

Ńăđă³é Ô²ĐŃŌĪ Ā,  
 àèääâî ³è Í ĀÍ Óéđàĭ è,  
 çàñòóî í èè àèđâòî ðà  
 ²í ñèèòòòó ì đĭ áèâî ĭ àòăđ³àèĭ çĭ àâñòââ  
 ³ĭ .².Ī .Ōđâĭ ôââè÷à Í ĀÍ Óéđàĭ è

## **МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО НА АТОМНОМУ РІВНІ**

На життя мого покоління припало багато історично значущих подій, серед них — перемога у Великій Вітчизняній війні, повоєнна розбудова країни, освоєння космосу, «хрущовська відлига», мирне співіснування, афганська війна, розпад Радянського Союзу, становлення незалежної України. Водночас — окремо — бурхливий розвиток науки і техніки, науково-технічна революція, здобутки в галузі освіти, інформатики, медицини.

Мені, мабуть, пощастило. У шістдесятих роках моєму поколінню вдалося відчути атмосферу певного оптимізму, віри у можливість науки. До тієї пори належить відомий диспут про «фізиків» та «ліриків», розпочатий знаменитим «что-то фізики в почете, что-то лирики в загоне». Суспільство не почуло тоді голосу тривоги, і про те, що «галузка бузку в космосі» — це не просто сантимент, а щось інше, ми

здогадалися хіба що після Чорнобиля. А тоді — ми беззастережно орієнтувалися на науково-технічний поступ, на спеціальності, пов'язані з природничими та технічними науками. Саме на ці спеціальності був дуже великий конкурс, відбір відмінників навчання. Вибір був доволі великий, проте, керуючись порадою мого батька, я вибрав для вступу відносно молоду спеціальність — фізику металів. Згодом виявилось, що отримана мною освіта дуже близька за змістом до фізики твердого тіла (точніше — є її розділом), а у ширшому розумінні — фізичного матеріалознавства. Треба сказати, що цієї галузі практично не торкнулися «ідеологічні» перекося (типу «лисенківщини», пошуку буржуазних впливів). Мабуть, через те, що природничий характер науки, пошук саме об'єктивних закономірнос-

тей, можливість експериментальної перевірки теоретичних розрахунків та передбачень практично виключали притаманну, наприклад, суспільним наукам ідеологічну упередженість. Іноді, напівжартома, я питав себе, чому я не помітив «застійних» часів. Скоріше за все — саме завдяки об'єктивному характеру наукового пошуку, який спонукав до творчих дискусій, щасливому усвідомленню, що і ти, і твої колеги причетні до здобуття нових знань. Понад те, ми відчували певну підтримку держави. Принаймні у нашій галузі вона була значною. Створювалися нові інститути, молодь охоче йшла саме в наукову сферу, вівся активний пошук найефективніших форм організації науки, впровадження її результатів у практику.

Притоку молоді сприяла і сама атмосфера науково-дослідного закладу — спрямованість на отримання принципово нових непересічних результатів, дискусійність, сполучення високої вимогливості та доброзичливості, можливість поїздки в наукове відрядження у інший науковий заклад, участь у численних конференціях. Можливо, так було не всюди, проте як мінімум у тих двох інститутах, де мені довелося працювати, — інституті металофізики та інституті проблем матеріалознавства, мені та моїм колегам вдалося зустріти яскравих учених — Віталія Никифоровича Гриднева, Віктора Івановича Трефілова, Івана Микитовича Францевича. Зустріч із цими особистостями мала певний світоглядний вплив — це були люди, які поєднували в собі обдарованість справжніх учених з ви-

сокими організаційними якостями та — без перебільшення — державницьким мисленням. Водночас це були справжні люди, які привертали увагу молоді, яка йшла в науку, і своїми високими людськими якостями.

Наука безумовно є складовою культури, і її завданням є розширення нашого світогляду, сприяння розумінню нашого місця у Всесвіті, аналіз та передбачення різноманітних явищ, філософське осмислення та практичне використання отриманих наукових закономірностей. В наші дні наука дуже розгалужена. Значною мірою можна стверджувати, що справжня наука починається тоді, коли в ній з'являється вимірювання (експеримент) та стає неодмінною складовою математика (розрахунки). Саме тоді вдається побудувати достатньо строгую теорію, яка дає можливість перевірити покладені в основу розрахунків гіпотези та моделі. Згадаймо емпіричні астрономічні закони, на основі яких існує наш календар, місячний календар, закони Кеплера... Сучасна астрономія розвивається, використовуючи як досягнення математики, так і інших наук, зокрема фізики. Фізика як наука теж починалася зі встановлення кількісних закономірностей. Батьком експериментальної фізики називають Галілея, який провів перші експериментальні дослідження закономірностей руху. Але скільки душі було вкладено у ці дослідження... Закономірності коливань маятника (залежність періоду коливань від довжини маятника) Галілей спочатку підмітив, спостерігаючи за коливанням підвішених у церкві світильників.

За переказами — він вимірював період коливань, використовуючи замість годинника власний пульс.

Іноді протиставляють культурно-філософський підхід та природничо-науковий. Проте згадаймо, як влучно описав процес наукового пошуку саме поет. Знаменита в радянські часи телевізійна передача «Очевидне — неймовірне» починалася з рядків Пушкіна — «О сколько нам открытий чудных готовят просвещения дух и опыт, друг ошибок трудных, и гений, парадоксов друг, и случай, бог изобретатель.» Дивно, що Пушкін, який нібито дуже погано встигав з математики, напрочуд чітко висловив те, що становить суть науки. А саме — експеримент (опыт — друг ошибок), теорія (гений) та винахід. Саме ці складові у їх взаємодії дають можливість отримати нові знання.

**Матеріалознавство.** Це наука, яка вдало поєднує як фундаментальні природничі засади, так і безпосередній практичний вихід у вигляді як нових речовин та матеріалів, так і різноманітних технологій отримання як самих матеріалів, так і виробів з них. Без перебільшення можна сказати, що рівень матеріалознавчих розробок визначає конкурентоспроможність економіки більшості світових держав, самодостатність держави, її національну безпеку.

Матеріали використовують всюди — у будівництві, виробі товарів широкого вжитку, авіа та космічній техніці, машинобудуванні, медицині, військовій техніці тощо. Ще з прадавніх часів люди використовували різноманітні матеріали для мисливства, землеробства, у побуті. Слід за-

значити, що протягом віків відбувалася безперервна еволюція у використанні матеріалів, технологіях їх виробництва та обробки. Головною рисою цієї еволюції є перехід від використання матеріалів природного походження до штучних матеріалів, цілеспрямовано створених для дедалі більших потреб людини. Первісні люди, як добре відомо, жили у так званому «кам'яному» віці, який отримав цю назву через те, що саме з природного каміння люди створювали перші знаряддя праці, наконечники для списів, стріл. Поступово люди звернули увагу на металеві матеріали. Спочатку це було так зване самородне золото, самородна мідь. Такі матеріали можна було піддавати обробці куванням, надавати їм різноманітної форми, а з золота виробляти прикраси. Згадаймо хоча б маску Тутанхамона або експонати київського музею історичних коштовностей (наприклад, знамениту «Пектораль»). Затим навчилися виплавляти сплави, спершу міді — «бронзовий» вік. Але найтриваліший період людської еволюції прийшовся на так званий «залізний» вік. У цей час поширилися та розвивалися різноманітні технології виплавки та обробки сплавів на основі заліза (це триває й донині). Значні досягнення людства у розвитку транспортних засобів — залізниця, автомобілі; у будівництві — мости; у військовій техніці — гармати, танки; у сільському господарстві — комбайни, трактори, інша сільськогосподарська техніка, прямо пов'язані з технологіями виплавки, обробки сплавів на основі заліза.

Проте вже в минулому сторіччі, коли почала розвиватися авіаційна

техніка, стало ясно, що необхідно створювати нові легкі матеріали на базі алюмінію, титану, магнію, оскільки зменшення ваги конструкцій, особливо тих, які мають злітати, переборюючи земне тяжіння, є одним із найважливіших пріоритетів у роботі нових матеріалів.

В подальшому із розвитком хімічних технологій з'явилися новітні матеріали на базі пластмас, полімерів. Постало питання про необхідність зміни структури матеріаловиробничого сектору економіки — від металевих до новітніх перспективних матеріалів з метою розширення спектра корисних властивостей, діапазону можливих робочих температур, зменшення витрат на виробництво, оздоровлення навколишнього середовища. Можна зауважити, що прогрес людства тісно пов'язаний із розвитком матеріаловиробничого сектору. Переважна більшість номенклатури матеріалів, що використовуються, створені штучно. Тому науковий та економічний поступ покликав до життя таку науку — матеріалознавство. Зазначимо, що в наукових програмах багатьох розвинених країн світу витрати на матеріалознавчу науку становлять від 12 до 20 відсотків загальнонаукових витрат.

Матеріалознавство поєднує в собі фізику твердого тіла, фізичну хімію, фізику металів, металознавство, хімію твердого тіла. Останнім часом замість визначення «тверде тіло» часто вживається словосполучення «конденсований стан». Як наука, матеріалознавство почало складатися на початку минулого сторіччя. За час, що минув, внутрішній зміст

його поступово змінюється від значною мірою емпіричної науки до науки, яка містить у собі як теоретичні розрахункові дослідження (в тому числі на базі першопринципових підходів), так і потужну експериментальну науку, яка використовує найсучаснішу експериментальну техніку, що дає можливість на атомному рівні досліджувати особливості у будові матеріалів, тонкі зміни хімічного складу, прецизійно вимірювати фізико-механічні властивості матеріалів.

Матеріалознавчі дослідження побудовані на класичному трикутнику: *структура—склад—властивості*. При цьому *структура та склад* можуть регулюватися з використанням певної технології отримання матеріалів. *Властивості* значною мірою оцінюються як з точки зору фундаментальних знань про структуру та властивості матеріалів, так і з точки зору споживача матеріалів. Споживачеві завжди цікаво отримати матеріали із принципово новим рівнем властивостей, або їх сполученням, крім того, дуже важливо, щоби собівартість була якнайнижчою. В наш час визначальним фактором стає також і екологічна безпека виробництва таких матеріалів.

Матеріали можуть бути класифіковані за різними ознаками. Одна з таких можливих класифікацій побудована на особливостях міжатомної взаємодії — метали, напівпровідники, ізолятори, іонні кристали, молекулярні сполуки. Інша передбачає їх розподіл за можливим використанням (призначенням) — матеріали для авіації, космосу, матеріали для машинобудування, енергетики, інформа-

тики, матеріали біомедичного призначення, матеріали електронної техніки, сільського господарства, будівельні матеріали, матеріали та речовини хімічного виробництва, військової техніки тощо. Врешті решт існує розподіл матеріалів на конструкційні та функціональні. При цьому під конструкційними матеріалами здебільшого розуміють матеріали, що здатні витримувати різноманітні механічні навантаження (статичні, динамічні, циклічні), працювати у різноманітних середовищах, у широкому діапазоні температур. Функціональні матеріали — це здебільшого матеріали із особливими електрофізичними або хімічними властивостями (наприклад, магнітні матеріали, надпровідники, каталізатори, резистори тощо). Звичайно, така класифікація значною мірою умовна, оскільки витримувати механічні навантаження — це також певна корисна функція матеріалів.

Проте такі класифікаційні підходи корисні при формуванні програм фундаментальних та прикладних досліджень, оскільки дають змогу концентрувати увагу вчених та спеціалістів на деяких так званих пріоритетних напрямках розвитку науки і техніки. Іноді, бажаючи привернути увагу потенційних споживачів, інвесторів, учені підносять на щит певні нові за звучанням «привабливі» назви напрямів таких досліджень. Цікавим прикладом такої спроби є створення так званих «розумних» матеріалів. Це матеріали, структура та властивості яких дають їм можливість активно реагувати на зміни в системі (зміна температури, тиску, електромагнітних по-

лів, вологості тощо) та відпрацьовувати корисний сигнал. Однак, назва «розумні» з'явилася як аббревіатура англійського речення — Shape Memory Alloys, Research and Technology — *сплави із ефектом пам'яті форми, дослідження та технологія*. Перші літери слів цього речення утворюють слово *smart*, що означає «розумний». Це приклад науково-організаційної політики. Вдала назва не тільки поєднує спроби зосередити зусилля вчених на цьому справді цікавому в науковому та практичному відношенні напрямі, а й привернути увагу спільноти, споживачів, інвесторів. У наш час можна назвати такий напрям, як «наноматеріали та технології». Вдала приваблива назва вигідно та корисно сполучається із високотехнологічним напрямом сучасних досліджень, коли на рівні нанометрів вдається створювати структуру матеріалів, або новітні пристрої, елементи яких мають нанорозміри.

Встановлення фундаментальних закономірностей впливу структурних та фазових перетворень під впливом зовнішніх факторів — температура, тиск, деформація (термічна, термомеханічна, термобарична обробка) — на формування фізико-механічних властивостей є передумовою так званої структурної інженерії матеріалів. З ускладненням структури матеріалів можна розрізняти однокомпонентні (складаються з одного хімічного елемента, наприклад, чисті метали, кремній, вуглець тощо), або багатокомпонентні (складаються з двох та більше хімічних елементів — сплави, сполуки, інтерметаліди тощо). Ма-

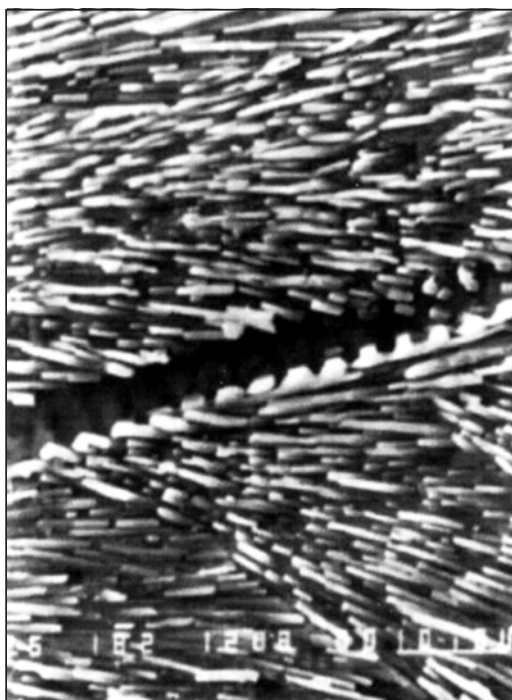


теріали можуть бути однофазними, або багатофазними (поліфазними). Фазою називають однорідний за будовою та хімічним складом об'єм матеріалу, який є відокремленим від іншої частини матеріалу межею поділу. Перехід однієї фази в іншу під дією тиску, або температури спричиняє зміну фізико-механічних властивостей матеріалу. Розділ матеріалознавства, який вивчає фазові рівноваги, базується на підходах термодинаміки, фізичної хімії. В Україні, зокрема в Києві та Дніпропетровську, успішно працюють наукові школи академіків Свечнікова, Єременка, Тарана-Жовніра, широко відомі у всьому світі, їхні роботи перевидаються за кордоном у престижних збірниках. Дослідники будують так звані діаграми фазових рівноваг у координатах *температура—склад* при постійному тиску, або враховують і зміну тиску. Такі діаграми дають можливість отримувати заданий фазовий склад. Саме завдяки вивченню фазових рівноваг удалося зрозуміти умови, коли вуглець перетворюється на алмаз, та створити технології отримання штучних алмазів. На основі вивчення фазових рівноваг в системі *залізо—вуглець*, а також більш складних сплавів із додатковим легуванням створено цілу гаму сталей та чавунів. А також розроблено низку технологій їх обробки для надання їм необхідних властивостей. Як правило, коли згадують сталі, то на пам'ять приходять слова — дамаський клинок, булат, криця, але не тільки цим важливі матеріали на залізній основі — дуже важливими є різноманітні сталі з підвищеною корозійною

стійкістю, спеціальними теплофізичними властивостями, інструментальні сталі, пружинні матеріали, матеріали з підвищеним спротивом утомі (знакозмінному навантаженню) тощо.

Поліфазні матеріали по суті є композиційними матеріалами, оскільки їхні властивості залежать від співвідношення фазових складових, а кожна із фаз може відрізнятися своїм набором властивостей. Відомі композиції штучні, в яких різноманітні матеріали з'єднані завдяки спеціально створеним технологіям отримання — наприклад, пошарове напилення, просочування пористого, чи волокнистого каркасу іншим матеріалом. Але особливу цінність являють собою так звані природні композити, в яких поліфазний стан формується внаслідок або спеціальних (так званих евтектичних або перитектичних) реакцій при кристалізації із рідкого стану, або завдяки фазовим перетворенням у твердому стані. Прикладом такої композиційної структури є структура подвійної евтектики в системі *титан—кремній*, наведена на мал.1.

Зазначимо що структурні дослідження розвивалися від макроструктурних до вивчення мікроструктур, а останнім часом і наноструктур. Макроструктурні дослідження пов'язані практично із візуальною оцінкою об'єкта, коли вимірювання виконуються без спеціальних збільшувальних приладів (мікроскопів), а масштаб елементів структури знаходиться у діапазоні від міліметра до метра і більше. Роздільна здатність людського ока становить близько 0.1мм. Прикладами макроструктур можуть



Мал.1. Сплав системи Ti-Si, евтектична кристалізація, матриця титану армована силіцидною зміцнювальною фазою

бути поліровані гранітні або мрамурові плити, на яких неозброєним оком добре видно контури складових каменю, прошарки слюди тощо. Можливо, одне з перших свідчень макроцінки характеру зламу навів у своєму щоденнику Стендаль. Мандруючи кам'янистими дорогами Італії, він попав у аварію, — зламалася металева вісь карети. Подивившись на злам, Стендаль зазначив, що причиною, мабуть, була грубозерниста структура. Сучасний дослідник не міг би сказати краще. Проте на сучасному рівні використовуються різноманітні мікроскопи, роздільна здатність яких змінюється від приблизно 1 мікрметра (мікрметр, мікрон — одна тисячна міліметра) для

так званих оптичних мікроскопів до долей нанометрів (нанометр — одна мільйонна доля міліметра) — сучасні електронні мікроскопи. Структуру, яку можна досліджувати за допомогою мікроскопів, назвали мікроструктурою. Важко переоцінити використання таких мікроскопів у матеріалознавстві. З їх допомогою розкрито секрети булатної сталі. Взагалі матеріалознавство як наука немислима без використання мікроскопів. Мікроструктурні дослідження, кількісний аналіз структурних параметрів є неодмінною складовою матеріалознавчих досліджень, експертиз причин аварій. Крім металографічних (для металів та сплавів), петрографічних (для мінералів), керамографічних (керамічні матеріали) досліджень широкого розвитку набули фрактографічні (від слова *fracture* — руйнування) дослідження поверхонь руйнування. Мал.2.

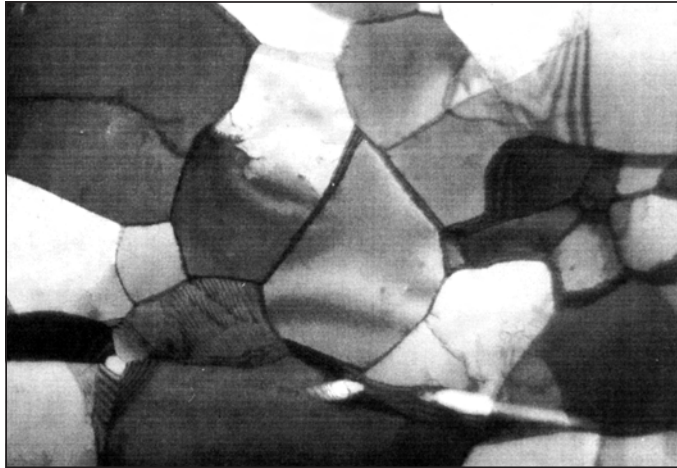
Слово «структура» означає будова, конструкція. Стосовно матеріалів на атомному рівні йдеться про атомно-впорядковану (кристалічну) структуру, або про рідиноподібну — аморфну структуру. (Розміри атомів становлять десяті долі нанометра,  $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ). Окрім цих двох структур, останнім часом відкрито новий клас твердих тіл із так званою квазікристалічною структурою. Кристалічні матеріали належать до надзвичайно широкої групи матеріалів. Але якщо деякі кристали широко відомі, оскільки існують у вигляді великих досконалих монокристалів — наприклад, монокристали алмазу, кварцу, рубіну, кам'яної солі тощо, то більшість кристалічних

матеріалів існує у вигляді так званих полікристалів. Структура таких полікристалів утворена з окремих монокристалів (зерен), розмір яких може змінюватися від таких, які можна бачити неозброєним оком, до зерен нанорозмірів (100–10нм).

Цікаво, що будова кристалів була значною мірою досліджена, класифікована та передбачена (поділена на різні класи — сингонії) задовго до створення сучасних методів структурного аналізу, які дають можливість з високою

достовірністю визначати точні атомні позиції у кристалічній ґратці. Всі кристали поділяються на сім сингоній — кубічна, тетрагональна, орторомбічна, гексагональна, ромбоїдрична, триклінна та моноклінна. До цієї класифікації дійшли, вимірюючи кути між гранями кристалів та визначаючи осі симетрії різного порядку. Один із перших дослідників кристалів — монах Гаюї — відкрив дуже важливий емпіричний закон. Уважно аналізуючи (та вимірюючи!) кути між ребрами та гранями кристалів різного типу та різної симетрії, він встановив, що відрізки, які відсікають грані на координатних осях (ребрах) відносяться один до одного, як цілі числа.

Ще він, розколюючи великі кристали, звернув увагу, що уламки значною мірою повторюють форму великого кристала. Якщо уламок знову подрібнити, то, поки можна було на око оцінювати форму дедалі дрібніших уламків, можна було дійти вис-



Мал.2. Наддрібнозерниста структура деформаційного походження у деформованому хромі

новку, що основні елементи симетрії зберігаються. Це дозволило сформулювати ідею, що в основі кристалічної будови міститься елементарна (найменша) ґратка, яка є носієм симетрії всього кристала. Елементарне зміщення (трансляція, приєднання) елементарної ґратки вздовж кристалографічних осей дозволяє отримати кристал в принципі будь-яких розмірів (досконалі кристали розміром порядку 1 метра створюють у інституті монокристалів НАН України в Харкові).

Саме на монокристалах було доведено, що елементарні акти пластичної деформації відбуваються через зсув однієї частини кристала відносно другої шляхом так званого ковзання по виділених кристалографічних площинах. При цьому вже порівняно давно було обчислено так звану теоретичну (гранично можливо) міцність на зсув. Одним із перших її обчислив Я.І. Френкель. Але різниця між теоретичною та реальною міц-



ністю виявилася вражаючою. Реальні значення критичного спротиву зсуву виявилися у 100 та більше разів меншими за обчислені теоретично. Пояснення цієї різниці вдалося знайти у порушеннях атомно-кристалічної будови (дефектах кристалічної будови). Понад те, виявилось, що насправді реальні акти пластичної деформації на атомному рівні пов'язані не просто з наявністю таких дефектів, але й відбуваються завдяки їм. Саме вони є активними «учасниками» пластичної деформації (носіями пластичної деформації). Саме вони спричиняють зародження та розвиток тріщин, які врешті-решт руйнують матеріал. Розрізняють ці дефекти за розмірністю — точкові, лінійні, плоскі, об'ємні.

До точкових належать порушення атомного масштабу — так звані вакансії (відсутність атома на вузлі кристалічної ґратки), або міжвузлові атоми (атоми, зміщені у міжвузловий простір ґратки). Серед лінійних дефектів найважливішими є так звані дислокації, за допомогою яких і відбувається ковзання однієї частини кристала відносно другої. (переміщення однієї дислокації спричиняє зсув на одну міжатомну відстань). Саме зародження та переміщення цих дислокацій і є причиною розбіжності теоретичного та реального спротиву зсуву. В подальшому саме на базі теорії дефектів (теорії дислокацій) і виникла потужна і дуже цікава галузь науки — фізика міцності.

Проте досить довго, до 60-х років минулого сторіччя, теорія дислокацій залишалася якоюсь мірою красивою гіпотезою, оскільки не

було прямих доказів існування дислокацій. Хоча численні «непрямі» докази їх існування були досить переконливими.

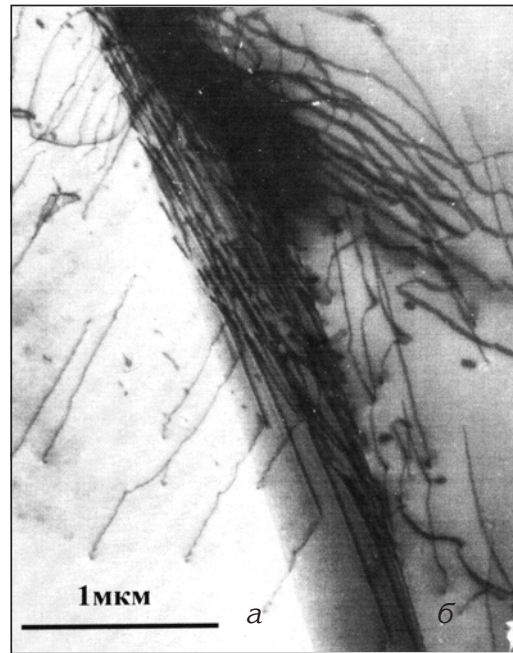
Розвиток «прямих» методів дослідження найтіснішим чином пов'язаний зі створенням нового покоління потужних приладів — так званих електронних мікроскопів, які дали змогу спочатку впритул наблизитися до досягнення роздільної здатності — 1–2 нм, а в наш час і значно перевершити її та досягти роздільної здатності — 0,1 нм, що вже суттєво менше атомного розміру. І це ще не межа можливого.

В принципі можливості використання електронних пучків для створення електронних мікроскопів з високою роздільною здатністю були з'ясовані після відкриття у 1927 році Девісоном і Джермером дифракції електронів. Стало ясно, що відоме співвідношення Бройля, згідно з яким електрону, що рухається з певною швидкістю відповідає певна довжина хвилі, справді дозволяє розрахувати цю довжину і наприклад для електронів, що розігнані електростатичним полем 1000 в, відповідна довжина хвилі становить 1,226 нм, а для 100 кв — 0,0037 нм. Таким чином роздільна здатність на рівні атомних розмірів виглядала цілком досяжною. Проте знадобилося не менше 30 років, щоб побудувати прилади із роздільною здатністю на рівні 1–2 нм.

Причиною такої «затримки» була необхідність подолати різноманітні технічні труднощі — забезпечити високий вакуум, надзвичайну стабільність прискорювальної напруги, подолання механічних вібрацій тощо.

Наприклад, нехай об'єкт випадково зміститься на одну тисячну міліметра, то при типовому збільшенні  $10^5$  зображення «стрибне» на 1дм, а при збільшенні приблизно  $10^6$  (яке є необхідним для отримання зображень на атомному рівні) — на 1м! А при збільшеннях близько 1 мільйона навіть вібрації, що виникають від людського голосу, розмивають зображення атомних рядів та унеможливають їх роздільне чітке зображення! Для подолання таких труднощів знадобилися десятиріччя копіткої роботи різних спеціалістів як у галузі точної механіки, так і в електронній техніці.

Тільки в 60-ті роки вдалося отримати перші «прямі» зображення дислокацій. Вперше це вдалося англійським дослідникам школи П.Хірша, у Радянському Союзі пріоритет належать московським дослідникам — співробітникам лабораторій Л.М.Утевського (ЦННІ ЧМ імені І.П.Бардіна) та В.М.Рожанського (Інститут кристалографії). Перші тонкі кристали в Україні восени 1964 року було досліджено мабуть в нашій лабораторії в інституті металофізики (автором разом із Ю.М.Петровим). Приблизно у той же час «прямі» електронно-мікроскопічні дослідження було розпочато у Харкові В.М.Косевичем та його групою. Слід зазначити, що певний прогрес українських матеріалознавців та фізиків у цій галузі завдячує наявності в Україні на той час власного виробництва електронних мікроскопів у місті Суми. Хоча своїми параметрами сумські мікроскопи дещо поступалися кращим зарубіжним приладам, вони за-



Мал.3. Взаємодія дислокацій з межею зерна є одним із елементарних актів пластичної деформації полікристалів

безпечили масовий приплив наукової молоді у цю дослідницьку сферу та дали можливість на доволі високому рівні організувати спеціалізовані лабораторії. Значна частина дослідницьких лабораторій Радянського Союзу була забезпечена саме цими приладами.

Один з перших електронно-мікроскопічних знімків дислокаційної структури деформованих сплавів хрому наведено на мал.3.

Стрімкий розвиток матеріалознавчих досліджень викликав і стрімкий розвиток приладобудування. Крім електронних мікроскопів просвічувального типу, розроблено так звані сканувальні (растрові) електронні мікроскопи. Висока глибина різкозображуваного простору дала

можливість досліджувати глибоко рельєфні поверхні (поверхні зламів). На малюнку наведено типові растрові зображення зламу (а) та глибоко протравленої поверхні (б). Враховуючи ту обставину, що при взаємодії електронів із речовиною відбувається як відбивання електронів приблизно з енергією первинного пучка, так і емісія вторинних електронів, Оже-електронів, характеристичного рентгенівського випромінювання, конструктори побудували спеціальні прилади, які дають змогу як отримувати зображення, так і вивчати мікророзподіл елементів за атомним складом.

Такі прилади — мікроаналізатори — стали невід'ємною складовою сучасних матеріалознавчих лабораторій. Слід зазначити, що такі прилади доволі дорого коштують. Типова ціна сучасного мікроскопа-аналізатора сягає 0,5–1,5 млн. доларів, а в залежності від якості, комплектації додатковим оснащенням, програмним забезпеченням ціна може бути і значно вищою.

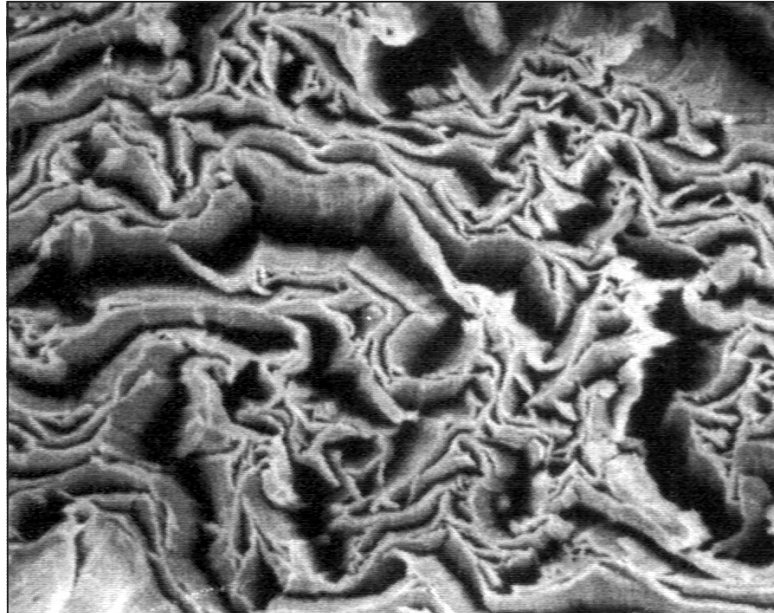
Можна сказати, що такі прилади дали можливість людству освоїти мікрорівень та вийти на так звані наноматеріали та нанотехнології. Під наноматеріалами слід розуміти матеріали, структурні елементи яких мають розмір на рівні 1–100 нанометрів, та які демонструють якісно нові (чутливі до розмірів структурних елементів) властивості. Нанотехнології, однак, це не тільки технології створення таких матеріалів, а й більшою мірою — створення спеціальних виробів як таких, надзвичайно компактних та інформаційномістких.

Розвиток цього важливого напрямку неможливий без подальшого розвитку наукового приладобудування, що дозволяє прецизійне дослідження структури (мікроструктури, наноструктури), а також прецизійне вимірювання властивостей у тому числі на мікроразках. Крім згаданих приладів у близькій мені області (локального електронно-зондового аналізу, аналітичної електронної мікроскопії) зазначимо створення наноінденторів (мікроінденторів) — приладів, що дають можливість отримувати діаграми занурення інденторів (зазвичай це алмазна піраміда) під впливом зростаючого навантаження у поверхню досліджуваного матеріалу (зразка). Не ускладнюючи виклад, зазначу, що в наш час створено методи, які дають можливість з таких діаграм у напівавтоматичному (або навіть і в автоматичному режимі) з достатньо високою точністю отримувати стандартні механічні властивості матеріалів (такі, як модуль пружності, межа плинності, ну і, звичайно, твердість). Дуже важливо, що такі випробування не потребують багато матеріалу. Виміри можна зробити на мініатюрних зразках завбільшки з пігулку. Можна досліджувати властивості покриттів, тонких плівок тощо.

Пригадується розповідь про випадок із академіком Курчатовим, який звернувся до спеціалістів у галузі механічних випробувань за консультацією з приводу можливої оцінки механічних властивостей збагаченого урану. Експерти відповіли, що для коректної оцінки необхідні відносно великого розміру зразки у кількості мінімум три зразки на точку, для виго-

товлення яких необхідно було отримати напівфабрикати вагою декілька кілограмів. Курчатов з певним жалем відзначив, що в нього поки що є в наявності декілька грамів цієї речовини. Звичайно, пізніше, коли було напрацьовано значну кількість матеріалу, такі досліди було виконано. Якби тоді існували новітні методики, такі дані було б отримано достатньо швидко і відносно дешево.

Як було сказано, реальні матеріали в основному являють собою полікристалічні агрегати. Окремі зерна поліедричної форми межують через так звані межі зерен. Науковцями розроблено теорію будови таких меж поділу. Вони навчилися керувати структурою меж зерен, зміцнювати міжзеренну міцність, прецизійно додаючи спеціальні легувальні елементи. Існує цілий науковий напрям — інженерія меж поділу, а в ширшому розумінні — структурна інженерія матеріалів. Елементарні процеси передачі пластичної деформації через межі зерен видно на мал.4. Отримані фундаментальні знання дозволяють технологам розробляти нові технології отримання матеріалів та надання цим матеріалам (або виробам з них)

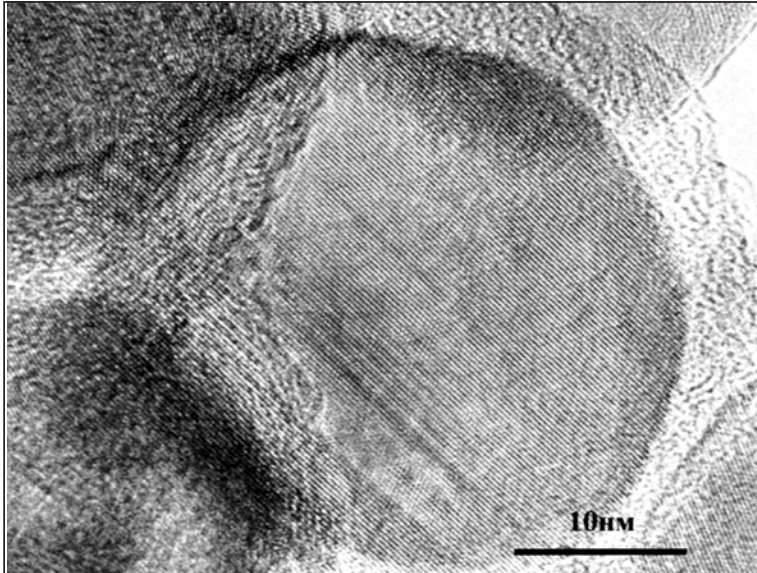


Мал.4. Поверхня руйнування деформованого молібдену. Вісь розтягу перпендикулярна площині знімка. Видно пластичне руйнування елементів структури та тріщини розшарування між елементами структури. Напівжартома фізики іноді називають таку структуру — «мізковий» злам

потрібних властивостей. Вище згадувалося про теоретичну міцність. Зазначимо, що останнім часом, не в останню чергу завдяки застосуванню новітніх прецизійних методів локального аналізу будови та складу матеріалів, вдалося впритул наблизитися до рівнів міцності, твердості, які межують із теоретично можливими. Серед структурних станів, які призводять до отримання таких властивостей дуже перспективними є нанозерна розміром 20–30нм, розділені аморфними прошарками, збагаченими так званими «корисними» домішками.

На мал.5 наведено структуру покриття з малолегованого хрому, отриманого за допомогою магнетронного розпилення. На електронно-мікроскопічному знімку видно структуру покриття з малолегованого хрому, отриманого за допомогою магнетронного розпилення. На електронно-мікроскопічному знімку видно структуру покриття з малолегованого хрому, отриманого за допомогою магнетронного розпилення.





Мал.5. Аморфно-кристалічна структура хрому, отриманого за технологією магнетронного розпилення. Видно нанозерна, розділені аморфними прошарками. Всередині центрального зерна чітко видно сліди атомних площин

скопичному знімку чітко видно окремі досконалі зерна, розділені аморфними прошарками. Всередині зерен чітко видно сліди атомних площин, які розташовані перпендикулярно до площини малюнка. Такі структури характеризуються надзвичайно високою твердістю, близькою до теоретично можливої. Є підстави сподіватися, що наведена структура відповідає гранично можливому рівню міцності.

Що нас очікує у близькому майбутньому? Сучасний рівень розробок дасть можливість істотно урізноманітнити спектр матеріалів, придатних до використання, досягти гранично можливих рівнів зміцнення, розширення спектра можливих температур експлуатації, створити нові технології їх отримання та обробки. Наноматеріали, наночаруваті структури (на-

ноламінати), квазікристали, інтерметалідні сполуки, новітні оптичні матеріали, сцинтиляційні матеріали, аморфні, або частково аморфні матеріали, широкий спектр нових композитів, матеріали з високими питомими властивостями, нові матеріали зі спеціальними властивостями, придатні до використання у різноманітних, в тому числі агресивних середовищах, згадані вище «розумні» матеріали, ма-

теріали з «гумовою» поведінкою, на решті новітні (нешкідливі для організму) біоматеріали — ось далеко неповний перелік перспективних напрямів роботи.

**Декілька слів про наукову політику держави.** Немає жодного сумніву, що Україна має відбутися саме як розвинена високотехнологічна держава. Принаймні нема підстав вважати, що держава, яка входить до дуже невеликого клубу країн, спроможних виготовляти літаки, має зійти з такого високого рівня. Але, звичайно, йдеться не тільки про високе машинобудування. Високі наукоємні технології мають забезпечити поліпшення якості життя, створити сучасний інформаційний простір, сучасні екологічно безпечні та максимально дешеві



транспортні засоби, забезпечити енергетичну незалежність, створити нові різновиди конкурентоздатної продукції, сприяти зміцненню оборонної здатності держави. Такі завдання вирішуються зосередженням зусиль науковців та спеціалістів на пріоритетних напрямках (здоров'я людини, енергетика, нові речовини та матеріали, інформатика, біотехнології та деякі інші).

Водночас на наших очах відбувається і певна структурна та організаційна перебудова науки. За оцінками різних експертів наша наука на момент розпаду Радянського Союзу значною мірою успадкувала орієнтацію на потреби військово-промислового комплексу. Проте за час, що минув, науковці суттєво змінили акценти наукового пошуку. Ця зміна базувалася як на вивченні світових тенденцій у розвитку науки, так і на врахуванні особливостей України, її сировинної бази, наявності кадрового потенціалу. Тому не дивно, що з перших років незалежності України було сформовано нові пріоритетні напрями, частина яких означена вище. Було створено систему Державних науково-технічних програм, фінансування якої (окрім звичайного базового фінансування академічних наукових закладів, вузів, галузевих інститутів) дало змогу відносно невеликим коштом об'єднати зусилля науковців та спеціалістів різних відомств на виконанні спільних комплексних науково-технічних проектів. Цікавим є те, що частина таких проектів була впроваджена на так званих малих та середніх підприємствах. Цей досвід є надзвичай-

но корисним. Як відомо, у розвинених країнах, таких як США, Німеччина, до 60% валового національного продукту створюється малими та середніми підприємствами. Тому наукове забезпечення малого та середнього бізнесу конкурентоздатними рішеннями має стати одним із дуже важливих та відносно недорогих засобів впливу на економіку держави. Накопичено певний досвід у взаємодії з адміністраціями місцевого рівня, що дозволяє вирішувати на належному рівні регіональні задачі.

На жаль, за різних урядів та різних керівників держави відбувалося досить стрімке зниження частки ВВП, що виділялася для потреб науки. Від приблизно 3% у 1991–1993 роках до 0.3% в останні роки. Прикро, що при цьому відбувалося не тільки абсолютне зниження асигнувань на науку, але й відзначене відсоткове. Тобто, на жаль, усі попередні керівники, декларуючи, що багато розуму не буває, на практиці сприяли розвитку кризових явищ. Дозволю собі невеселий жарг. Це зменшення відбувалося водночас із закликом провести ревізію існуючих проектів, відкинути слабкі, або такі, реалізація яких найближчим часом є проблематичною. Це звичайно кожен рік робилося. Тобто, за аналогією з садово-городнім господарством, провадилась певна «прополка». Але ж те, що залишилося та було «висаджено у землю», необхідно угноювати, доглядати. Але так, щоб вже майже й не поливати... Але саме так і відбувалося. Чиновники Мінфіну та Мінекономіки еконо-

мили, як могли. На науці, на розумі, якого нібито багато не буває.

Останнім часом у зв'язку з певним поліпшенням економічної ситуації в країні дещо поліпшилося фінансування науки, почали з'являтися кошти, хоч і в невеликих розмірах, на закупівлю наукового обладнання, матеріалів, для проведення експериментів, поліпшилася видавнича справа. Але, на мою думку, науковці заслужили на більшу увагу. Конче треба збільшити фінансування науки на першому етапі хоча б до рівня 1.7% ВВП.

Науковці здатні до самоорганізації, отож, зуміють на конкурсній грантовій основі доцільно розподілити це фінансування. Необхідно особливу увагу звернути на заохочення притоку до науки здібної молоді. Без пристойної оплати молодих учених (старшого покоління теж) годі думати про майбутнє. Для цього хотілося б, щоб у наші можливості, нашу спроможність повірили не тільки державні мужі, а й суспільство.

Треба переходити від політики виживання до політики розвитку наукової сфери. Це не буде проїдання фінансових вливань. Науковці свідомі свого завдання щодо якнайкращого використання державної (та недержавної) підтримки, необхідності зосередження цих витрат на найважливіших для України напрямках та завданнях. За час, що минув, ми добре зрозуміли необхідність орієнтації цільових досліджень на завдання нової держави, в першу чергу на потреби людини, на економіку, інноваційну політику. Ми навчилися здобувати на конкурсній основі своє

місце у міжнародних проектах. Навчилися брати участь у експертизі, відборі справді перспективних проектів. Державна підтримка необхідна для об'єднання зусиль науковців та фахівців різних відомств для реальної підтримки, наприклад, власного літакобудування, вироблення конкурентоспроможної продукції біомедичного призначення, транспорту, енергетики, добувної галузі, для зменшення енергоємності та матеріалоемності наших виробництв тощо. Очевидно, необхідно, крім прямої підтримки академічної та вузівської науки, відновити систему Державних науково-технічних програм. Можливо, доцільно відтворити структуру на зразок Державного комітету з питань науки і технологій на базі відповідного департаменту Міністерства освіти та науки. Решту зуміємо зробити самі.

**Знову про матеріалознавство!** Вище було зазначено, що розвиток матеріалознавства тісно пов'язаний із переходом від макрорівня до мікрорівня, а в наш час і до нанорівня. Проте прогрес не стоїть на місці. Здавалося б, чи потрібні матеріалознавцям, фізикам роздільні здатності, кращі від нанорівневих? Справді, всередину атомів «подивитися», мабуть, не вдасться ( хоча методи атомної фізики дозволяють достатньо адекватно описати внутрішню будову атомів). Однак за допомогою методів електронно парамагнітного резонансу вдається оцінювати «нецентральність» положення іонів всередині кристалічної ґратки сегнетоелектриків та керувати цією відстанню з метою досягнення оптимального п'єзоефекту; в принципі, досить дав-

но вже навчилися контролювати за допомогою рентгеноструктурних досліджень тонкі зміни симетрії та розмірів кристалічної ґратки при легуванні та різних структурних перетвореннях на рівні сотих нанометра.

А це вже пікометричний рівень. (Пікометр — це тисячна доля нанометра). Нарешті, розробники електронних мікроскопів запропонували

нові підходи до корегування сферичної аберації. Тобто корегувати можна не тільки наш зір. Спеціальні окуляри, розроблені спеціально для корекції зору мікроскопів, дали роздивитися атомні ряди, що перебувають на відстані 78 пікометрів. І це тільки початок нового століття. Можна з певністю сказати — на нас очікує ера пікотехнологій!

