

УДК 539.67

PACS 62.40.+i

Внутрішнє тертя пластично здеформованих ферромагнітних полікристалів у магнітному полі

Т.М. Рохманова¹, М. Я. Рохманов²

¹Харківський національний дослідницький університет ім. В.Н. Каразіна МОН України,
Україна, 61077, м. Харків, пл. Свободи 4

²Харківський національний аграрний університет ім. В.В. Докучаєва МАП України,
Україна, 62483, м. Харків, п/в «Комуніст-1», учбове містечко ХНАУ

Проведені дослідження впливу на внутрішнє тертя d заліза та нікелю магнітних полів різної напруженості H , амплітуди пружної деформації g та ступеня пластичної деформації e . Показано, що найбільш чутливою до ступеня пластичної деформації у відпалених ферромагнітних перехідних металах є внутрішнє тертя в області максимуму на залежності $d(H)$.

Ключові слова: внутрішнє тертя, ферромагнітні перехідні метали, пластична деформація, амплітудна залежність внутрішнього тертя, магнітопружний гістерезис.

Проведены исследования влияния на внутреннее трение d железа и никеля магнитных полей разной напряженности H , амплитуды упругой деформации g и степени пластической деформации e . Показано, что наиболее чувствительной к степени пластической деформации в отожженных образцах ферромагнитных переходных металлов является внутреннее трение в области максимума на зависимости $d(H)$.

Ключевые слова: внутреннее трение, ферромагнитные переходные металлы, пластическая деформация, амплитудная зависимость внутреннего трения, магнитоупругий гистерезис.

The influence on internal friction d of iron and nickel the magnetic field of different intensity and elastic deformation amplitude g and plastic deformation degree e have been investigated. It has been shown in annealed samples of ferromagnetic transition metals more sensitive to plastic deformation degree is internal friction in area of maximum on $d(H)$ dependence.

Keywords: internal friction, ferromagnetic transition metals, plastic deformation, amplitude dependence of internal friction, magnetoelastic hysteresis.

Вступ

Загальною тенденцією впливу пластичної деформації на внутрішнє тертя (ВТ) ферромагнітних перехідних металів є зменшення як рівня, так і кута нахилу амплітудної залежності внутрішнього тертя (АЗВТ), що пов'язується головним чином з внутрішніми напруженнями [1], які перешкоджають руху дислокацій та доменних меж, формуванням комірчастої структури та змінами її морфології [1-4]. Це відповідає теорії деформаційного зміцнення, уявленням про поведінку окремих складових ВТ під дією пластичної деформації [5-8], теоретичним аспектам впливу густини дислокацій на магнітну складову ВТ, що опрацьована на рівні феноменології в [3].

У той же час вивчення сучасної наукової літератури показує, що до цього часу висновки щодо впливу пластичної деформації на ВТ у відпалених (чи рекристалізованих до стадії збиральної рекристалізації після попередньої пластичної деформації) ферромагнітних металах робиться без урахування

магнітної складової ВТ. Так, зокрема, в праці [4] щодо впливу пластичної деформації на межу пружності та демпфіруючі властивості нікелю електронно-променевого переплаву чистотою 99,996% магнітну складову ВТ фактично не беруть до уваги. І хоча основна тенденція спаду ВТ від ступеня пластичної деформації e також спостерігається, ВТ після пластичної деформації близько 12% змінює тенденцію спаду на поступовий монотонний ріст, який триває аж до 23% пластичної деформації, що є несподіваним, та не спостерігалось у більш ранніх роботах на нікелі [2].

Тому метою роботи було встановлення впливу пластичної деформації на характеристики внутрішнього тертя полікристалів ферромагнітних перехідних металів у магнітному полі різної напруженості в інтервалі ступенів пластичної деформації 0 - 25%.

Методика вимірювання внутрішнього тертя та об'єкти досліджень

Для вирішення поставленої мети використовувалась

вакуумна установка, в основу конструкції якої покладено принцип крутильного маятника [9]. Обґрунтування доцільності використання релаксатора для дослідження ранніх стадій мікропластичності шляхом високоамплітудного деформування і пластичної деформації викладені в працях [1, 5, 10]. Оскільки основними залежностями, які були виміряні на цьому етапі досліджень, були польові і амплітудні залежності ВТ, важливо відмітити, що було використано діапазон амплітуд деформацій від $\gamma = 1,0 \times 10^{-4}$ до $\gamma = 1,3 \times 10^{-5}$ для маловивчених проміжних частот коливань 45-100 Гц при сталій температурі Т, що підтримувалась на рівні 290 К. Розрахунок амплітуди крутильних коливань зразків здійснювали за формулою:

$$\gamma = \frac{A_3 r}{2L_0 l},$$

де A_3 - ширина розмиття світної плями лазера на шкалі (за вирахуванням ширини променя);

r - радіус поперечного перерізу зразка (1,5-1,7 мм),

l - довжина робочої частини зразка (20-25 мм).

Логарифмічний декремент загасаючих коливань δ , що був мірою внутрішнього тертя Q^{-1} , розраховувався за формулою:

$$\delta = \pi Q^{-1} = \frac{1}{N} \ln \frac{\gamma_i}{\gamma_{i+N}},$$

де N - число коливань в інтервалі зменшення γ від початкового (γ_i) до кінцевого значення (γ_{i+N}). Відношення $\gamma_{i+N} \times \gamma_i^{-1}$ задавалось на амплітудному дискримінаторі установки і становило 0,5.

Деформацію зразків здійснювали одновісним розтягуванням зі швидкістю 10^{-2} с^{-1} на розривній машині.

Досліджувались:

1) полікристалічний нікель електроннопроменевого перепау чистотою 99,99 мас.% з середнім розміром зерна (після рекристалізаційного відпау при 1173 К протягом 2-х годин у вакуумі 13 мПа) $D = 450 \pm 100 \text{ мкм}$;

2) залізо, одержане вакуумно-індукційною плавкою (Fe), що було виплавлене з рафінованого заліза марки ЖР008 (0,008 мас.% С) з середнім розміром зерна після рекристалізаційного відпау $D = 130 \pm 40 \text{ мкм}$. Середній розмір зерна визначали металографічним способом.

Обґрунтування вибору саме цих металів полягає в наявності у них значної магнітної складової низькочастотного внутрішнього тертя, що показано в працях [1-3, 6, 8-10].

Зливи заліза одержували шляхом виплавки у вакуумно-індукційній печі Бальцерс, про-ковували при 1173-1273 К на заготовки, які потім деформували за кілька проходів до необхідного діаметру з проміжними

рекристалізаційними відпалами при 1023 К протягом 0,5-1 год, кислотнo-лужним травленням і промивкою водою після кожного проходу.

Зразки у формі подвійних лопаток, після виготовлення на токарному станку та порізки, проходили заключний рекристалізаційний відпал з метою зняття внутрішніх напружень, що виникли при їх виготовленні. Температура цього відпау становила 1173 К протягом 2-х годин для нікелю та заліза. Розмагнічування зразків з метою виключення втрат на макровихорові струми здійснювалось знакозмінним магнітним полем частотою 50 Гц, амплітуда якого монотонно знижувалась протягом 60 с з повторенням такої процедури 3 рази.

Оскільки основною експериментальною задачею є перевірка ролі (внеску) магнітної складової після різних ступенів пластичної деформації, то були проведені вимірювання залежності внутрішнього тертя від напруженості магнітного поля H зразків як після рекристалізації, так і після пластичної деформації різного ступеня. Для намагнічування використано трубчастий соленоїд, що дозволяв створювати напруженість магнітного поля до $100000 \text{ А} \times \text{м}^{-1}$, в якому розташовувався зразок, закріплений у немагнітному штокові із аустенітної сталі.

Результати та їх обговорення

Початкові відпрацювання методики проводились на залізі, де була менша імовірність випадкової деформації зразків при монтажі в установці. Було виявлено, що основною тенденцією впливу пластичної деформації від 0 до 15% є падіння кута нахилу АЗВТ, без суттєвих змін загального виду залежності, для якої перша похідна від декременту за амплітудою при помірних амплітудах (порядку $1 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-4}$) мала додатне значення, що повністю відповідало більш раннім дослідженням [2,3,8,10]. Найбільше значення ВТ $\delta_{\max}$ на максимумі АЗВТ досягало 0,06, тобто доля поглинутої енергії $\Delta W = \delta \cdot \pi$ становила близько 19% від повної механічної енергії коливань маятника.

Залежність внутрішнього тертя δ від напруженості магнітного поля H після різних ступенів пластичної деформації нікелю подана на рисунку 1. З нього добре видно, що найбільш високі значення ВТ спостерігаються у відпаєному зразку (крива 1). Причому залежність ВТ від напруженості магнітного поля носить виражений немонотонний характер з чітким максимумом при напруженості магнітного поля $H = 1,9 \times 10^{-3} \text{ А} \times \text{м}^{-1}$.

Вже невеликі ступені пластичної деформації порядку кількох відсотків (крива 2) в декілька разів знижують максимальний рівень ВТ. Максимум на залежності $\delta(H)$ практично зникає (з урахуванням похибки вимірювання ВТ у 4-5%) після деформацій, більших за 5-6% (крива 2). Залишається тільки

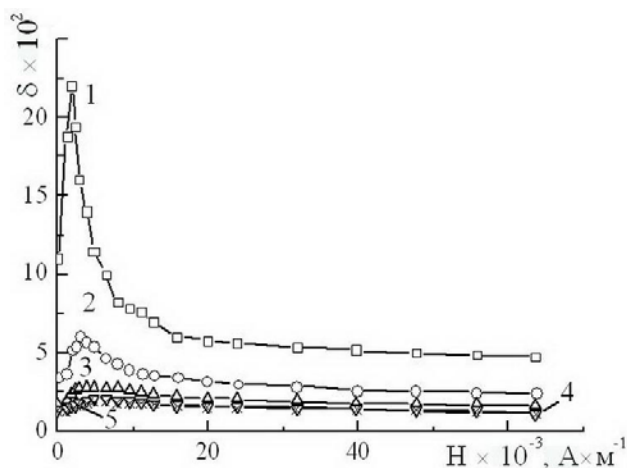


Рис. 1. Залежність внутрішнього тертя δ при частоті крутильних коливань 91 Гц від напруженості магнітного поля H після різних ступенів пластичної деформації ϵ нікелю (1 – відпалений при 1173 К зразок; 2 - $\epsilon = 2,0\%$; 3 - $5,1\%$; 4(x) - $12,0\%$; 5 - 25%).

невелика приступка на залежності $\delta(H)$, яка зникає при деформаціях близьких до 25% деформації.

Вивчення наукової літератури [2,4,6] показало, що виявлені риси залежності $\delta(H)$ у широкому діапазоні магнітних полів після пластичної деформації нікелю у частотному діапазоні порядку 80-100 Гц раніше не публікувались.

Якщо проаналізувати можливі механізми ВТ при застосованих «проміжних» частотах, то зрозуміло, що вони (частоти) на 3 порядки нижчі за частоти мікрровихорів втрат. Розмагнічування зразків виключало втрати на макровихорові токи. Таким чином, основний внесок в ВТ вносять, згідно з висновками праці І.Б. Кекало [6] втрати на магнітопружний гістерезис міждоменних меж на дефектах структури.

Для перевірки цього були проведені зйомки польових залежностей при різних амплітудах. Типові результати для заліза наведені на рис. 2. Вони вказують на практично лінійне підвищення ВТ з ростом амплітуди при $H=0$. Це добре видно і з рисунка 1, якщо розглянути ту ж область амплітуд (до $\gamma = 1,0 \times 10^{-4}$). Зважаючи на те, що екстраполяція на нульову амплітуду приводить до значень $\delta \approx 0$, можна вважати, що основним механізмом ВТ є втрати на магнітопружний гістерезис.

У той же час, із співставлення загальних рис залежностей, наведених на рисунках 1 і 2, можна звернути увагу на цікаву особливість та додаткове підтвердження гістерезисного типу втрат у вивченому частотному діапазоні, а саме: малі амплітуди чинять такий же вплив на польову залежність ВТ, як і великі пластичні деформації (тобто, польова залежність практично зникає (див. рис. 1 та рис. 2, криві 5). Цей факт може бути предметом розгляду окремої статті.

При великих ступенях пластичної деформації очевидно, що потрібний розгляд взаємодії доменних меж з комірчастою дислокаційною структурою, яка

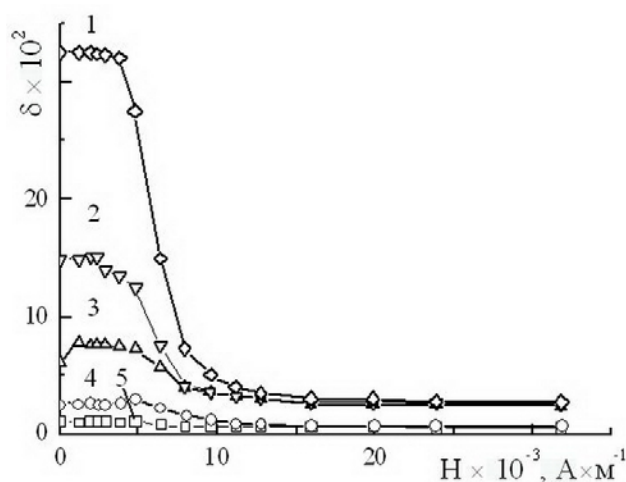


Рис. 2. Залежність внутрішнього тертя δ при частоті крутильних коливань 85 Гц від напруженості магнітного поля H відпаленого при 1173 К заліза при різних амплітудах деформації (1 - $\gamma = 1,0 \times 10^{-4}$; 2 - $\gamma = 6,0 \times 10^{-5}$; 3 - $\gamma = 3,3 \times 10^{-5}$; 4 - $\gamma = 1,9 \times 10^{-5}$; 5 - $\gamma = 1,3 \times 10^{-5}$).

практично їх блокує (обмежує рухливість міждоменних меж), що подавляє основний вид втрат у магнітних яких феромагнетиках, а саме втрати на магнітопружний гістерезис (рис. 1, крива 5).

З рис. 2 (крива 5) видно, що польова залежність практично відсутня тому, що амплітуда та відповідні їй напруження чи магнітопружний тиск на доменні межі чутливі до напружень (так званий 90-градусний тип), вже у відпаленому зразку недостатній для початку руху доменних меж (тертя спокою). Тому польова залежність і не спостерігається.

Найбільш виражена польова залежність виникає тоді, коли рухливість доменних меж визначає магнітне поле, тобто коли воно посуває доменні межі ближче до вершин пагорбів потенціалу Релея. Виразність польової залежності можна бачити з порівняння крайніх випадків, якщо побудувати ділянку залежності $\delta(H)$ поблизу максимуму (рис. 3, криві 1 і 2). З нього добре видно, за яких полів внутрішнє тертя буде найбільш чутливе до ступеня пластичної деформації. Максимальне зниження логарифмічний декремент $\Delta \delta_{\max}$ у нікелі має при H близько $1,9 \times 10^{-3} \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$. Очевидно, що за цієї напруженості магнітного поля внутрішнє тертя буде мати максимальну чутливість до ступеня пластичної деформації і, що суттєво, ВТ може бути найбільш чутливим її індикатором.

Це може бути використано, зокрема, для дослідження методом неруйнуючого контролю лопаток турбін низького тиску атомних електростанцій, у яких штучно створюється високий рівень магнітного ВТ (магнітна подушка). У них можна завдяки проведенню вимірювань ВТ оцінити ступінь випадкової пластичної деформації, що може виникати в моменти зупинки-пуску турбін. Тобто, для таких цілей більш доцільно використовувати ВТ підмагнічених оптимальним

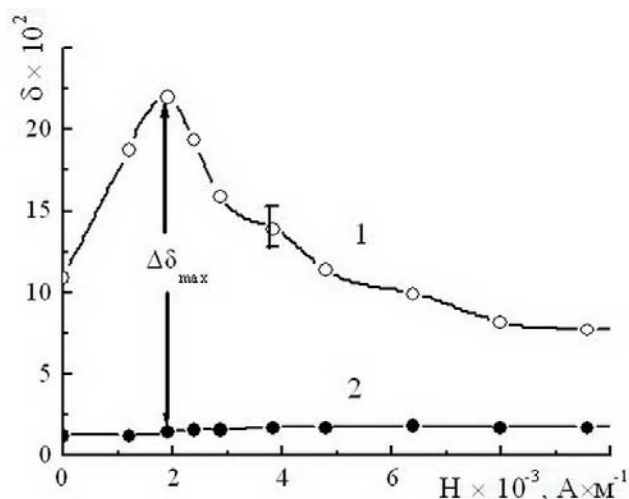


Рис. 3. Залежності $\delta(H)$ при частоті крутильних коливань 91 Гц після різних ступенів пластичної деформації нікелю (1 – $\varepsilon = 0$; 2 – $\varepsilon = 25\%$).

полем зразків. У цьому випадку, як видно з рис. 3, чутливість ВТ феромагнетика як неруйнуючого методу контролю буде майже вдвічі вищою.

Зіставлення одержаних результатів з висновками роботи [4], отриманими без накладання магнітного поля, показує, що у відпалених зразках підйому ВТ в області великих ступенів пластичної деформації у будь-яких магнітних полях не відбувається (іде тільки зниження ВТ з ростом ступеня пластичної деформації) (рис. 1, криві 1-5), що відповідає висновкам більш ранніх праць [1, 2]. Можна припустити, що на неочікувані висновки роботи [4] вплинуло досить низьке значення середнього розміру зерна (15 мкм), який більш ніж на порядок нижчий за спостережений нами, та досить низька швидкість пластичної деформації ($7,5 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$).

Висновки

Експериментальні дослідження внутрішнього тертя δ при низькочастотному пружному крученні зразків заліза та нікелю показали, що найбільш чутливою до ступеня пластичної деформації розтягуванням ε у феромагнітних перехідних металах є внутрішнє тертя в області максимуму на залежності δ від напруженості магнітного поля.

Це може бути використано у якості чутливого індикатора для контролю ступеня програмованої, чи випадкової пластичної деформації виробів з високим рівнем демпфірування за рахунок магнітної складової.

Магнітний вклад у структурі загальних енергетичних втрат при циклічній деформації є суттєвим не тільки у відпалених (рекристалізованих) феромагнітних металах та після малих ступенів їх пластичної деформації, а повинен враховуватись до ступенів пластичної деформації близько 10%.

1. A. Le May, A. Van Neste, *Scripta Met.*, **5**, 87 (1974).
2. В.Л. Аванесов, Э. Медрано Атенцио, А.Ф. Сиренко, *УФЖ*, **8**, 1216 (1982).
3. Н.Я.Рохманов, В.М. Андронов, *Известия АН России. Сер. физ.*, **64**, (2000).
4. Т.Т. Могильникова, *Вісник ХНУ. Сер. Фізика*, **11**, №821, 83 (2008).
5. G. Gremaud, *Mechanical spectroscopy Q⁻¹ 2001*, Switzerland, Germany, UK, USA: Trans Tech Publication LTD, 179 (2001).
6. И.Б. Кекало, *Магнитоупругие явления, Металловедение и термическая обработка*, ВИНТИ, Москва, **70**, 5 (1973).
7. В.И. Трефилов, В.Ф. Моисеев, Э.П. Печковский и др., *Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов*, Наук. Думка, Киев. – 248 (1987).
8. N.Ya. Rokhmanov, *Functional Materials*, **8**, 262 (2001).
9. Н.Я. Рохманов, *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, **4** (1996).
10. Н.Я. Рохманов, *Известия АН России, сер. Физическая*, **61** (1997).