

УДК 538.9+539.3+539.5
PACS 61.50. Ks, 62.20.-x

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕКСТУРИ ПІД ЧАС ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ, ЗУМОВЛЕНОЇ КРИСТАЛОГРАФІЧНИМ КОВЗАННЯМ

Н. Кушніренко, О. Гохман

*Південноукраїнський національний педагогічний
університет ім. К. Д. Ушинського
Інститут фізики та математики
вул. Старопортофранківська, 26, 65020 Одеса, Україна
e-mail: togoznp@mail.ru*

Розглянуто основний механізм реалізації пластичної деформації — кристалографічне ковзання та можливість застосування комп'ютерного моделювання для дослідження текстури під час пластичної деформації. Запропоновано алгоритм визначення активних систем деформації та знаходження нового орієнтування кристаліту за умови одноосьового навантаження заданої орієнтації та величини.

Ключові слова: пластична деформація, кристалографічне ковзання, поворот кристалічної ґратки.

Останнім часом широке розповсюдження отримали методи теоретичного прогнозування текстури із застосуванням методів комп'ютерного моделювання. Це дає змогу проводити чисельний експеримент для вивчення металів під час текстуроутворювальних процесів. Порівняння з експериментальними даними дає можливість перевірити запропоновану фізичну модель, що описує утворення текстури.

Найбільше значення при формуванні текстури має пластична деформація як основний спосіб виготовлення більшості металевих виробів, що використовуються на практиці. Пластична деформація металів є складним фізичним процесом, повна теорія якого на сьогодні відсутня. Більшість наявних сьогодні підходів є розвитком двох основних моделей [1]. Запропонована раніше інша модель Закса [1] припускає, що під час деформації поле напружень у всьому металі збігається з полем напружень в кожному зерні, а деформація відбувається за рахунок кристалографічного ковзання по системах з найбільшим приведеним напруженням. Модель Тейлора [1] заснована на допущенні про однорідність деформації у всьому обсязі металу, а ковзання при цьому повинне відбуватися одночасно по декількох системах. Обидві моделі, по суті, є геометричними і не враховують ні взаємодії

між зернами під час пластичної деформації, ні можливість інших (крім кристалографічного ковзання) механізмів деформації [2].

В роботі зроблено спробу моделювання процесу пластичної деформації матеріалів, що мають гексагональну щільну упаковку (ГЩУ). Розглядалися кристалографічні механізми ковзання, інформація про які відома з експериментальних даних для монокристалів.

З часів класичної роботи Шміда і Боаса кристалографічне ковзання розглядається як основний механізм деформації металів [3]. Ковзання відбувається в певній кристалографічній системі $\{hkl\}\langle uvw \rangle$ в сімействі площин $\{hkl\}$, найбільш густо усаджених атомами, і в напрямках $\langle uvw \rangle$, уздовж яких відстань між атомами мінімальна.

Об'ємноцентровані кубічні (ОЦК) кристалічні структури мають до 48 систем ковзання. Гранецентровані кубічні (ГЦК) кристалічні структури мають 12 систем ковзання. Кристалічні структури з ГЩУ решітками, мають тільки 3 системи ковзання. Відповідно, більшість металів з ГЩУ кристалічною структурою (Mg, Zn, Be) менш піддатливі, ніж метали з ОЦК (W, Fe, K) або ГЦК (Cu, Al, Ni) структурами.

Ковзання може відбуватися в одній або декількох з можливих систем залежно від їхньої орієнтації до осей напружень. Воно починається за умови, що дотичне сколююче напруження τ у цій системі ковзання перевершує визначене для даного матеріалу і режиму деформації критичне напруження зсуву $\tau_{кр}$.

За умови одноосьового навантаження τ визначають за формулою Боаса–Шміда [4]:

$$\tau = |\vec{\sigma}| \cos \eta \cos \varphi, \quad (1)$$

де $\vec{\sigma}$ — вектор зовнішнього напруження; η — кут між $\vec{\sigma}$ і нормаллю до площини ковзання $\{hkl\}$; φ — кут між $\vec{\sigma}$ і напрямом ковзання $\langle uvw \rangle$.

Очевидно, що первинною системою ковзання виявляється та, для якої орієнтаційний фактор ($\cos \eta \cos \varphi$) максимальний, тобто для якої τ при меншому зовнішньому напруженні досягає величини $\tau_{кр}$.

У кристалічних решітках ГЩ-металів найщільнішу упаковку атомів мають три напрями типу $\langle 11\bar{2}0 \rangle$, що лежать в площині базису. Величина міжплощинних відстаней d пов'язана зі значеннями відношення постійних ГЩ-решітки c/a . При значеннях $c/a \leq 1,73$ величина $d \{10\bar{1}0\} \geq d (0001)$ і, навпаки, при $c/a > 1,73$ $d (0001) >$ величина $d \{10\bar{1}0\}$. Для цирконію, кобальту, магнію, берилію це співвідношення знаходиться в межах 1,57–1,63, і площинами з максимальними міжплощинними відстанями є в порядку зменшення площини $\{10\bar{1}0\}$, (0001) і $\{10\bar{1}1\}$. Всі вказані площини містять напрями $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ з найщільнішою упаковкою атомів і складають системи ковзання $\{10\bar{1}0\}\langle 11\bar{2}0 \rangle$, $(0001)\langle 11\bar{2}0 \rangle$ і $\{10\bar{1}1\}\langle 11\bar{2}0 \rangle$.

В табл. 1 наведено значення критичних напружень зсуву в різних системах ковзання за кімнатної температури, обчислені за формулою (1) з використанням величин меж текучості монокристалів різної орієнтації [1, 3].

Для цинку і магнію спостерігається перевага базисного ковзання, а для титану — призматичного.

Табл. 1. Критичні напруження зсуву в різних системах ковзання для цинку, магнію і титану за кімнатної температури

Метал	c/a	$\tau_{кр}$ (кгс/мм ²) для систем ковзання		
		(0001) \langle 11 $\bar{2}$ 0 \rangle базисна	{10 $\bar{1}$ 1} \langle 11 $\bar{2}$ 0 \rangle пірамідальна	{10 $\bar{1}$ 0} \langle 11 $\bar{2}$ 0 \rangle призматична
Цинк	1,86	0,018–0,025	–	–
Магній	1,62	0,046	0,052	4,0
Титан	1,59	6,327	–	1,406

Для оцінки вірогідності ковзання в напрямі \langle 11 $\bar{2}$ 0 \rangle за площинами базису, призми і піраміди слід враховувати не тільки відношення критичних напружень зсуву, але і орієнтацію осі прикладених напружень.

Загальною тенденцією під час пластичної деформації є прагнення напрямку ковзання повернутись до осі навантаження, характерної для схеми напруженого стану, що застосовується.

Певні обмеження на геометрію ковзання також накладає стисненість деформації. Виконання умови стисненості деформації вимагає, щоб три вектора — вісь навантаження, нормаль до площини ковзання і напрямок ковзання — знаходилися в одній площині, умовно її називають площиною деформації.

У статті запропоновано алгоритм визначення активних систем деформації та знаходження нового орієнтування кристаліта за умови одноосьового навантаження заданої орієнтації і величини.

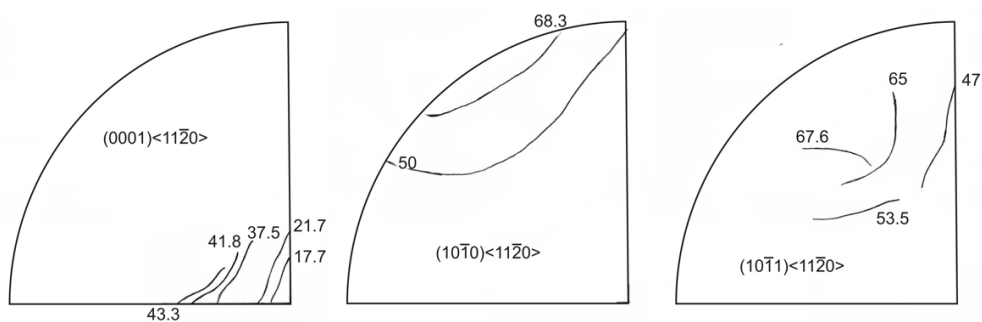


Рис. 1. Дотичне сколююче напруження для систем ковзання (0001) \langle 11 $\bar{2}$ 0 \rangle , {10 $\bar{1}$ 0} \langle 11 $\bar{2}$ 0 \rangle , {10 $\bar{1}$ 1} \langle 11 $\bar{2}$ 0 \rangle для монокристалу магнію

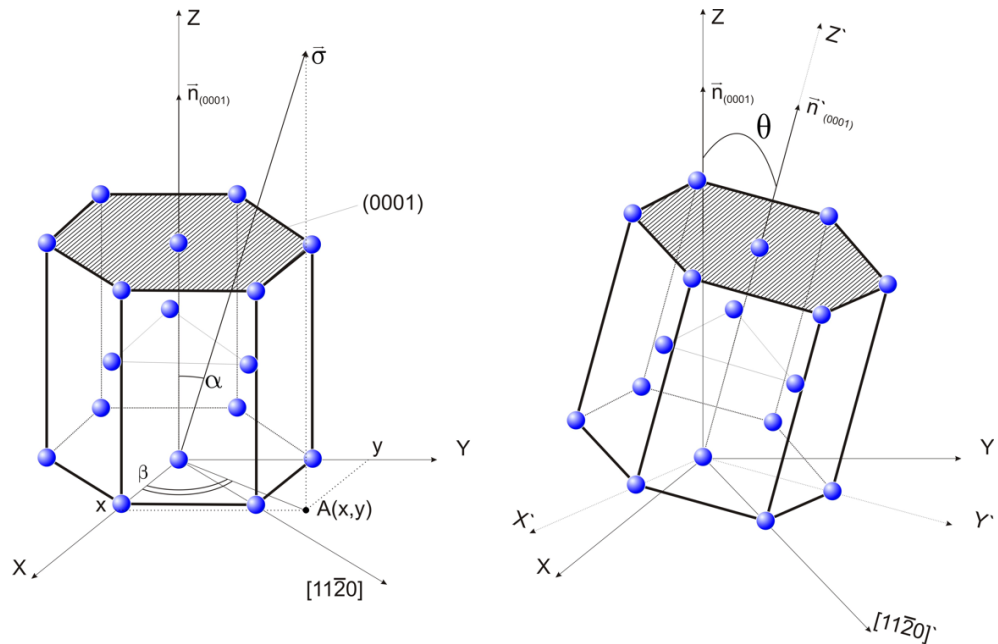


Рис. 2. Схема переорієнтування монокристалу магнію під час активізації базисної системи ковзання

Розроблено комп'ютерну програму, за допомогою якої проведено теоретичне дослідження впливу орієнтації осі прикладеного напруження і його величини, а також відношення параметрів ГЦУ ґраток c/a на активацію тієї або іншої системи. Отримано, що для металів з $c/a \geq 1,62$ (Zn, Mg) спостерігається перевага базисного, ковзання (узгоджується з літературними даними), причому для монокристалу магнію виявлено залежність дотичного сколюючого напруження τ кожної системи від кутів α, β , якими задається вектор зовнішнього навантаження: при зростанні α від 0° до 90° послідовно спрацьовують базисна, призматична та пірамідальна системи ковзання. На рис. 1 показано ізолінії значень сколюючого напруження для окремого випадку ($\sigma = \text{кгс}/\text{мм}^2$) для трьох кристалографічних систем.

Проаналізовано можливість переорієнтування кристалітів в залежності від величини і орієнтації прикладеного напруження. Наприклад, при σ , заданій кутами $\alpha = 15^\circ$, $\beta = 30^\circ$ активізується базисна система ковзання та кристаліт намагається переорієнтуватися ($\theta = 15^\circ$) (рис. 2).

Запропонована методика дозволяє проводити теоретичне прогнозування текстуроутворення в металах з різними кристалічними ґратками (різні системи ковзання) для довільної величини і орієнтації прикладеного навантаження, а також прогнозувати можливість переорієнтування кристалів у результаті дії зовнішнього навантаження в умовах стисненості деформації.

1. *Вишняков Я. Д.* Теория образования текстур в металлах и сплавах / Я. Д. Вишняков, А. А. Бабарэко, С. А. Владимиров, И. В. Эгиз – М. : Наука, 1979. – 343 с.
2. *Скрытний В. И.* Методика компьютерного моделирования пластической деформации металлических поли- и монокристаллов / В. И. Скрытний // Научная сессия МИФИ – 2003. Сборник научных трудов. – М., 2003 – Т. 9 : Перспективные наукоемкие технологии. Физика, химия и компьютерная разработка материалов. – С. 174–177.
3. *Кайбышев О. А.* Пластичность и сверхпластичность металлов / О. А. Кайбышев – М. : Металлургия, 1975. – 280 с.
4. *Бородкина М. М.* Рентгенографический анализ текстуры металлов и сплавов / М. М. Бородкина, Э. Н. Спектор – М. : Металлургия, 1981. – 272 с.

THEORETICAL STUDY OF TEXTURE UNDER PLASTIC DEFORMATION BY CRYSTALLOGRAPHIC SLIP

N. Kushnirenko, O. Hoxhman

*South Ukrainian National Pedagogical University
named after K. D. Ushinsky
The Institute of Physics and Mathematics
Staroportofrankivs'ka str., 26, 65020 Odesa, Ukraine
e-mail: moroznp@mail.ru*

In the article is reviewed main mechanism of plastic deformation realization — crystallographic slip and ability usage of computer simulation for study texture under plastic deformation. It is introduced algorithm of determination active deformation systems and finding new orientation crystallite under uniaxial applied stress given orientation and value.

Key words: plastic deformation, crystallographic slip, crystal lattice rotation.

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕКСТУРЫ
ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЗА СЧЕТ
КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО СКОЛЬЖЕНИЯ**

Н. Кушніренко, О. Гохман

*Южноукраинский национальный педагогический
университет им. К. Д. Ушинского
Институт физики и математики
ул. Старопортофранковская, 26, 65020 Одесса, Украина
e-mail: moroznp@mail.ru*

Рассмотрен основной механизм реализации пластической деформации — кристаллографическое скольжение и возможность использования компьютерного моделирования для исследования текстуры при пластической деформации. Предлагается алгоритм определения активных систем деформации и нахождения новой ориентации кристаллита при одноосной нагрузке заданной ориентации и величины.

Ключевые слова: пластическая деформация, кристаллографическое скольжение, поворот кристаллической решетки.

Статтю отримано: 19.05.2010
Прийнято до друку: 14.07.2011