

Л. І. ВАКУЛЕНКО, М. А. ГРИЩЕНКО (ДІІТ)

## ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДЕФОРМАЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ В ОБ'ЄМАХ ОКРЕМИХ ЗЕРЕН ПОЛІКРИСТАЛІВ

Розглянуті питання оцінки мікротвердості при зміні навантаження на індентор при навантаженнях в одне і те ж місце зразка.

Рассмотрены вопросы оценки микротвердости при изменении загрузки на индентор при условиях нагружения в одно и то же место образца.

The questions of microhardness estimate in changing the loading on indenter, if the same place of a sample is loaded, are considered.

Відомо, що спроможність полікристалічних однофазних сплавів до деформаційного зміцнення значною мірою зв'язана не тільки зі станом металу на великокутових границях [1], а й із твердорозчинним зміцненням в межах окремого зерна [2]. Аналіз відомих експериментальних даних [3] з використанням розробленої методики побудови кривої навантаження для окремого зерна [4] свідчать, що відхилення від монотонного ходу кривої, що спостерігаються, можуть бути обумовлені неоднорідним розподілом хімічних елементів, які входять до складу сплаву, та іншими впливами.

Метою дослідження є спроба визначення зміни напруження в мікрооб'ємі низьковуглецевої сталі в залежності від ступеню навантаження.

Матеріалом для дослідження була низьковуглецева сталь з кількістю вуглецю 0,01 %. Для отримання полідрічного феритного зерна сталь піддавали гарячій формуючій операції, далі була витримка в печі до 0,5 год при температурі 900...910 °С, з остаточним охолодженням з пічкою. Вимірювання мікротвердості здійснювали за допомогою приладу ПМТ-3, діапазон навантаження на індентор складав значення 1...5 грамів. З метою запобігання впливу наклепаного шару металу на значення мікротвердості, після операції шліфування та полірування, поверхню шліфа піддавали електролітичному розчиненню в хлорно-оцтовому електроліті [5].

Порівняно з відовими методиками оцінки спроможності металевих полікристалічних зразків до деформаційного зміцнення, коли використовують підхід, заснований на усередненні поведінки окремих зерен [1, 2], розробка методики з побудови кривої навантаження для одного зерна [4] – є крок у напрямку оцінки пове-

ділки при навантаженні металу в межах одного зерна. Дійсно, як показано в [3], будова кривої деформації для мікрооб'ємів, які обмежені великокутовими границями, дозволяє оцінити характер розвитку пластичної деформації і зв'язаного з нею деформаційного зміцнення. Однак, будова кривої навантаження в істинних координатах, порівняно з кривою в координатах  $P_i - d_i$ , не дала очікуваних результатів. Існування в межах зерна полікристала фрагментів, які відокремлені один від одного малокутовими границями, приводить до порушення монотонного ходу кривих наведених співвідношень. Криві будують за співвідношеннями:

$$\sigma_i - \varepsilon'_i, \text{ де } \sigma_i = \frac{P_i}{d_i^2}, \quad \varepsilon'_i = \ln\left(\frac{d_i}{d_o}\right), \quad \sigma_i, \varepsilon'_i - \text{іс-}$$

тинні напруження і деформація відповідно,  $P_i, d_i$  – тепучі значення навантаження на індентор приладу ПМТ-3, діагоналі відбитка,  $d_o$  – початкове значення діагоналі. Одним із рішень, яке спрямоване на усунення наведених недоліків із впливу малих розорієнтацій в межах визначеного зерна полікристала на експериментальні дані (для будови кривої навантаження), може бути розробка методики вимірювання мікротвердості в залежності від послідовного підвищення навантаження на індентор, при його зануренні в одне і те ж місце. Для інтервала значень 1...5 г, для одного вибраного зерна фериту, на рис. 1 наведено співвідношення між  $P_i$  і  $d_i$  при зануренні індентора в різні місця зерна і в одне і те ж місце, при досягненні сумарного однакового навантаження. Крива (1) показує співвідношення  $P_i - d_i$  за методикою [4] (навантаження в різні місця зерна фериту).

Крива (2) відповідає умовам:  $P_i = 1$  г, в дійсності складається з двох занурень індентора в

одне і теж місце по 0,5 г;  $P_i = 4$  г – занурення індентора чотири рази при навантаженні в 1 г в одне і те ж саме місце. На основі аналізу експериментальних даних, які наведені на рис. 1, можна спостерігати достатньо якісне співпадіння ходу кривих (1) і (2) при відносно малих рівнях навантаження (до 3 г). При більш великих кількостях навантаження (наприклад 5 разів по 1 г) розвиток процесів релаксації внутрішніх напружень, в період розвантаження та деформаційного зміцнення під час наступного навантаження, приводять до відхилень від монотонного ходу кривих (рис. 1).

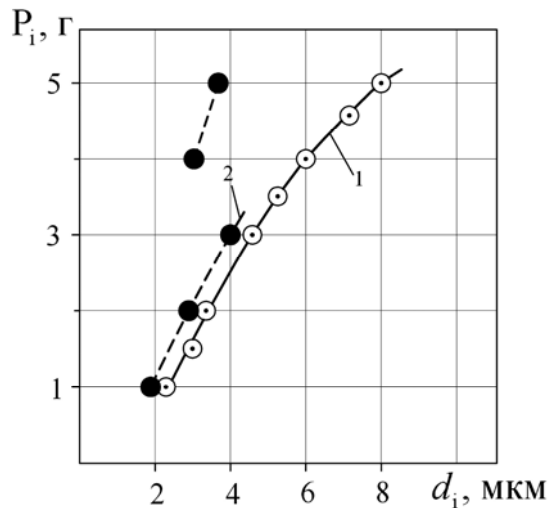


Рис. 1. Для окремого зерна фериту вигляд співвідношення між навантаженням на індентор ПМТ-3 ( $P_i$ ) і розміром діагоналей відбитка ( $d_i$ ) при вимірюванні в різних місцях зерна (1) і чисельних навантаженнях в одне і теж саме місце (2)

З метою поглибленого аналізу були проведені системні дослідження по визначенню співвідношення  $P_i - d_i$  за двома методиками будови кривої навантаження. Позначимо методику будови кривої навантаження при зануренні індентора в різні місця зерна (I), в одне і те ж місце (II). На рис. 2, а наведено зовнішній вигляд співвідношень  $P_i - d_i$ , які відповідають методикам I, II (криві (1) і (2) відповідно). Експериментальні дані, які відповідають кривій II, отримані при навантаженнях в одне і те ж місце за схемою, коли перше навантаження дорівнювало 1 г, а вантаж на інденторі послідовно збільшували. Так, при другому зануренні індентора навантаження складало значення вже 1,5 г, а записували  $\sum = 1 + 1,5 = 2,5$  і відповідне значення  $d_i$  в мкм (11,4 мкм). Для третього  $P_i = 2$  г, а в дійсності записували

$\sum = 1 + 1,5 + 2 = 4,5$  г, а  $d_i = 12,6$  мкм, та інш. Останнє значення було  $P_i = 5$  г, а в дійсності  $\sum = 1 + 1,5 + \dots + 5 = 27$  г,  $d_i = 23,7$  мкм.

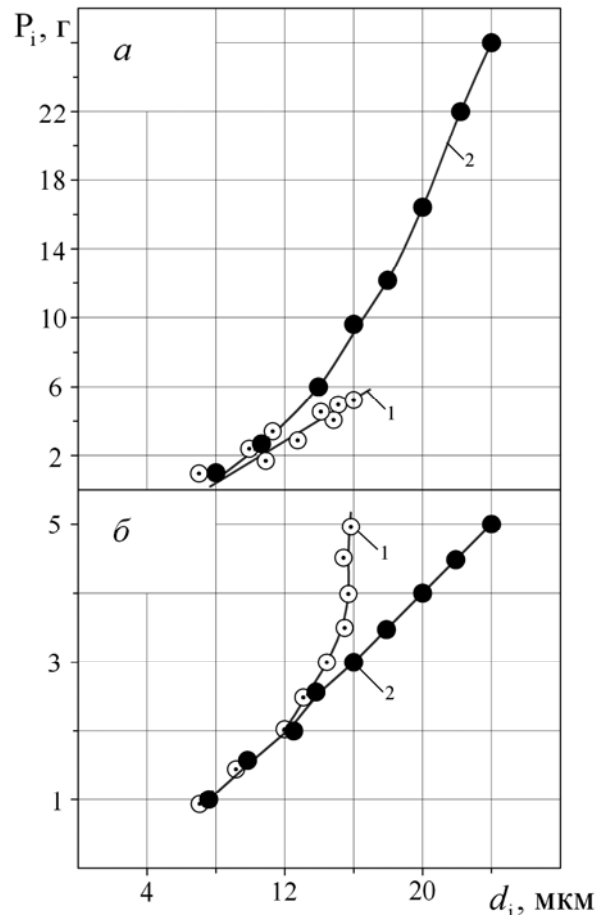


Рис. 2. Співвідношення між  $P_i$  і  $d_i$  за умовами навантаження на індентор для визначеного зерна фериту для різних місць (1) і в одне і теж саме місце (2). Абсолютна сума всіх навантажень (а), за відніманням попередніх навантажень (б)

Але, як було визначено раніше, неврахування впливу релаксаційних процесів при розвантаженні системи обов'язково буде впливати на зовнішній вигляд співвідношення (рис. 2). Дійсно, порівняльний аналіз побудованих кривих указує на існування розбіжностей (рис. 2 а). Причому, чим більше подрібнення навантаження, тим більше відхилення порівняно з методикою I. З метою врахування впливу розвитку релаксаційних процесів була зроблена спроба перерахування величини  $P_i$  шляхом віднімання попередніх значень, так щоб величина навантаження співпадала з аналогічною характеристикою ( $P_i$ ) для кривої за методикою I. В результаті розрахунків була побудована крива 2, наведена на рис. 2, б.

На основі отриманих результатів, були розраховані значення  $\sigma_i = \frac{P_i}{d_i^2}$  та  $\varepsilon'_i = \ln\left(\frac{d_i}{d_0}\right)$ , співвідношення яких, у вигляді кривої навантаження в істинних координатах наведено на рис. 3. Наведена крива (2) має достатньо якісно виражені області, яким відповідають відомі процеси зміни внутрішньої будови металу під час навантаження.

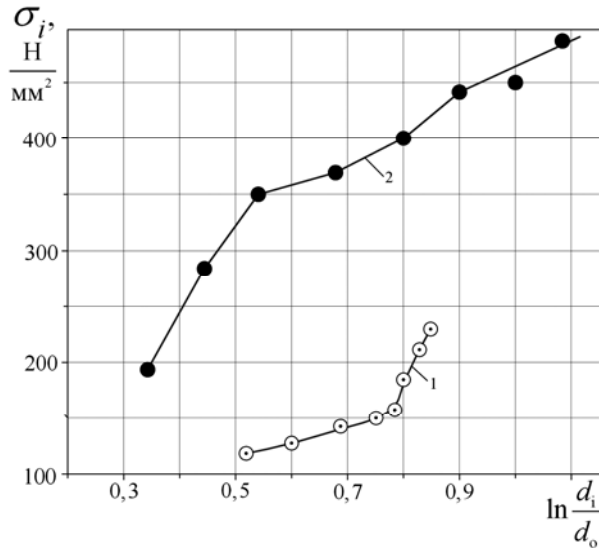


Рис. 3. Криві навантаження, які побудовані в істинних координатах. Позначення такі, як на рис. 1, 2

Таким чином, використання методики визначення співвідношення між послідовними навантаженнями в одне і те ж місце зерна полі-

крystalа може розглядатись як варіант можливої оцінки спроможності металу до деформаційного зміцнення. Крім цього, для вдосконалення методики оцінки необхідні подальші дослідження впливу релаксаційних процесів на отримані результати.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бабич, В. К. Деформационное старение стали [Текст] / В. К. Бабич, Ю. П. Гуль, И. Е. Долженков. – М.: Металлургия, 1972. – 320 с.
2. Вакуленко, И. А. О связи величины  $\sigma_0$  кривой деформации с параметрами уравнения Холла-Петча [Текст] / И. А. Вакуленко, В. А. Пирогов, В. К. Бабич // Металлофизика. – 1986. – т. 8, № 6. – С. 61-64.
3. Вакуленко, Л. И. Методика построения кривой деформации для отдельных зёрен поликристалла [Текст] / Л. И. Вакуленко, Н. Н. Грищенко // В кн.: Стародубовские чтения. – 2006. – С. 17-20.
4. Патент № 183169 [Текст] / М. М. Грищенко, Л. И. Вакуленко, А. Л. Пуларія. – 2006, Бюл. № 11.
5. Попилов, Л. Я. Электрополирование и электро травление металлографических шлифов [Текст] / Л. Я. Попилов, Л. П. Зайцева. – М.: Металлургиздат, 1955. – 196 с.

Надійшла до редакції 09.12.2008.