metal science. 1973, V. 35, № 3, P. 632 – 639.

[89] Kh.M.Khalilov, A.I. Agaev. Ultrasound absorption in KCl single crystals in the megahertz frequency range // Izv. AN Azerbajdg. SSR.1966, № 2, P. 82 – 86.

[90] Kh.M.Khalilov, A.I. Agaev. Dislocation absorption of ultrasound in deformed KCl crystals // FTT. 1971, V. 9, № 9, P. 2729 – 2731.

[91] V.M. Andronov, A.M. Petchenko, V.I. Startsev. Temperature dependence of the coefficient of dislocation drag in potassium chloride at temperatures of 77 - 413 K // Acoustic journal. 1975, V. 21, № 4, P. 502 – 507.

[92] V.M. Andronov, A.M. Petchenko. Ultrasound attenuation in deformed single crystals // Acoustic journal. 1976, V. 22, № 1, P. 1 – 4.

[93] A.M. Petchenko. Dislocation with phonon in KCl crystals // Functional Materials. 2000. V. 7, № 1, P. 94 – 97.

[94] O.M. Petchenko, G.O. Petchenko. Phonon drag of dislocations in KCl crystals with various dislocation structure states // Ukrainian journal of physics. 2010, V. 55, №. 6, P. 716 – 721.

[95] G.A. Petchenko, A.M. Petchenko. Influence of elastic stresses and temperature on the dislocation unpinning from the stoppers in KCl crystals // Functional Materials. 2015, № 3, P. 293 – 298.

[96] Petchenko G.A. Thermal activation analysis of the dislocation unpinning from stoppers in KCl crystals / G.A. Petchenko, A.M. Petchenko // Bullrtin of V.N. Karazin National University. 2015, №. 23, P. 28 – 31.

[97] O.M.M. Mitchel. Drag of dislocation in LiF // J. Appl. Phys. 1965, V. 36, № 12, P. 2083 – 2084.

[98] A.M. Petchenko, V.I. Startsev. Temperature dependence of the drag coefficient of dislocations in LiF crystals // FTT. 1974, V. 16, № 12, P. 3655 – 3559.

[99] A.M. Petchenko, A.F. Sirenko. The effect of plastic deformation on the frequency dependence of internal friction in LiF crystals // FTT. 1975, V. 17, № 11, P. 3373 – 3375.

[100] A.M. Petchenko. Interaction of dislocations with phonons in LiF crystals // Crystallography. 1992, V. 37, № 2, P. 458 – 462.

[101] A.M. Petchenko, G.A. Petchenko. Features of ultrasonic absorption in LiF crystals with varying dislocation density // Bullrtin of V.N. Karazin National University. 2009, 865, 12, c.39 – 44.

[102] G.A. Petchenko, A.M. Petchenko. The study of the dislocation resonance in LiF crystals under the influence of the low–dose X–irradiation // Functional Materials. 2010, V. 17, № 4, P. 421 – 424.

[103] G.O. Petchenko. Acoustic studies of the effect of X–ray irradiation on the dynamic drag of dislocations in LiF crystals // Ukrainian journal of physics. 2011, V. 56, № 4, P. 339 – 343.

[104] G.A. Petchenko. Study of dislocation loss of ultrasound in irradiated LiF single crystals in the range of radiation doses 0…400 P // Problems of atomic science and technology. 2012, № 2(78), P. 36 – 39.

[105] G.A. Petchenko. Dynamic damping of dislocations in the irradiated LiF crystals // Functional Materials. – 2012.– V. 19, № 4, P. 473 – 477.

[106] G.A.Petchenko. Study of dynamic and structural characteristics in irradiated LiF crystals // Problems of atomic science and technology. 2013, № 2(84), P.55–59.

[107] G.A. Petchenko. Research of the preliminary deformation and irradiation effect on the viscous damping of dislocation in LiF crystals // Functional Materials. 2013, V. 20, № 3, P. 315 – 320.

[108] G.O. Petchenko, O.M. Petchenko. Research of the elastic wave velocity dispersion in X–ray–irradiated LiF crystals // Ukrainian journal of physics. 2013, V. 58, № 10, P. 974 – 979.

[109] G.O. Petchenko, O.M. Petchenko, S.M.Boiko. The investigation of X–ray irradiation on elastic, dynamical and structural characteristics of strained LiF crystals // Problems of atomic science and technology. 2018, № 2(114), P. 25 – 28.

[110] G.O. Petchenko, O.M. Petchenko, S.M.Boiko. The investigation of X–ray irradiation effect on the mobility of dislocations in LiF crystals // Problems of atomic science and technology. 2018, № 5(117), P. 16 – 20.

[111] V.Ya. Platkov, V.P. Efimenko, V.I. Startsev. Study of some dynamic characteristics of dislocations in potassium bromide crystals by the method of internal friction // FTT. 1967, V. 9, № 10, P. 2799 – 2803.

[112] V.P Matsokin, G.A. Petchenko. Viscous dislocation drag in KBr crystals at 77-300 K // Fizika Nizkikh Temperatur. 2000, V. 26, № 7, P. 705 – 710.

[113] G.A. Petchenko. Phonon damping of dislocations in potassium bromide crystals at different dislocation density values // Functional Materials. 2000, V. 7, № 4(2), P. 785 – 789.

[114] G.A. Petchenko. Study of ultrasound absorption by dislocations in KBr single crystals under low static stresses // Functional Materials. 2001, V. 8, № 3, P. 483 – 487.

[115] A.M. Petchenko, G.A. Petchenko. Features of resonance absorption of longitudinal ultrasound in strained crystals KBr at temperature variations // Functional Materials. 2007, V. 14, № 4, P. 475 – 479.

[116] G.A. Petchenko, A.M. Petchenko. Effect of crystal pre-straining on phonon damping of dislocations // Functional Materials. 2008, V. 15, № 4, P. 481 – 486.

[117] A.M. Petchenko, G.A. Petchenko. The dislocation resonance absorption of ultrasound in KBr crystals at low temperatures // Functional Materials. 2009, V. 16, № 3, P. 253 – 257.

[118] V.M. Chernov. Mobility of dislocations in crystals with centers of pinning // FTT. 1973, V. 15, № 4, P. 1159 – 1166.

[119] G.A. Petchenko, S.S. Ovchinnikov. Effect of the preliminary deformation and irradiation on the optical absorption in LiF crystals // Problems of Atomic Science and Technology. Series “Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science”. 2014, N 2(90), p. 29-33.

[120] G.A. Petchenko, A.M. Petchenko. Dependence of electronic color center concentration on the state of irra-diated LiF crystal dislocation structure // Problems of Atomic Science and Technology. Series “Physics of Ra-diation Effect and Radiation Materials Science”. 2015, N 2(96), p. 25-28.

[121] A. Smakula. Uber Erregung und Entfarbung lichtelektrisch leitender Alkalihalogenide // Z. Physik. 1930, N 9-10 (59), p. 603-614.

[122] A. Smakula, P. Avakiant. Color centers in ce-sium halide single crystals // Phys. Rev. 1960, N 6, p. 2007-2014.

[123] D.L. Dexter. Absorption of light by atoms in solids // Phys. Rev. 1956, N 101, p. 48-55.

[124] V.M. Lisitzyn. Radiation solid state physics. Tomsk: “Izdatelstvo Tomskogo Politekhnicheskogo Universiteta”, 2008, 172 p. (in Russian).

[125] M.V. Galustashvili, M.G. Abramishvili, D.G. Driaev, V.G. Kvachadze. Effect of magnetic field on the radiation hardening LiF crystals // FTT. 2011, N 53(7), p. 1340-1342 .

[126] T. Klempt, S. Schweiser, K. Schwartz, et al. Magnetic resonance unvestigation of the dynamics of F centers in LiF // Solid State Communications. 2001, N 119, p. 453-458.

Analisis of the results obtained by the method of amplitude-independent inter-nal friction on metals and ionic crystals

O.M. Petchenko
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

G.O. Petchenko
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

Abstract - On today's time there are not works that would generalize results got in area of amplitude-independent internal friction. Having regard to the benefit of appearance in literature of review and comparative analysis of results of research of dislocations dynamics by the methods of amplitude-independent internal friction, and estimation of perspective further experimental and theoretical works in the indicated direction for the aim of this work we put it exactly. The analysis of the main results obtained in the field of research of

 DOI: 10.33042/2079-424X-2019-1-54-30-39

the dynamics of dislocations using the method of amplitude-independent internal friction on different objects of study – metals and alkali-halide crystals was carried out. Revealed promising directions for further experimental work on this problematics. It can be stated that perspective directions for further work in this direction on ionic crystals are as follows. Firstly, it is conducting research on the influence of a magnetic field on the localization of frequency spectra of dislocation absorption of ultrasound in crystals. The presence of modern works convincingly indicates the high sensitivity of dislocation kinetics to the degree of magnetic processing of samples. The processing of the given experiment in the framework of the Granato-Lucke theory will allow us to determine the effect of magnetic processing on the dynamic and structural characteristics of the crystals, and the comparison in terms of the Alshits-Indenbom theory of the indicated data with those obtained earlier in the conditions of change in temperature, degree of pre-deformation and X-irradiation of samples will allow us to draw important conclusions about the activation of the process of dislocation motion by a magnetic field. Secondly, it is execution of thermoactivating analysis for unexplored ionic crystals, first of all, NaCl. Debye's low temperature for already studied crystals – CsJ, KBr, KCl allowed to study the processes of detachment at very high temperatures (up to 430 K). The transition to crystals with higher temperatures of the Debye will necessitate the modernization of experimental equipment for operation at higher temperatures. The relevance of further work in the direction of study of the processes of relaxation and dropping in crystals by the method of amplitude-independent internal friction also remains high.

Key words: dynamics of dislocations, amplitude-independent internal friction, frequency spectra of dislocation absorption of ultrasound, pre-deformation, the processes of detachment, Debye temperature, thermoactivating analysis.