

Л.Ю. Козак

Природа пластичності металів

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти й газу,
76000, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15
тел. (03722)42351, E-mail: kozakl@ifdung.if.ua*

У статті викладені нові погляди на природу пластичності металів, в основу яких закладено ідеї нестійкості. На двовимірній моделі було показано, що кристалічна ґратка зі сферично симетричним потенціалом міжатомної взаємодії є нестійкою. У такій кристалічній ґратці між атомами і їх найближчими сусідами діють сили відштовхування, які зрівноважуються силами притягання, що діють між атомами і їх дальніми сусідами. Внаслідок нестійкості при дії зовнішніх зусиль атоми ґратки переміщуються у нові, більш стійкі, положення, у результаті чого відбувається пластична деформація.

Ключові слова: двовимірна модель, пластична деформація, сферично симетричний потенціал, міжатомна взаємодія, кристалічна ґратка, нестійкість.

Стаття постуила до редакції 05.05.2004; прийнята до друку 30.08.2004.

I. Вступ

У сучасному матеріалознавстві вважається, що основну роль у формуванні механічних властивостей твердих тіл - міцності і пластичності відіграють дефекти кристалічної ґратки. Міцність і пластичність вважають залежною 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. Зі всіх кристалічних тіл найбільш пластичними є метали. У той же час, більшість кристалічних тіл з ковалентним та іонним зв'язками є непластичними.

Кардинальна зміна механічних властивостей твердих тіл відбувається при поліморфних переходах, що пов'язано з впливом зовнішніх чинників таких як температура і тиск. Зміна зовнішніх чинників викликає як кількісні, так і якісні зміни в електронній структурі твердих тіл. Внаслідок цього можуть відбуватися перетворення, що супроводжуються перебудовою кристалічної ґратки і зміною типу хімічного зв'язку. Так, наприклад, олово при температурі $-13,3^{\circ}\text{C}$ має поліморфне α - β перетворення зі зміною металічного зв'язку у ковалентний, при цьому олово з пластичного перетворюється у крихке. А класичний напівпровідник, яким є германій, при тиску 1500 МПа і кімнатній температурі стає звичайним металом, у результаті чого підвищується його пластичність і електропровідність. Взаємозв'язок між

електронною структурою та механічними властивостями твердих тіл особливо чітко простежується у взаємозв'язку електропровідності і пластичності. Про існування такого зв'язку, свого часу, ще висловився Френкель: "Метали, в особливості монокристалічні, до їх механічної обробки (тобто наклепу) є найбільш пластичними поміж всіма тілами; якщо з електричної точки зору вони відрізняються від діелектриків своєю електропровідністю (при низьких температурах), то з точки зору своїх механічних властивостей вони настільки ж сильно відрізняються від діелектриків (які стають особливо крихкими при низьких температурах) саме своєю пластичністю. Ці обставини безсумнівно вказують на те, що висока пластичність металів пов'язана з наявністю у них колективізованих електронів. Однак природа і походження цієї кореляції залишається незрозумілими."

Слід зауважити, що вивчення природи взаємозв'язку між електронною структурою та механічними властивостями твердих тіл залишилось актуальним по сьогоднішній день.

II. Електронна структура твердих тіл та їх механічні властивості

Зв'язок електронної структури твердих тіл з їх механічними властивостями – міцністю і пластичністю розглянуто у конфігураційній моделі речовин, яка створена академіком Самсоновим зі співробітниками[1,2]. Відповідно цієї моделі

вважається, що у конденсованому стані речовин можливо співіснування двох підсистем валентних електронів – частково локалізованих і колективізованих, що визначає міцність і пластичність речовин. Академік Архаров з співробітниками [3] на основі цієї моделі прийшли до висновку, що у металах можливе співіснування областей з високим ступенем делокалізації валентних електронів (області правильної будови кристалічної ґратки), для яких характерним є металічний зв'язок, і областей, де валентні електрони більш локалізовані (дефектні області матеріалу), для яких характерний ковалентний зв'язок. Відповідно у металі є області більш пластичні і менш пластичні.

Отже пластичність твердих тіл залежить не тільки від структури твердих тіл, але і від їх електронної структури, тобто від типу хімічного зв'язку. Пластичність найбільш характерна для речовин з металевим типом зв'язку, у той час як речовини з іншими типами зв'язку мало пластичні і крихкі. При цьому потрібно зазначити, що тип зв'язку є основним чинником, що визначає пластичність твердих тіл, у той час як структурний чинник є другорядним. Так, дислокації присутні в іонних, ковалентних і металевих кристалах, однак тільки для металів характерна висока пластичність.

Зі всіх кристалічних тіл найбільш пластичними є метали. Одночасно вони є найкращими провідниками електричного струму. З іншої сторони відомо, що всі тверді тіла стають електропровідними і пластичними при впливі високого гідростатичного тиску, внаслідок дії якого у твердих тілах додатково зближаються атоми. Додаткове зближення атомів при впливі зовнішніх сил (гідростатичного тиску) є основною причиною перетворення твердих тіл у пластичні і електропровідні, тобто у них виникає металічний зв'язок. У відсутність зовнішніх сил вони втрачають ці властивості. Оскільки пластичність і електропровідність є характерними властивостями для металів при нормальних умовах, то, можливо, їх атоми додатково зближені внаслідок специфічної їх взаємодії. Все це дає підстави для припущення, що у металах існують внутрішні сили, які сприяють додатковому зближенню атомів, у результаті

виникають ті характерні властивості, які інші речовини набувають в умовах високого гідростатичного тиску.

III. Нестійка кристалічна ґратка

Раніше [4-6] було показано, що у випадку двовимірної ґратки, у якій міжатомна взаємодія описується сферично симетричним потенціалом, а сили взаємодії поширюються на перших та других сусідів атома, спостерігається вкорочення міжатомної відстані. Розглянемо це детальніше (рис. 1). Якщо атом має сферично симетричний потенціал, то неможливо розмістити одночасно атоми і їх перших та других сусідів на рівноважній відстані r_0 . Якщо розмістити атом на відстані r_0 від перших сусідів, то другі сусіди розмістяться на відстані $r_2 = \sqrt{2}r_0$, у цьому випадку виникнуть сили притягання. Тому єдино можливе розміщення є таким, коли перші сусіди атомів розміщені на відстані r_1 , яка є меншою за рівноважну відстань r_0 , тобто атоми у такій кристалічній ґратці дещо зближені (укорочена міжатомна відстань порівняно з рівноважною r_0). У цьому разі сили притягання F_1 між атомом і другими його сусідами врівноважуються силами відштовхування F_2 між атомом і першими сусідами. У разі трьохмірної ґратки, цей ефект також буде мати місце а, внаслідок більшої кількості других сусідів атома, укорочення міжатомної відстані буде більшим. Про додаткове зміщення атомів у металах йшла мова у роботах [7-9], ще до того як про це висловився автор [6]. Що стосується класичної наукової літератури, то ефект стиснення кристалічної ґратки не згадується.

Дослідження двовимірної кристалічної ґратки з квадратною коміркою показали (рис. 2) [10], що внаслідок додаткового стиску вона є нестійкою за деякими кристалографічними напрямками. Про це свідчать дані одержані при розрахунку зміни енергії взаємодії атомів при зсуві їх у атомних площинах (рис. 3). При зсуві атомних площин в напрямі [100] потенціальна енергія атомів зменшується (крива 1, рис. 3) і зростає у разі їх зсуву у напрямі [110] (крива

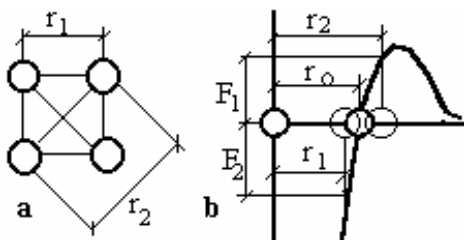


Рис. 1. Сили атомної взаємодії **b** у комірку кристала **a** у залежності від міжатомної відстані. $r_1 < r_0 < r_2$

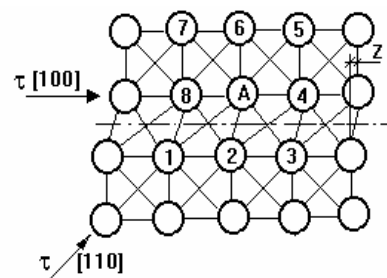


Рис. 2. Зсув атомної площини.

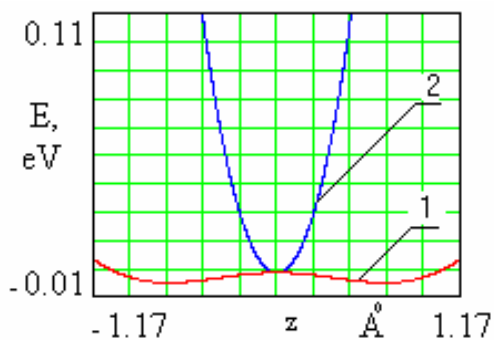


Рис. 3. Залежність зміни потенціальної енергії атома 1 від зсуву z атомних площин у напрямі $[100]$ – 1, і у $[110]$ – 2.

2). Зниження потенціальної енергії атомів при зсуві атомної площини в напрямі $[100]$ є свідченням достійкості кристалічної ґратки.

Про нестійкість кристалічної ґратки згадувалось раніше. Так М. Борн у своїх теоретичних дослідженнях показав, що деякі кристалічні ґратки, типові для металів, нестійкі по деяким кристалографічним напрямам при дії малих зсувних деформацій [11,12]. Він же запропонував використати ці результати для удосконалення теорії міцності.

Але, незрозуміло чому, нестійкість кристалічних ґраток не була використана для пояснення низького опору зсуву атомних площин, що спостерігається при деформації масивних металевих монокристалів високої чистоти і досконалої будови, міцність яких є нижчою на 2-3 порядки у порівнянні з міцністю технічних металів та їх сплавів [13-16]. Висновки щодо межі текучості, до яких свого часу прийшли досить відомі матеріалознавці [13-16], можна узагальнити однією фразою [16] с. 191: “Кристал починає текти під впливом на стільки малої сили, що ще до теперішнього часу залишається відкритим питання, чи існує у випадку ідеального кристалу чистого металу яка-небудь межа пружного розтягу.”

Таким чином, одержані теоретичні результати низького опору зсуву у двовимірній кристалічній ґратці співпадають з результатами експериментальних досліджень і висновками інших дослідників, що стосуються металічних монокристалів досконалої будови і високої чистоти. Все це є підтвердженням правильності припущенням про вкорочення міжатомної відстані в металах, внаслідок чого їх кристалічна ґратка є нестійкою і опір зсуву атомних площин у ідеальній кристалічній ґратці відсутній або дуже низький.

З вищезгаданого можна зробити також висновок, що зв'язок пластичності і електропровідності, про який свідчить велика кількість експериментальних даних, не є випадковим. Існування зв'язку між зовсім різними явищами – пластичністю і електропровідністю зумовлено додатковим зближенням атомів. Однак, природа цих явищ різна. Електропровідність є наслідком перекриття зони

валентних електронів із зоною провідності, а пластичність – наслідком утворення нестійкої ґратки.

IV. Міцність і пластичність ідеальної кристалічної ґратки твердих тіл

Відомо, що електронна структура твердих тіл і безпосередньо характер розподілу електронної густини валентних електронів визначає геометрію потенціалу міжатомної взаємодії. Стан ґратки визначається геометрією потенціалу міжатомної взаємодії і електронною структурою твердих тіл. Загалом, потрібно розглядати два випадки, що визначають характер розподілу електронної густини валентних електронів [17]. Перший (розглядається у статті), це коли розподіл електронної густини є сферично симетричним, тобто ізотропним, тоді сила взаємодії F є функцією відстані $F = f(r)$ і зв'язки є ненаправленими. Це випадок, коли ґратка нестійка (металевий зв'язок). Другий випадок, коли розподіл електронної густини валентних електронів анізотропний (у сферичних координатах $F = f(r, \varphi, \theta)$). Тоді зв'язки мають направлений характер – ґратка стійка (ковалентний зв'язок та ін.). У першому випадку нестійкість ґратки обумовлює низьку міцність і високу пластичність металів, у другому – стійка ґратка твердих тіл з ковалентним зв'язком обумовлює їх високу міцність і низьку пластичність.

Пластична деформація – це одночасне зміщення атомів у нестійкій ідеальній кристалічній ґратці з положення нестійкої рівноваги у положення стійкої рівноваги. Зміщення атомних площин відбувається у кристалографічних напрямках найбільш заселених атомами, при цьому опір зсуву атомних площин відсутній, або незначний. Існування у технічних металах та їх сплавах дефектів (поверхневих шарів, границь блоків і зерен, дислокацій, вакансій і т.і.) підвищує опір зсуву атомних площин, що забезпечує їм міцність.

Отже, тип хімічного зв'язку є основним чинником, який визначає пластичність і міцність ідеальної кристалічної ґратки. Що стосується структурного чинника, то він визначає пластичність і міцність реальних твердих тіл, будова яких через присутність різного роду дефектів, далека від будови ідеальної кристалічної ґратки.

V. Міцність і пластичність твердих тіл

Відповідно існуючим поглядам фізики міцності і пластичності, для зсуву атомних площин в ідеальній кристалічній ґратці твердих тіл необхідні високі напруження. Це означає, що ідеальна кристалічна ґратка є стійкою до зсувних деформацій. Для обґрунтування цього твердження використовується відома розрахункова схема (рис. 4). Згідно цієї схеми розрахункове напруження зсуву атомної площини є дуже високим [17]. А підставою для цього

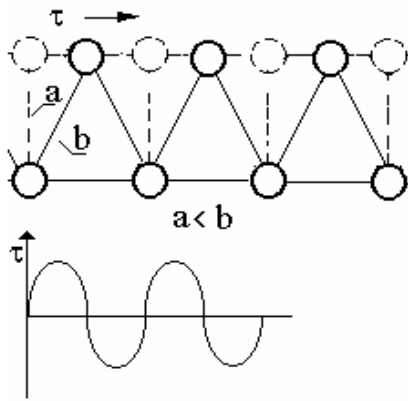


Рис. 4. Класична розрахункова схема зсуву атомної площини

твердження є те, що більшість матеріалів має високі значення модулів¹ зсуву і для досягнення деформації, яка рівна половині міжатомної відстані, необхідні високі напруження.

Але такий підхід не є зовсім коректним, оскільки у класичній моделі враховують лише сили взаємодії між атомами та їх першими сусідами і не враховують сили взаємодії атомів і їх наступних сусідів, а також – тип і геометрію потенціалу міжатомної взаємодії.

Через недосконалість класичної моделі теоретично розрахована міцність значно перевищує реальне значення міцності металів і їх сплавів. Для пояснення невідповідності теоретичних розрахунків міцності (межі текучості) ідеальної кристалічної ґратки з експериментальними даними була створена дислокаційна модель. Відповідно до цієї моделі напруження зсуву атомних площин в ідеальній кристалічній ґратці значно знижується у присутність в ній незначної кількості дислокацій. Разом з тим зростання кількості дислокацій викликає підвищення опору зсуву атомних площин.

Пояснення явища пластичності з позиції теорії дислокацій є складним і важко зрозумілим. Лінійна дислокація дає змогу пояснити лише один елементарний акт пластичної деформації - зсув атомної площини на одну міжатомну відстань. Для повного пояснення процесу пластичної деформації використовуються складні моделі лінійної, гвинтової, двійникуючої, зерно граничної, гелікоїдальної, одиничної, часткової, Ломер-Коттрелла дислокацій, дисклінацій та ін., а також різного роду механізми: зародження (джерело Франка-Ріда), анігіляції, переповзання дислокацій, консервативного та неконсервативного руху, сили опору переміщення дислокацій - сили Пайерлса і т. ін.

Але складність дислокаційної теорії не є її основним недоліком. Існують проблеми з поясненням деяких експериментальних даних. Так, підтвердженням високої міцності металів з ідеальною будовою кристалічної ґратки є експериментальні дані по дослідженню дуже тонких ниткоподібних кристалів - «вусів» (рис. 5). Їх міцність на один-два порядки перевищує міцність технічних металів та їх сплавів [18,19]. Особливо висока міцність властива дуже тонким (біля 1-5 мкм) кристалам. Вважається, що їх висока міцність обумовлена ідеальною будовою кристалічної ґратки. Цей широко відомий факт вважається основним експериментальним підтвердженням високої міцності (межі текучості) ідеальної кристалічної ґратки металів і його можна розглядати як основне заперечення запропонованої гіпотези.

Але, чи можна мікромонокрystals («вуса») вважати кристалами ідеальної будови? Згадаймо, «вуса» мають поверхню, структура якої не відповідає внутрішній структурі масивних монокристалів. Будова поверхні відрізняється від будови ідеальної кристалічної ґратки [20-25]. Ідеальною може бути будова кристалічної ґратки у кристалів безмежних розмірів. Тонкі «вуса» не можна вважати більш ідеальними кристалами ніж товсті, оскільки поверхня у перших складає більшу частину у загальному їх

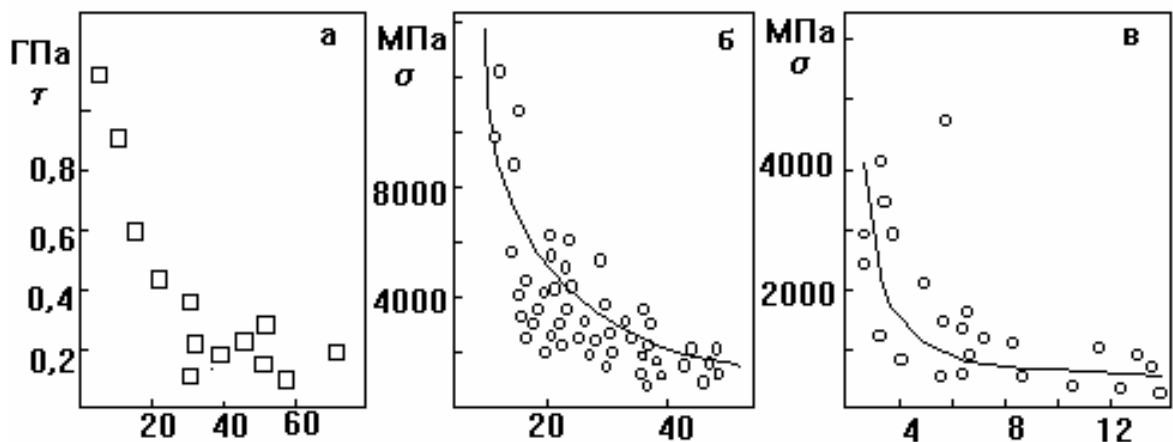


Рис. 5. Напруження зсуву (а) [18] і межа текучості (б, в) [19] у залежності від розміру кристалів; а, б – сталь; в – мідь.

¹ Характеристика матеріалу, яка також залежить від величини сил міжатомної взаємодії.

об'ємі ніж у других. Через надзвичайно малі розміри тонких «вусів» на їх міцність значний вплив має поверхня.

Отже, якщо на міцність «вусів» має вплив поверхня, то при збільшенні діаметра вусів повинна зменшуватися їх межа пружності, що і підтверджується експериментальними даними (див. рис. 5). При збільшенні поперечного розміру «вусів», їх міцність (межа пружності) падає. Мала частка приповерхневих шарів у повному об'ємі металічних монокристалів більшого діаметру обумовлює незначний вплив поверхні на їх міцність, тому вони мають нижчі значення межі текучості.

Крім того, було виявлено [26-28], що у багатьох випадках ниткоподібні кристали - «вуса» з одною, або двома осьовими дислокаціями витримують деформацію від 0,2 до 10 %. На сьогоднішній день показано, що у «вусах» можуть бути присутні дислокації у великій кількості.

Відомо також, що міцність деформованих «вусів» може перевищувати міцність недеформованих «вусів». Так, при деформації мідного «вуса» (рис. 6), було досягнуто значне зміцнення, яке за величиною близьке до теоретичної міцності [29]. Міцність цього «вуса» після пластичної деформації перевищувала межу текучості більш тонкого «вуса», хоч межа текучості більш товстішого «вуса» була нижчою.

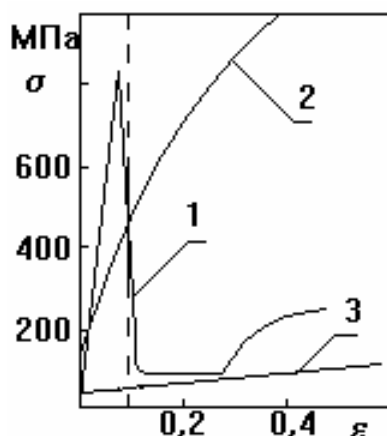


Рис. 6. Діаграма розтягу монокристалів міді [17]: 1 – тонкий вус, 2 – товстий вус, 3 – масивний монокристал.

Про надзвичайно високу міцність деформованих мікро кристалів, яка перевищує міцність недеформованих, повідомляється Бережковою і Рожанським [26], які в електронному мікроскопі спостерігали полісинтетичні двійники у базисних стрічкоподібних ниткоподібних кристалах α -Al₂O₃. Під дією термічного удару ці стрічки розбивались на дуже тонкі (товщиною 200-500 Å) двійникові прошарки, утворюючи систему полісинтетичних двійників. При механічних дослідженнях виявилось, що ниткоподібні кристали з полісинтетичними двійниками мають найбільш високу міцність, яка досягає для стрічок січенням 0,1-1 мк² до 1500 кг/мм² (15000 МПа). Міцність недеформованих

стрічок того ж січення складала 500 –1000 кг/мм² (5000- 10000 МПа).”

Слід також згадати про високу міцність інших ниткоподібних утворень – ниткоподібних кристалів суміші металів ,6(Cu-Fe, Cu-Ni, Fe-Co та ін.), які можуть бути названі так лише умовно, оскільки не є монокристалами і мають складну будову. Їх висока міцність обумовлена присутністю великої кількості дефектів і має характер дисперсного зміцнення [26]. Висока міцність характерна також для голчатих скалок (їх називають тріски або «вуса» розколу), які утворюються при розколі кристалів. При товщині кілька мікронів їх пружні властивості відповідають ниткоподібним кристалам: [26]. Ці тріски за механічними властивостями подібні до ниткоподібних кристалів, але суттєво відрізняються від них гаммою інших ознак. У трісках вибірково травленням було встановлено дуже високу густину дислокацій (до 10⁹ см⁻³). Дислокації розміщені вздовж слідів ковзання, що є свідченням того, що тріски піддаються пластичній деформації у процесі їх утворення.

А як пояснити високу міцність тонких скляних ниток, яка досягає 5000 МПа [26], у порівнянні з міцністю звичайного скла (40...60 МПа)? Оскільки скло є аморфним, то у цьому випадку не може йти мова про вплив дислокацій на міцність.

Враховуючи це, відому класичну залежність (рис. 7), яка приведена чи не в кожному підручнику з металознавства, слід видозмінити. Відповідно до рис. 7 вплив дислокацій на міцність металів відображають U-подібною кривою. Деякій густині дислокацій ρ_m відповідає мінімальний опір деформації монокристалів. Зменшення ρ порівняно з ρ_m приводить до підвищення міцності, оскільки наближає структуру до ідеальної. Підвищення числа дефектів у порівнянні з ρ_m викликає також підвищення міцності, але вже по іншій причині, а саме - внаслідок підвищення опору переміщення дислокацій. У цій області знаходяться технічні метали і їх сплави.

Отже, аналогічно з вищенаведеною залежністю міцності (межі текучості) твердих тіл від кількості дефектів (рис. 7) подамо свою залежність зміни міцності кристалів (рис. 8). На цій залежності максимальну міцність мають тонкі склоподібні волокна і ниткоподібні кристали з деформованою до аморфного стану структурою, у яких відсутні мікротріщини. За ними ідуть тонкі «вуса», які, попри їх бездефектну внутрішню будову, мають поверхню як двомірний дефект, що займає значну частину у загальному об'ємі «вусів» через їх малі розміри.

Міцність масивних металічних монокристалів досконалої будови є найнижчою, оскільки вони знаходяться в області з низьким вмістом дефектів. Їх поверхня, як дефект, становить мізерну частину від всього об'єму кристала. Міцність полікристалічних металів займає проміжне положення між міцністю «вусів» і масивних монокристалів. Їх міцність залежить від розміру зерен і блоків (залежність Петча-Холла), оскільки границі зерен та блоків, як і



Рис. 7. Залежність опору зсуву від густини дефектів у кристалах.

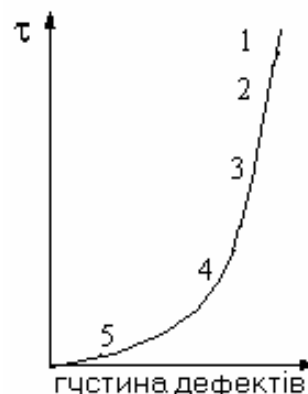


Рис. 8. Вплив структури на міцність:
1 – деформованих тонких кристалів і во-локон,
2 – «вусів», 3,4 – технічних металів і їх сплавів,
5 – масивних монокристалів.

поверхня, є дефектом.

Таким чином, висока міцність ниткоподібних металічних монокристалів, яка близька до теоретичної, у більшій мірі визначається зміцнюючим впливом поверхні, а також впливом дефектної структури, а ніж ідеальною будовою їх кристалічної ґратки. Отже, трактування високої міцність «вусів» з точки зору теорії дислокацій не зовсім правильне.

Що стосується пояснення відмінності у пластичності металічних та ковалентних кристалів з позицій теорії дислокацій, то це взагалі не є поясненням, оскільки виникає більше запитань ніж відповідей. Вважається, що у ідеальному кристалі опір зсуву є високим. А легкий зсув атомних площин у металічних кристалах пояснюють присутністю дислокації. В той же час у ковалентних і іонних кристалах ця модель не спрацьовує. Присутність в них дислокацій не сприяє їх пластичності, тому відсутність у них пластичності пояснюють підвищеним опором переміщенню дислокацій, тобто високим опором зсуву атомних площин. Це ж стосується переміщення дислокацій у відповідних кристалографічних напрямках у металах. Але таке пояснення це є, знову ж, поверненням до того, з чого починали. Адже дислокація вводиться в ідеальний кристал для зменшення опору зсуву атомних площин. Чому ці сили, що гальмують переміщення дислокацій, а, фактично, зсув атомних площин є різними для різного типу хімічного зв'язку, а також при переміщенні дислокацій в різних кристалографічних напрямках у металах? Щоб це пояснити механістичні підходи теорії дислокацій є недостатніми. Тут необхідно розглядати специфіку міжатомної взаємодії у металічних і ковалентних кристалах, як це подано вище.

VI. Висновки

1. У залежності від характеру розподілу електронної густини валентних електронів формується геометрія потенціалу міжатомної

взаємодії. Атоми зі сферично симетричними потенціалами міжатомної взаємодії утворюють нестійку кристалічну ґратку, а у випадку асиметричного потенціалу міжатомної взаємодії з направленими зв'язками - утворюють стійку ґратку.

2. Причиною нестійкості кристалічної ґратки є укорочення міжатомної відстані порівняно з рівноважною (стискання кристалічної ґратки) за рахунок сил притягання між атомами і їх другими сусідами, які урівноважується силами відштовхування між атомами і їх першими сусідами. Це явище є характерним для металів, які, у наслідок додаткового стискання кристалічної ґратки, стають електро-провідними і пластичними.

3. Пластичність і міцність твердих тіл з ідеальною кристалічною ґраткою залежить від її стану. Тверді тіла з нестійкою кристалічною ґраткою, для якої властивим є відсутність опору відносно малих зсувних деформацій у деяких кристалографічних напрямках, є пластичними і неміцними. Тверді тіла зі стійкою ґраткою – високоміцні і непластичні.

4. Пластична деформація – це одночасне зміщення атомів у нестійкій ідеальній кристалічній ґратці з положення нестійкої рівноваги у положення стійкої рівноваги. Зміщення атомних площин відбувається у кристалографічних напрямках найбільш заселених атомами, при цьому опір зсуву атомних площин відсутній, або незначний. Існування у реальних металах дефектів (поверхневих шарів, границь блоків і зерен, дислокацій, вакансій і т.і.) підвищує опір зсуву атомних площин, що забезпечує їм міцність.

Таким чином тип хімічного зв'язку є основним чинником, який визначає пластичність і міцність ідеальної кристалічної ґратки. Структурний чинник визначає пластичність і міцність технічних металів та їх сплавів, будова яких через присутність різного роду дефектів, границь блоків та зерен і поверхневих шарів значно відрізняється від будови ідеальної кристалічної ґратки.

Козак Л.Ю. – кандидат технічних наук, доцент.

- [1] Г.В. Самсонов, И.Ф. Прядко, Л.Ф. Прядко. *Электронная локализация в твердом теле*. Наука, М. 338с. (1976)
- [2] Г.В. Самсонов, И.Ф. Прядко, Л.Ф. Прядко. *Конфигурационная модель вещества*. Наукова думка, Киев. 316 с. (1975)
- [3] Б.И. Архаров, Ю.Г. Скрипка, Е.С. Мархасин. О значении механизма формирования межзатомных связей в сплавах для их прочностных и пластических свойств // *ФХММ*, **2**, сс. 47-50. (1978)
- [4] Козак. Л.Ю. Пластичність металів як вияв нестійкості кристалічної ґратки//*Фізика і хімія твердого тіла*, **3**(1), сс. 120-133 (2002).
- [5] L. Kozak. V. Vysochansky. Computer modeling of the metals plasticity.// *XV Physical metallurgy and materials science conference. 17-21 May 1998, Poland*, pp.283-287 (1998)
- [6] Л. Козак. Пластическая деформация и неустойчивость кристаллов // *Деп.-УкрНИИИТИ*, **1969**, Ук, 88. (1988)
- [7] Я.Й. Дутчак та ін. *Фізика металів*. НМК ВО, Київ. 162с. (1993)
- [8] У. Пирсон. *Кристаллохимия и физика металов и сплавов*. Мир, М. 419с. (1977)
- [9] Р. Кан. *Физическое металоведение*, **II**. Мир, М. 583с. (1970)
- [10] Л.Ю. Козак. Дослідження стійкості двохвимірної кристалічної ґратки // *Фізика і хімія твердого тіла*, **2**(2), сс. 289-297 (2001).
- [11] M. Born. On the stability of crystal lattices // *Proc. Camb. Phil. Soc.*, **36**, pp.160-172 (1940)
- [12] M. Born. On the stability of crystal lattices // *Proc. Camb. Phil. Soc.*, **38**, pp.82-99 (1942)
- [13] У.Г. Брэгг, У.Л. Брегг. *Кристаллические состояние*. НТИ СССР, М. 336 с. (1938)
- [14] Л.И. Миркин. *Физические основы прочности и пластичности*. МГУ, М. 537с. (1968)
- [15] В.И. Лихтман, П.А. Ребиндер, Г.В. Карпенко. *Влияние поверхностно-активной среды на процессы деформации металлов*. Из-во АН СССР, М. 204 с. (1954)
- [16] Я.И. Френкель. *Введение в теорию металов*. Наука, Ленинград. 423с. (1972)
- [17] П.И. Полухин и др. *Физические основы пластической деформации*. Металлургия, М. 256 с. (1984)
- [18] Z. Wojarski, Z. Wokulski. Badania wiskerow zelaza w statycznej probie rozciagania // *Arch. hutn.*, **1**, pp.3-26. (1980)
- [19] М.И. Гольдштейн, В.С. Литвинов, Б.М. Бронфин. *Металлофизика высокопрочных сплавов*. Металлургия, М. 312 с. (1986)
- [20] В.П. Алехин. *Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов*. Наука, М. 280 с. (1988)
- [21] М.А. Васильев. *Структура и динамика поверхности переходных металлов*. Наукова думка, Киев. 248с. (1988)
- [22] Г.П. Черепанов. К общей теории разрушения // *ФХММ*, **1**, сс. 36-44 (1986)
- [23] R.M. Latinision, A.J. Sedriks, A.C. Westwood, Surface sensitive mechanical behavior of metals. // *Struct. and Properties Metal Surface*. Tokio. pp. 500-538. (1973)
- [24] Глейтер Г., Чалмерс Б. Большеугловые границы зерен. - М.: Мир, 1975.- 314с. Л.Ю. Козак. Теоретичне дослідження процесу твердіння рідин // *Фізика і хімія твердого тіла*, **2**(1), сс. 147-151 (2001).
- [25] Кузнецов В.Д. Поверхностная энергия твердых тел.-М.: ГИТТЛ, 1954.- 217с. Л.Ю. Козак. Комп'ютерне моделювання зсуву атомної площини у двовірній ґратці// *ФХММ*, **1**,-сс. 114-115, (1999)
- [26] Г.В. Бережкова. *Нитевидные кристаллы*. Наука, М. 157 с. (1969)
- [27] Андропов С.М., Грицких В.А. Экспериментальное исследование пластичности нитевидных кристаллов меди// *ФММ*. 1972. т33, №5, с.1056-62
- [28] Беликов А.М. Пластическая деформация нитевидных кристаллов.-Воронеж: Из-во ВГУ, 1991.-204с.
- [29] С.З. Бокштейн и др. Особенности упрочнения металлических и неметаллических нитевидных монокристалов // *В сб. Физика деформационного упрочнения монокристалов*. Наукова думка, Киев. 267 с. (1972)

L.Yu. Kozak

Nature of Metals Plasticity

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
15, Karpatska Str., 76000, Ivano-Frankivsk,
tel.: 03422-42351, E-mail: kozakl@ifdtung.if.ua*

In the article new views on a nature of the metals plasticity are stated. On the two-dimensional model of the crystal it was shown that the infinite size crystal lattice with the spherically symmetric potential of interatomic interaction could be unstable under influence of small shear deformation. In such crystal lattice the repulsive forces arise between the atoms and their nearest neighbors, which balanced by the attractive forces between atoms and their secondary neighbors. The process of crystal stability breaking under the influence of external forces can be considered as the plasticity. The displacement group of atoms into position of lower potential energy is presented as the elementary stage of plastic deformation