

І.Я. Петрик

## Вплив твердофазових перетворень на пластичність сталей

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна, e-mail: iyap@ukr.net.*

Проведено аналіз пластичності сталей в залежності від концентрації легуючого елементу. На прикладі дослідження границі міцності ( $\sigma_{0,2}$ ) залізвуглецевих та залізхромових сталей показано, що пластичність металів залежить від твердофазових перетворень.

**Ключові слова:** пластичність, границя міцності, твердофазові перетворення, діаграма стану.

*Стаття поступила до редакції 15.11.2014; прийнята до друку 15.12.2014.*

### Вступ

Для опису механічних властивостей твердих тіл використовують різноманітні моделі: двохатомна та трьохатомна моделі твердих тіл, модель електронних зарядів, кінетична теорія міцності, модель пластичних твердих тіл, крихкого руйнування та ін. [1]. Кожна з цих моделей задовільно описує експериментальні результати міцнісних властивостей металів. Незважаючи на існування значної кількості моделей, відповіді на ряд запитань є суперечливі. Тому, дана робота присвячена аналізу сучасних уявлень про міцність і пластичність твердих тіл.

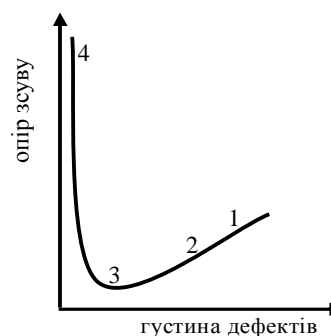
На даний час фізика міцності і пластичності базується на твердих переконаннях, що для зсуву атомних площин у кристалічній ґратці ідеальної будови необхідні високі навантаження. Невідповідність теоретичних розрахунків реальній міцності металів пояснюють наявністю дефектів – дислокацій.

Вважається, що при кімнатних температурах в реальних кристалах присутні дислокації, які і забезпечують пластичну деформацію кристалу при відносно невеликих зовнішніх напруженнях.

Узагальнення поглядів на міцність пластичних твердих тіл відображає якісна класична залежність опору зсуву від густини дефектів у металах (рис. 1).

Згідно класичної теорії міцність металу зростає із зменшенням густини дефектів (ділянка кривої 4-3, рис.1) та зростає із збільшенням дефектів (ділянка кривої 3-1, рис.1), тобто має мінімум в т. 3 (рис.1). Вирощування бездефектних кристалів металів при температурі вище 0 °К є неможливим у зв'язку з тепловим рухом молекул, тому виникнення дефектів в одиниці об'єму є високоймовірним. Із зменшенням розмірів монокристалів ймовірність виникнення дефектів знижується, що і спостерігається при

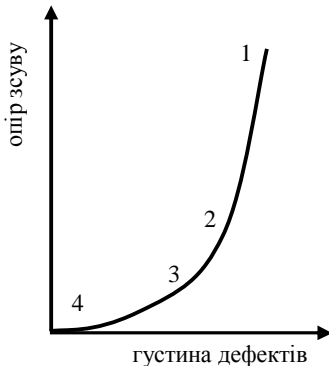
отриманні бездефектних віксерів («вусів»). Причому, із зменшенням діаметру «вусів» їх міцність зростає. Оскільки їх товщина  $< 10^{-6}$  м і вони обмежені поверхнею з деформованим шаром близько 10 атомних площин то в даному випадку зусилля, яке ми прикладаємо, щоб зсунути атомні площини монокристала витрачається, в основному, на деформацію поверхні «вусів». Крім того, слід враховувати, що на поверхні металу можуть утворитися оксиди або інші хімічні сполуки [2].



**Рис. 1.** Якісна залежність опору зсуву від густини дефектів: 1 – технічні метали і сплави, 2 – полікристали чистих металів, 3 – масивні металічні монокристали, 4 – віксери або так звані «вуса».

Як альтернативу даній моделі, пластичність металів пов'язують із нестійкістю кристалічної ґратки, яка викликана зближенням атомів на відстань меншу за рівноважну. Згідно даної моделі, залежність опору зсуву від густини дефектів у металах зображено на рис.2.

Обидві моделі узгоджуються в тому, що із збільшенням густини дефектів міцність зростає. Тоді міцність аморфних металів має бути найвищою. Проте, модуль пружності аморфних металів менший



**Рис. 2.** Якісна залежність опору зсуву від густини дефектів: 1 – віксери або, так звані, «вуса», 2 – технічні метали і сплави, 3 – полікристали чистих металів, 4 – масивні металічні монокристали.

на 30 % в порівнянні з їх кристалічним аналогом [3]. Очевидно при досягненні певної густини дефектів міцність металів досягає максимуму і наступне їх збільшення приводить до зниження міцності.

## I. Аналіз експериментальних даних та їх обговорення

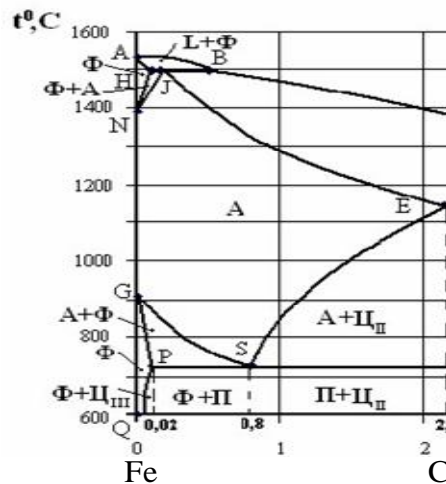
Розглянемо границю міцності ( $\sigma_{0,2}$ ) деяких чистих металів та бінарних сплавів. Наприклад, границя міцності для алюмінію рівна  $4 - 6 \cdot 10^6$  Па [2]. Низька пластичність алюмінію пов'язана з низькою температурою плавлення ( $660 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Для армко-заліза границя міцності рівна  $27 \cdot 10^6$  Па [2] (температура плавлення Fe  $1550 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Не значна різниця у величині границі міцності при такій суттєвій різниці в температурах плавлення вказує на те, що в залізі включається якийсь механізм, який підвищує пластичність металу. Ймовірно, таким механізмом виступає поліморфне перетворення. Різниця між температурами плавлення алюмінію і поліморфного перетворення заліза ( $910 \text{ }^\circ\text{C}$ ) є незначною, а отже їх пластичність суттєво не відрізняється.

Найбільш широко застосовуються залізвуглецеві сплави, тому проведемо аналіз їх пластичності. Припустимо, що концентрація домішкових елементів незначна і вони присутні в однаковій кількості для кожної сталі, яку ми розглядаємо, тому ми розглядаємо, тому міцність металів визначається тільки концентрацією вуглецю. Границя міцності при температурі  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  для залізвуглецевих сталей в залежності від концентрації вуглецю змінюється в межах  $200 - 900 \cdot 10^6$  Па [4]. Границя міцності сталі У8 є найбільшою і рівна  $1230 \cdot 10^6$  Па [4]. Подальше збільшення вуглецю призводить до зменшення границі міцності. Для сталі У12 границя міцності при аналогічних умовах випробовування ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) рівна  $325 \cdot 10^6$  Па [4]. Даний результат можна пояснити впливом твердофазових  $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -перетворень.

Оскільки реальні метали є анізотропними то в результаті дії зовнішніх впливів (технологічних та експлуатаційних процесів) надана їм енергія (і, як

результат, зміна температури) передається не всьому матеріалу одночасно, а певному його об'єму, утворюючи таким чином флуктуації енергії (температури). За рахунок таких флуктуацій в мікрооб'ємах кристалічної ґратки заліза відбувається поліморфне  $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -перетворення. В момент перебудови ґратки метал є надпластичним, оскільки його атоми можуть вільно переміщатися. Крім того, твердофазні перетворення є генераторами дефектів [5, 6], що в свою чергу, згідно класичної теорії, збільшує пластичність.

На діаграмі стану (рис.3) [7] видно, що для сталі з концентрацією вуглецю 0,8 % твердофазні перетворення відбуваються при сталій температурі. В той же час для сталей з іншою концентрацією вуглецю (доевтектоїдні чи заевтектоїдні сталі) перетворення ґратки відбуваються в інтервалі температур, що збільшує ймовірність твердофазових перетворень під впливом флуктуацій [8]. Отже, для сталі У8 ймовірність твердофазових  $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -перетворення є мінімальною, що і забезпечує даній сталі найвищу міцність.



**Рис. 3.** Фрагмент діаграми стану Fe – C.

Дослідимо пластичність сталі в залежності від концентрації хрому. Так як і в попередньому випадку, припустимо, що концентрація домішкових елементів незначна і вони присутні в однаковій кількості для кожної сталі, яку ми розглядаємо, тому міцність сплавів визначається тільки концентрацією хрому. Границя міцності сталі 40X при температурі  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  рівна  $780 \cdot 10^6$  Па, при температурі  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $140 \cdot 10^6$  Па, при температурі  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $24 \cdot 10^6$  Па [4]. Збільшення концентрації хрому до 13 % приводить до зменшення пластичності. Границя міцності стали 40X13 при температурі  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  рівна  $1420 \cdot 10^6$  Па, при температурі  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $225 \cdot 10^6$  Па, при температурі  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $51 \cdot 10^6$  Па. Згідно діаграми стану Fe – Cr (рис.4) при концентрації хрому до 12 % у сплаві можуть відбуватися твердофазні  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  перетворення заліза [4]. При збільшенні концентрації хрому сплав утворює неперервний ряд твердих розчинів в широкому концентраційному інтервалі аж до температури плавлення. Відсутність твердофазних перетворень в сталі 40X13, пояснює її низьку пластичність, яка

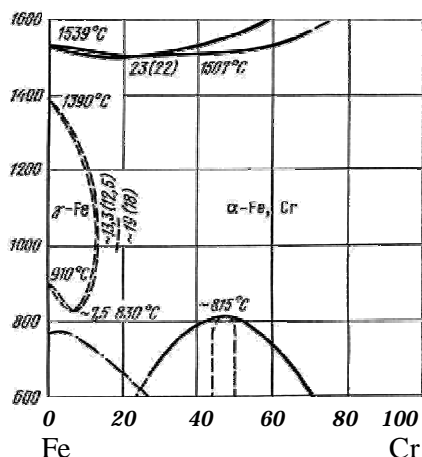


Рис. 4. Фрагмент діаграми стану Fe – Cr.

зберігається і при високих температурах.

Часто для зміцнення сталі використовують борування поверхневого шару. Аналіз діаграми стану показав, що при концентрації бору > 30 % сплави мають високу міцність та жаростійкість, що добре узгоджується з експериментальними даними.

Проаналізуємо діаграму стану залізо-титанових сплавів. Міцність залізотитанових сплавів можна

пояснити відсутністю фазових перетворень. Залізо втрачає можливість поліморфних перетворень при концентрації титану 0,75 % [5, 7].

Залізо з титаном утворює хімічні сполуки  $TiFe_2$  та  $TiFe$  з широкою областю гомогенності. Дані сполуки є стабільними в широкому діапазоні температур, що спричиняє високу їх крихкість. Сплави заліза з бором також є крихкими, оскільки мають стійкі хімічні сполуки  $Fe_2B$ ,  $FeB$ . Крихкість борованих сталей є меншою порівняно з титановими, що ймовірно пов'язано із існуванням вузької області гомогенних сполук. Залізохромові сталі не утворюють хімічних сполук, а отже і не мають високої крихкості.

## Висновки

Пластичність та міцність металів пов'язані із твердофазовими  $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -перетвореннями. Більшу пластичність мають сталі, в яких концентрація домішкових елементів дозволяє  $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -перетворення. Використовуючи діаграми стану можна якісно оцінювати механічні властивості металів.

*Петрик І.Я.* – к.т.н., доцент.

- [1] L.Ju. Kozak. Plastichnist' metaliv i nestijkist' kristalichnoї grutki. (Ivano-Frankivs'k: Ivano-Frankivs'kij nacional'nij tehničnij universitet nafni i gazu, 2004).
- [2] B. Chalmers. Fizicheskoe metallovedinie. Per. s ang. pod red. A.K. Natansona. (Metallurgija, M. 1963).
- [3] K. Sudzuki, H. Fudzimori, K. Hasimoto. Amorfnye metally. Per. s japonskogo pod red. I.B. Kekalo. (Metallurgija, M. 1987).
- [4] V.G. Sorokin, A.V. Volosnikova, S.A. Vjatkin i dr. Marochnik stalej i splavov. (Mashinostroenie, M. 1980).
- [5] P.I. Mel'nik. Diffuzionnoe nasyshhenie zheleza i tverdofaznye prevrashhenija v splavah. (Metallurgija, M. 1993).
- [6] I.Ja. Petrik, I.V. Cidilo, V.Ja. Loburak. Fiziko-himichni osnovi defektoutvorennja metaliv. Mizhnarodna naukovno-tehnična konferencija «Materiali dlja roboti v ekstremal'nyh umovah-4». – Kіiv 2012. S. 65-67.
- [7] Diagrammy sostojanija dvojnih metallicheskih sistem: Spravochnik v 3 T / Pod red. N.P. Ljakisheva. – (Mashinostroenie, M. 1996).
- [8] I.Ja. Petrik. Tverdofazovye prevrashhenija kak sostavlajushhaja mehanizma plastichnosti metallov. Sed'maja mezhdunarodnaja konferencija «Materialy i pokrytija v jekstremal'nyh uslovijah: issledovanija, primenenie, jekologicheski chistye tehnologii proizvodstva i utilizacii izdelij» – p.g.t. Kaciveli (AR Krym), 2012. S 164.

I.Ya. Petryk

## Effect of Solid-Phase Transformations on Plasticity Steels

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,  
15 Karpatska Str., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine, E-mail: [iyap@ukr.net](mailto:iyap@ukr.net).*

Plasticity steels as dependence on concentration alloying element is researched. By example of researching ultimate strength ( $\sigma_{0.2}$ ) iron-carbon and iron-chrome steels is shown, that plasticity of metals depend on the solid-phase transformations.