

УДК 669.3:539.89: 537.322.11 : 536.424.1

## НОВА ДИСКРЕТНА МОДЕЛЬ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ТВЕРДИХ ТІЛ

Л. Ю. КОЗАК

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу*

Порівняно дислокаційну та нову дискретну модель пластичності. За раніше запропонованої моделі, кристалічна ґратка зі сферично-симетричним потенціалом міжатомної взаємодії є нестійкою у внутрішніх областях кристала до напружень зсуву. Поверхневі шари утримують нестійку кристалічну ґратку, що обумовлює стан нестійкої рівноваги кристала. Особливістю запропонованої моделі є те, що зсув атомних площин у кристалі відбувається за низьких напружень без будь-яких дефектів, у тому числі дислокацій. Наведено переваги запропонованої моделі порівняно з дислокаційною, які отримано з аналізу відомих експериментальних результатів.

**Ключові слова:** кристалічна ґратка, атоми, дислокації, нестійкість, пластичність.

**Вступ.** У матеріалознавстві для пояснення явищ пов'язаних з пластичною деформацією і руйнуванням металів та їх сплавів використовують дислокаційну модель. Вона запропонована Тейлором, Орованам і Полянці ще у 30-х роках минулого століття і сьогодні є загально визнаною. Свого часу дислокаційну модель жорстко критикували, але це не завадило її поширенню і визнанню, оскільки кращої атомної моделі не запропоновано дотепер. На сьогодні теорія дислокацій є основою фізики міцності і пластичності.

Проте упродовж довгого періоду накопичено велику кількість експериментальних результатів та висновків, які все важче пояснити з точки зору теорії дислокацій. Тому запропоновано до розгляду та детально описано нову дискретну модель пластичної деформації [1–5], альтернативну дислокаційній.

В основу цієї моделі закладено уявлення про нестійкість кристалічної ґратки. Відповідно до неї внутрішні області кристала мають ідеальну кристалічну ґратку, що є нестійкою. В такому стані її утримує тонкий поверхневий шар. Такий кристал знаходиться у стані нестійкої рівноваги (СНР) до зсувних деформацій за певними кристалографічними напрямками. Цей стан обумовлений розміщенням атомів у положеннях, які не відповідають їхній мінімальній енергії. Під дією незначного зусилля атоми переміщуються в положення з мінімальною потенціальною енергією (МПЕ). Через це затрати енергії на зсув атомних площин низькі і обумовлені затратами енергії на зсув тільки приповерхневих атомів.

Слід зауважити, що у новій моделі наявність дислокацій у твердих тілах не заперечується. Їх присутність, зародження та переміщення під час пластичної деформації підтверджено експериментально.

Мета роботи – проаналізувати та порівняти запропоновану та дислокаційну модель за використання відомих експериментальних результатів та різних явищ пластичної деформації.

**Порівняння дислокаційної і запропонованої моделі.** Відповідно до запропонованої моделі зсув атомних площин відбувається за низьких напружень без будь-яких дефектів, в тому числі дислокацій [2, 3]. Здатність до пластичної деформації є властивістю кристалічної ґратки, оскільки вона знаходиться у СНР. Ці

положення збігаються з ранніми поглядами на пластичність металів [6–8], коли вважали, що здатність до пластичної деформації є однією з основних властивостей правильної кристалічної ґратки металів, тоді як, згідно з дислокаційною теорією, кристал без дислокацій взагалі не має пластичних властивостей.

Відповідно до дислокаційної моделі вважають, що кристалічна ґратка стійка до зсувних деформацій. Дислокації в кристалі – це атоми біля неповної атомної площини, що зміщені з положень їх рівноваги. Це забезпечує пластичну деформацію кристала під дією відносно невеликих зовнішніх напружень [9]. Отже, дислокація є локальним нестійким утворенням у стійкій ґратці. А це означає, що дислокаційна модель теж базується на уявленнях про нестійкість кристалічної ґратки подібно як і нова дискретна.

Загалом існування зв'язку між пластичністю і нестійкістю відмічено у низці праць [10, 11]. Відповідно до їх поглядів пластичність обумовлена нестійкістю кристалічної ґратки, що виникає за прикладення зовнішньої сили. В кристалі поряд зі структурним станом існуючої ґратки з'являється можливість виникнення іншої. Тому під дією навантаження для атомів ґратки виникають нові ступені свободи, кристал переходить у стан з низькою стійкістю до малих зсувних деформацій. Втрата пружної стійкості сприяє перебудові ґратки кристала, в результаті чого вся система переходить у рівноважний стан [10].

Відмінність такого підходу полягає в тому, що з точки зору цих дослідників, кристалічна ґратка стійка. Після прикладення зусилля утворюється нестійка структура, завдяки чому уможливується пластична деформація. За запропонованою моделлю вважають, що кристалічна ґратка нестійка. В обох випадках пластичність – наслідок переходу нестійкої структури у стійку.

Нестійкість кристалічних ґраток згадується у дослідженнях пов'язаних з комп'ютерним моделюванням кристалів і їх поведінки під навантаженням [12, 13]. Нестійкість також характерна за врахування взаємодії між атомами і їх дальніми сусідами. М. Борн [14] у теоретичних дослідженнях показав, що деякі кристалічні ґратки, в т.ч. типові для металів, є нестійкі за малих зсувних деформацій за деякими кристалографічними напрямками. Він же пропонував використати ці результати для удосконалення теорії міцності.

Тут використано модель нестійкої кристалічної ґратки [1–5] для пояснення низького опору зсуву атомних площин на противагу класичній моделі, за якою напруження зсуву для ідеальної кристалічної ґратки є надзвичайно високим.

**Пластична деформація.** Попри схожість класичної і запропонованої моделей є також суттєві відмінності. У класичній моделі в СНР перебуває локальна область кристала. За використання крайової дислокації можна пояснити лише зсув атомної площини на одну міжатомну відстань. Тому для подальшого зсуву необхідне зародження нових дислокацій. Для цього створені складні механізми – зародження (джерело Франка–Ріда), переповзання дислокацій. А також додаткові моделі дислокацій: гвинтової, двійникової, зернограничної, гелікоїдальної, одичної, часткової, вершинної, призматичної, Ломер–Коттрелла тощо. Двійникування потребує присутності у кожній атомній площині крайової дислокації, оскільки зсув відбувається одночасно за багатьма площинами [15]. Відповідно до запропонованої моделі пластична деформація описана значно простіше. Під дією незначних зсувних деформацій атоми переміщуються в положення з нижчою потенціальною енергією. Зсув атомних площин кристалічної ґратки відбувається без дислокацій в напрямках найбільш заселених атомами, оскільки опір зсуву у цих напрямках відсутній. Залежно від рельєфу потенціальної енергії кристалічної ґратки [16], зсув атомних площин відбувається за механізмами ковзання або двійникування. Під час пластичної деформації реальних кристалів порушується їх будова, спотворюються та викривляються площини ковзання. Внаслідок цього

зсув за старими площинами ковзання припиняється. Нові зсуви відбуваються в напрямках, паралельних першим зсувам, або в інших сприятливих площинах ковзання. Деформація відбувається доки утворюються зсуви у різних напрямках і припиняється за використання всіх вільних для зсувів напрямів. За суттєвої пластичної деформації монокристал подрібнюється на окремі кристалічні утворення і перетворюється на полікристал.

**Експериментальне підтвердження.** Відповідно до класичних поглядів ідеальна кристалічна ґратка має надзвичайно високу міцність. Підтвердженням цього є відомі експериментальні результати для тонких ниткоподібних кристалів – “вусів”. Вважають, що у них відсутні дислокації. Висока міцність “вусів” властива для кристалів малого діаметра,  $< 5 \mu\text{m}$ . З його збільшенням вона знижується і за розмірів  $> 50 \mu\text{m}$  стає співмірною з міцністю звичайних металів [17–21]. За дислокаційною моделлю причиною зниження міцності кристалів зі збільшенням діаметра “вусів” є зростання кількості дислокацій. Також вважають, що мала кількість дислокацій є причиною надзвичайно низької міцності масивних металічних монокристалів високої чистоти і досконалої будови. Деякі дослідники [7, 22–27] припускають, що у таких монокристалах взагалі може бути відсутній опір зсуву.

Водночас існують дослідження, які суперечать поясненням про високу міцність “вусів” через їх ідеальну будову [19, 20]. Так, наприклад, виявили [19], що після деформації мідного “вуса” досягнуто суттєвого зміцнення, що за значенням є близьке до теоретичної міцності. Міцність цього “вуса” перевищувала міцність тонкішого “вуса”, хоча границя плинності товстішого була нижча.

Про надзвичайно високу міцність деформованих мікрокристалів, яка перевищує міцність недеформованих, згадується у праці [20]. Під дією термічного удару стрічкоподібні кристали  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  розбивались на дуже тонкі (завтовшки  $200\text{...}500 \text{ \AA}$ ) двійникові прошарки, утворюючи систему полісинтетичних двійників. Під час механічних досліджень виявили, що ниткоподібні кристали з полісинтетичними двійниками мають найвищу міцність, яка досягає для стрічок січенням  $0,1\text{...}1 \mu\text{m}^2$  до  $15000 \text{ MPa}$ . Міцність недеформованих стрічок такого ж січення –  $5000\text{...}10000 \text{ MPa}$ . Слід також згадати про високу міцність інших ниткоподібних утворень – кристалів суміші металів (Cu–Fe, Cu–Ni, Fe–Co та ін.), які можна назвати так лише умовно, оскільки вони не є монокристалами і мають складну будову. Їх висока міцність обумовлена великою кількістю дефектів і має характер дисперсного зміцнення [20]. Висока міцність характерна також для голчатих трісок, які утворюються під час розколу кристалів. За товщини кілька мікронів їх пружні властивості відповідають ниткоподібним кристалам, але суттєво відрізняються за іншими ознаками. У трісках вибірково травленням встановили дуже високу густину дислокацій (до  $10^9 \text{ cm}^{-3}$ ). Дислокації розміщені вздовж слідів ковзання, що є свідченням того, що тріски пластично деформуються під час утворення [20].

Вищезгадані експериментальні результати не вписуються у сучасні уявлення фізики міцності та пластичності і пояснити їх з точки зору теорії дислокацій проблематично. Відповідно до запропонованої моделі міцність і пластичність монокристалів, які перебувають у СНР, залежать від їх розмірів [3]. Висока міцність “вусів” пояснюється впливом поверхні, а не ідеальною будовою [16]. Тонкий поверхневий шар відрізняється за фізико-механічними властивостями від внутрішніх областей кристала. Він забезпечує міцність кристалів і утримує кристалічну ґратку в нестійкому стані [28–30]. Поверхня “вусів” займає більшу частину загального об’єму порівняно з масивними монокристалами, тому вони міцні. Зі зростанням діаметра зменшується об’єм поверхневих шарів і збільшується об’єм внутрішніх, через це міцність кристалів знижується. А в масивних металічних мо-

нокристалах вплив поверхні взагалі мізерний, тому їх опір зсуву може бути близьким до нуля, про що свідчать результати праць [7, 22–27].

**Вплив зовнішніх чинників на пластичність.** Відповідно до запропонованої моделі СНР є характерним для кристалічної ґратки зі сферично-симетричним потенціалом міжатомної взаємодії [3]. За нормальних умов у такій кристалічній ґратці атоми зближені на відстань меншу рівноважної внаслідок дії внутрішніх сил. Температура і гідростатичний тиск можуть додатково впливати на положення атомів, збільшуючи чи зменшуючи відстань між ними, відповідно змінюється СНР і пластичні властивості металів [4, 5].

**Вплив температури.** З одержаних теоретичних результатів [5] випливає, що через підвищення стійкості кристалічної ґратки в області високих температур, пластичність повинна бути низькою, а за низьких температур – високою. Водночас слід враховувати, що рухливість атомів з підвищенням температури зростає, а зі зменшенням – знижується. За високих температур підсилюється аморфно-дифузійний механізм пластичної деформації. В результаті слід очікувати конкуруючу дію на пластичність цих двох чинників.

Експериментальні результати здебільшого підтверджують висновок про можливе зниження пластичності в області високих температур. Так, у праці [31] йдеться про зниження пластичності з підвищенням температури для багатьох металів, навіть високопластичних. Низка дослідників виявили одну і навіть кілька зон крихкості у діапазоні між кімнатною температурою і температурою плавлення. Наприклад, зростання температури викликає зменшення видовження  $\delta$  і відносного звуження  $\psi$  у міді, нікелю, заліза тощо, що є свідченням зниження пластичності. Так, пластичність міді, у якої за 20°C  $\delta = 32 \dots 62\%$  і  $\psi = 56 \dots 70\%$ , з підвищенням температури поступово знижується до  $\delta = 17 \dots 29\%$  і  $\psi = 17 \dots 30\%$  за температури 500...600°C. Вважають [31], що зниження пластичності за високих температур характерне для всіх металів.

Найкраще підтверджуються теоретичні результати в області низьких температур, коли вплив аморфно-дифузійного механізму пластичності мінімальний. Зі зниженням температури пластична деформація чистих металів і їх сплавів зростає [32, 33] внаслідок підсилення СНР. Так, у типового пластичного свинцю з пониженням температури від 20 до -271,5°C відносне видовження зростає з 26 до 46% [31]. Подібне спостерігали за дослідження монокристалів ртуті з однаковим коефіцієнтом Шміда (0,17). З пониженням температури від -196 до -272°C відносне видовження ртуті зросло з 12 до 89% [31]. Плинність міді і сплавів на її основі спостерігали навіть за температури -269 °C [33]. У багатьох з них границя плинності за температури -269 °C нижча, ніж при -253°C.

Що стосується пояснень впливу температури на пластичність за дислокаційною моделлю, то тут є невідповідність. Згідно з нею, пластичність повинна знижуватися зі зменшенням температури, оскільки сповільнюється рухливість дислокацій. Але це здебільшого суперечить експериментальним результатам. З позицій дислокаційної моделі також важко пояснити зростання пластичності в області низьких температур та зменшення пластичності за високих.

**Вплив високого гідростатичного тиску.** Загалом відомо, що під дією високого гідростатичного тиску (ВГТ) у більшості твердих тіл підвищується пластичність, а крихкі набувають нової властивості – пластично деформуватись [34–36]. ВГТ додатково зближує атоми кристалічної ґратки, підсилюючи СНР, що сприяє підвищенню пластичності [4]. У непластичних матеріалах, у яких кристалічна ґратка стійка, дія ВГТ також викликає зближення атомів, в результаті чого ґратка переходить у СНР. Непластичні тверді тіла перетворюються у пластичні.

Отже, ВГТ є дестабілізуючим чинником, за дії якого кристалічна ґратка незалежно від форми потенціалу міжатомної взаємодії переходить у СНР. Цей висновок має експериментальне підтвердження, оскільки відомо, що під впливом ВГТ всі тверді тіла стають пластичними [34–36]. За тисків ~1500...2500 МПа сталь стає настільки пластичною, що її відносне звуження досягає 99%, відносне звуження броньованої сталі (НВ 234) дорівнює 58%, сірого чавуну – ~30%, кам'яної солі – 20%, для мармуру пластичне видовження ~25% [35].

Таким чином, температура та гідростатичний тиск мають подібний вплив на перехід у СНР кристалічної ґратки. В обох випадках зменшення відстані між атомами сприяє підвищенню пластичності.

Відповідно до сучасних поглядів фізики міцності і пластичності ВГТ впливає на поведінку дислокацій під час пластичної деформації [36]. Підвищення пластичності пов'язано з їх посиленням, розмноженням, переповзанням та анігіляцією. ВГТ, збільшуючи взаємодію між дислокаціями, має істотний вплив на динаміку дислокацій. Це пояснює певною мірою підвищення пластичності для пластичних матеріалів. Але зовсім не пояснює стрибкоподібний перехід непластичних тіл у пластичні.

**Тип хімічного зв'язку і пластичність.** Відповідно до сучасних поглядів фізики міцності і пластичності основну роль у формуванні механічних властивостей твердих тіл – міцності і пластичності – відіграють дефекти кристалічної ґратки, а саме дислокації. Міцність і пластичність вважають залежними від структури твердих тіл і мало пов'язують ці характеристики з їх електронною будовою (типом хімічного зв'язку). Насправді ж схильність тих чи інших тіл пластично деформуватися залежить не тільки від структури, але й від типу хімічного зв'язку. Пластичність характерніша для матеріалів з металевим типом зв'язку, водночас матеріали з іншими типами зв'язку низькопластичні і крихкі.

Загалом тип зв'язку є основним чинником, який визначає пластичність твердих тіл, структурний є другорядним. Так, дислокації присутні в іонних, ковалентних і металевих кристалах, однак тільки для металів характерна висока пластичність.

Спроби пояснити пластичність твердих тіл, зважаючи на їх електронну структуру, робилися раніше. У праці [37] на основі розгляду енергетичних рівнів атомів у твердому тілі, зробили висновок, що локалізація електронів в атомно-мікроскопічному масштабі повинна призводити до підвищення міцності, делокалізація – до підвищення пластичності. У металах можливе співіснування областей з високим ступенем делокалізації валентних електронів (області правильної будови кристалічної ґратки), для яких характерний металічний зв'язок, і областей, де валентні електрони локалізованіші (дефектні області матеріалу), для яких характерний ковалентний зв'язок [38].

Пластичність (нестійкість кристалічної ґратки) залежить від форми потенціалу міжатомної взаємодії, а отже, від електронної структури твердих тіл. У разі сферично-симетричного потенціалу, який характерний для тіл з металевим типом зв'язку [1], міжатомна відстань у кристалічній ґратці менша рівноважної (ґратка стискається), внаслідок чого вона переходить у СНР. Через додаткове зближення атомів відбувається перекриття зони валентних електронів зі зоною провідності, що є причиною високої електропровідності. Про зближення атомів металів до відстані меншої за рівноважну згадується у працях [39–41].

Слід зауважити, що всі тверді тіла під дією ВГТ стають пластичними та електропровідними. Причина така ж, як для металів – додаткове зближення атомів.

Нова модель дає можливість пояснити зв'язок пластичності і електропровідності, який свого часу безуспішно намагався пояснити Я. І. Френкель. Він зауважив, що метали, особливо монокристалічні, до їх механічної обробки є дуже пластичними і електропровідними, водночас як діелектрики неелектропровідні і крих-

кі, особливо за низьких температур. Тому він зробив висновок, що висока пластичність металів пов'язана з наявністю у них колективізованих електронів, але природа і походження цього зв'язку для нього була незрозуміла [7].

За дислокаційною моделлю цей факт пояснити неможливо. Що стосується запропонованої моделі, то існування зв'язку між зовсім різними явищами – пластичністю та електропровідністю – обумовлено додатковим зближенням атомів. Однак природа цих явищ різна. Електропровідність є наслідком перекриття зони валентних електронів зі зоною провідності, а пластичність – переходу атомів у положення, де їх потенціальна енергія не є мінімальною (перехід у СНР).

Розуміння зв'язку пластичності та електропровідності дає змогу пояснити аномальну, з точки зору сучасних поглядів, пластичність неметалічних кристалів. Тверді тіла з іонним міжатомним хімічним зв'язком вважають крихкими, а ось хлорид срібла є досить пластичний. За кімнатної температури брусок хлориду срібла можна розплекати у тонку пластину [42]. Відповідно до результатів [43] монокристали фториду літію і германію теж пластично деформуються за нормальних умов. Пластичність цих неметалічних тіл викликана тим, що кристалічна ґратка перебуває у СНР внаслідок вкороченої міжатомної відстані. Однак через слабкість сил міжатомної взаємодії це зближення є недостатнім для перекриття зони валентних електронів зі зоною провідності і тому вони не електропровідні. А недостатнє зближення атомів ґратки є наслідком суттєво нижчої їх пластичності порівняно з металами.

**Поліморфні перетворення і надпластичність.** У багатьох металах та їх сплавах існують поліморфні перетворення. Раніше показано, що причиною поліморфного перетворення, як і пластичної деформації, є перехід кристалічної ґратки у СНР [5]. Якщо до кристалічної ґратки за близької до поліморфного перетворення температури прикласти незначні зовнішні напруження, то це спричинить суттєву пластичну деформацію. Це явище відоме як трансформаційна надпластичність [44, 45]. Вважають [44], що ефект надпластичності виникає внаслідок переходу сплаву з метастабільного стану у стабільний. Його спостерігають у різних матеріалах під час фазових переходів першого роду. Перетворення однієї модифікації в іншу відбувається за напружень і температур, близьких до фазової рівноваги. У цьому випадку перебудовується кристалічна ґратка, що пов'язано зі зміною характеру сил міжатомної взаємодії. Загалом пластичну деформацію слід розглядати як різновид поліморфного перетворення [5].

## **ВИСНОВКИ**

Запропонована модель порівняно з дислокаційною дає змогу по-новому і значно простіше пояснити пластичну деформацію, а саме: низький опір зсуву у масивних металічних монокристалах; залежність опору зсуву у мікрочисталах (“вусах”) від їх поперечного розміру; причини високої пластичності металів і низької пластичності твердих тіл з ковалентними та іонним типом хімічного зв'язку (незважаючи на дислокації у них); вибіркковість кристалографічних напрямів зсуву атомних площин; феномен перетворення непластичних крихких матеріалів у пластичні під дією ВГТ; причини існування областей зниження пластичності у металах і їх сплавах в деякому діапазоні високих температур; аномальне, з точки зору дислокаційної моделі, зниження пластичності металів та їх сплавів зі зменшенням температури в області мінусових температур; причини існування зв'язку між різними явищами – пластичністю і електропровідністю; аномальну пластичність деяких неметалічних кристалів (хлористого срібла). Крім цього, запропонована гіпотеза пов'язує пояснення природи пластичності, що базується на впливі дефектів кристалічної ґратки (структурного чинника) з поясненням пластичності з точки зору електронної конфігурації твердих тіл та типу хімічного зв'язку.

**РЕЗЮМЕ.** Сравнено дислокационную и новую дискретную модель пластичности. Согласно ранее предложенной модели, кристаллическая решетка со сферически-симметричным потенциалом межатомного взаимодействия является неустойчивой во внутренних областях кристалла к малым сдвиговым деформациям. Поверхностные слои удерживают неустойчивую кристаллическую решетку, поэтому кристалл находится в состоянии неустойчивого равновесия. Особенностью предложенной модели является то, что смещение атомных плоскостей в кристалле происходит при низких напряжениях без каких-либо дефектов, в том числе дислокаций. Приведены преимущества предложенной модели по сравнению с дислокационной, полученные из анализа известных экспериментальных данных.

**Ключові слова:** кристаллическая решетка, атомы, дислокации, неустойчивость, пластичность.

**SUMMARY.** A comparison of the dislocation model and the new discrete model of plasticity is presented. In accordance with previously proposed model the crystal lattice of the spherically symmetric potential of interatomic interaction is unstable in the inner regions of the crystal relatively to small shear deformations. The surface layers support an unstable crystal lattice, because of this the crystal is in unstable equilibrium specific. A feature of the proposed model is that the shift of atomic planes in the crystal occurs at low stresses in the without any defects including dislocations. The dislocation and proposed models are compared using the explanations of a large number of known experimental data. The advantages of the new discrete model compared with the dislocation one are proposed.

**Keywords:** crystal lattice, atom, dislocations, unstable, plasticity.

1. Козак Л. Ю. Пластичность и неустойчивость кристаллической решётки // Металлофизика и новейшие технологии. – 2012. – **34**, № 5. – С. 1529–1545.
2. Kozak L. New atomic model of metals plastic deformation // ASCIT J. of Materials. – 2017. – **3**, № 5. – P. 26–32. <http://www.aascit.org/journal/archive?journalId=974&issueId=9740305>
3. Козак Л. Ю. Дослідження нестійкості кристалічної ґратки на дискретних моделях // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – **53**, № 3. – С. 118–123.  
(Kozak L. Y. Investigation of the instability of crystal lattices by using discrete models // Materials Science. – 2017. – **53**, № 3. – P. 424–430. <https://doi.org/10.1007/s11003-017-0091-x>)
4. Козак Л. Ю. Дискретні моделі пластичної деформації твердих тіл під впливом високого гідростатичного тиску // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – **52**, № 1. – С. 98–101.  
(Kozak L. Yu. Discrete models of plastic deformation of solids under the action of high hydrostatic pressure // Materials Science. – 2016. – **52**, № 1. – P. 108–112.)
5. Козак Л. Ю. Дискретні моделі мартенситного перетворення та двійникування в металах // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – **48**, № 5. – С. 83–87.  
(Kozak L. Yu. Discrete models of martensitic transformation and twinning in metals // Materials Science. – 2013. – **48**, № 5. – P. 647–652. <https://doi.org/10.1007/s11003-013-9550-1>)
6. Классен-Неклюдова М. В., Конторова Т. А. По поводу дислокационной гипотезы пластичности // Успехи физических наук. – 1954. – **11**, № 1. – С. 143–151.
7. Френкель Я. И. Введение в теорию металлов. – Ленинград: Наука, 1972. – 424 с.
8. Степанов А. В. О дислокационных теориях прочности и пластичности твердых тел // Журн. техн. физики. – 1953. – **23**, № 7. – С. 1212–1218.
9. Білоус М. В., Браун М. П. Физика металлов. – К.: Вищ. шк., 1986. – 344 с.
10. Панин В. Е. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. – Новосибирск: Наука, 1990. – 256 с.
11. Засимчук В. И., Засимчук Е. Э., Гордиенко Ю. Г. Возможный механизм образования зародышей каналов гидродинамического пластического течения в кристаллах // Металлофиз. новейшие технол. – 2014. – **36**, № 4. – С. 445–459.
12. Иванова Е. А. Механические свойства кристаллических решеток и нанокристаллов. – Режим доступа до ресурсу: [http://www.ipme.ru/ipme/labs/dms/prive/ivanova/Home\\_page\\_Elena\\_Ivanova/Crystal%20lattices%20RUS.htm](http://www.ipme.ru/ipme/labs/dms/prive/ivanova/Home_page_Elena_Ivanova/Crystal%20lattices%20RUS.htm)
13. Esbjorn P. O. and Jensen E. J. Computer studies of dislocation properties using two-dimensional model systems // J. Phys. Chem. Solids. – 1976. – **37**, № 4. – P. 1081–1091.
14. Born M. On the stability of crystal lattices // Proc. Camb. Phil. Soc. – 1940. – **36**, № 2. – P. 160–172. doi: <https://doi.org/10.1017/S0305004100017138>

15. Новиков И. И. Дефекты кристаллического строения металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 208 с.
16. Козак Л. Ю. Пластичність металів і нестійкість кристалічної ґратки. – Ів.-Франківськ: Факел, 2004. – 146 с.
17. Wojarski Z., Wokulski Z. Badania wiskerow zelaza w statycznej probie rozciagania // Arch. hutn. – 1980. – 3, № 1. – P. 3–26.
18. Гольдштейн М. И., Литвинов В. С., Бронфин В. Н. Металлофизика высокопрочных сплавов. – М.: Металлургия, 1986. – 390 с.
19. Особенности упрочнения металлических и неметаллических нитевидных монокристаллов / С. З. Бокштейн, С. Т. Кишкин, М. П. Назарова, И. Л. Светлов // Физика деформационного упрочнения монокристаллов. – К.: Наук. думка, 1972. – С. 201–212.
20. Бережкова Г. В. Нитевидные кристаллы. – М.: Наука, 1969. – 158 с.
21. Беликов А. М. Пластическая деформация нитевидных кристаллов. – Воронеж: Изд-во Воронежск. гос. ун-та, 1991. – 286 с.
22. Лихтман В. И., Ребиндер П. А., Карпенко Г. В. Влияние поверхностно-активной среды на процессы деформации металлов. – М.: Из-во АН СССР, 1954. – 208 с.
23. Миркин Л. И. Физические основы прочности и пластичности. – М.: Московск. гос. ун-т, 1968. – 538 с.
24. Шмидт Е., Боас В. Пластичность кристаллов в особенности металлических. – М.; Л.: Изд-во иностр. лит., 1938. – 316 с.
25. Брэгг У. Г., Брегг У. Л. Кристаллические состояние. – М.: НТИ СССР, 1938. – 336 с.
26. Gough H. J., Hanson D., and Wright S. J. The behaviour of single crystals of aluminium under static and repeated stresses // Philos. Transact. Royal Soc. – 1927. – 226. – P. 1–30.
27. Набарро Ф. Р. Н., Базинский З. С., Холт Д. Б. Пластичность чистых монокристаллов. – М.: Металлургия, 1967. – 214 с.
28. Черепанов Г. П. К общей теории разрушения // Физ.-хим. механика материалов. – 1986. – 22, № 1. – С. 36–44.
29. Алехин В. П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. – М.: Наука, 1983. – 280 с.
30. Васильев М. А. Структура и динамика поверхности переходных металлов. – К.: Наук. думка, 1988. – 280 с.
31. Бобылев А. В. Механические и технологические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1980. – 296 с.
32. Старцев В. И., Ильичев И. Я., Пустовалов В. И. Прочность и пластичность металлов и сплавов при низких температурах. – М.: Металлургия, 1975. – 328 с.
33. Вигли Д. А. Механические свойства материалов при низких температурах. – М.: Мир, 1974. – 376 с.
34. Тонков Е. Ю. Фазовые диаграммы элементов при высоком давлении. – М.: Наука, 1979. – 192 с.
35. Карпенко Г. В. Про фізико-хімічну механіку металів. – К.: Наук. думка, 1973. – 176 с.
36. Малыгин Г. А. Влияние гидростатического давления на аннигиляцию винтовых дислокаций поперечным скольжением в щелочно-галлоидных кристаллах // Физика твердого тела. – 1992. – 34, № 10. – С. 3002–3010.
37. Самсонов Г. В., Прядко И. Ф., Прядко Л. Ф. Конфигурационная модель вещества. – К.: Наук. думка, 1975. – 316 с.
38. Архаров Б. И., Скрипка Ю. Г., Мархасин Е. С. О значении механизма формирования межатомных связей в сплавах для их прочностных и пластических свойств // Физ.-хим. механика материалов. – 1978. – 14, № 2. – С. 47–50.
39. Фізика металів / Я. Й. Дутчак, Д. М. Фреїк, В. М. Чобанюк, М. О. Галушак. – К.: НМК ВО, 1993. – 162 с.
40. Пирсон У. Кристаллохимия и физика металлов и сплавов. – М.: Мир, 1970. – 420 с.
41. Кан Р. Физическое металловедение. – М.: Мир, 1977. – 624 с.
42. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. – М.: Наука, 1978. – 792 с.
43. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. – М.: Мир, 1972. – 408 с.
44. Тихонов А. С. Эффект сверхпластичности металлов и сплавов. – М.: Наука, 1972. – 142 с.
45. Кайбышев О. А. Сверхпластичность промышленных сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – 264 с.

Одержано 14.09.2018