

## REACTOR AND AEROSPACE METALS SCIENCE

PACS numbers: 68.03.Cd, 61.72.Qq, 61.80.Jh, 61.82.Bg, 68.35.Md, 76.50.+g, 81.40.Ef

### Визначення тиску в бульбашках гелію та поверхневої енергії нікелю методом феромагнетного резонансу

О. І. Спольнік, А. Ю. Гайдусь, Л. М. Каліберда

*Харківський національний технічний університет  
сільськогосподарства імені Петра Василенка,  
вул. Алчевських, 44,  
61002 Харків, Україна*

Роботу присвячено експериментальному дослідженню теоретичних положень щодо впливу пор, оточених полями пружних деформацій, на ширину лінії феромагнетного резонансу (ФМР). Вимірювання ширини лінії ФМР проведено на зразках нікелю, підданих опроміненню прискореними йонами гелію та ізохронному ступінчастому відпалу за різних температур. Опромінення зразків з наступним відпалом дало змогу створити в досліджуваних зразках ансамбль бульбашок гелію з відомими концентрацією і розмірами. Експериментальні результати виявили розширення резонансної лінії, значення якого добре узгоджується з теоретичними оцінками. Отримані дані створюють передумови для подальшого розвитку і застосування ФМР, як методу вимірювання тиску гелію у бульбашках і величини поверхневої енергії нікелю у твердому стані.

**Ключові слова:** феромагнетний резонанс, йонне опромінення, тиск газу, поверхнева енергія нікелю.

The data on the effect of pores surrounded by fields of elastic strains on the line width of ferromagnetic resonance (FMR) are experimentally obtained. For this purpose, FMR line widths are measured in nickel samples irradiated with accelerated helium ions and thereafter subjected to isochronous step

---

Corresponding author: Oleksandr Ivanovych Spol'nik  
E-mail: alexspo@ukr.net

*Kharkiv Petro Vasilenko National Technical University of Agriculture,  
44 Alchevskyykh Str., UA-61002 Kharkiv, Ukraine*

Citation: O. I. Spol'nik, A. Yu. Haydus', and L. M. Kaliberda, Determination of Pressure in Helium Bubbles and Surface Energy of Nickel by Ferromagnetic Resonance Method, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 6: 843–851 (2021) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.43.06.0843](https://doi.org/10.15407/mfint.43.06.0843).

annealing at different temperatures. As a result of annealing, an ensemble of helium bubbles with known concentration and size is created in the samples. Resonance measurements in these samples are revealed broadening of the FMR line, the value of which agrees well with the theory of broadening of the resonance line by stressed pores. This makes it possible to estimate the pressure of helium in the bubbles and the surface energy of nickel from the magnitude of this broadening.

**Key words:** ferromagnetic resonance, ion irradiation, pressure of gas, surface energy of nickel.

*(Отримано 29 жовтня 2018 р.; остаточн. варіант — 18 січня 2021 р.)*

## 1. ВСТУП

Магнетні і пружні характеристики нікелю привертають до нього увагу широкого кола дослідників, роблячи його зручним модельним матеріалом як для вивчення проблем міцності та пластичності, магнетних явищ у твердих тілах, так і для дослідження процесів, що відбуваються в реакторних матеріалах під дією опромінення.

Яскраво виражений зв'язок магнетних і пружних властивостей цього феромагнетика дозволяє вивчати релаксаційні процеси, що відбуваються за феромагнетного резонансу (ФМР) та обумовлені наявністю дефектів кристалічної структури, таких як дислокації і пори. Початок досліджень у цій області поклали теоретичні роботи [1, 2], в яких встановлено вплив дислокацій на ширину лінії ФМР (дислокаційне розширення) і, зокрема, виявлено роль неоднорідних пружних деформацій навколо дислокацій у релаксаційних процесах. Теоретичні розробки стимулювали експериментальне вивчення описаних явищ (див., наприклад, [3, 4] та ін.), у результаті чого отримали дані, які зумовили необхідність подальшого розвитку теорії дислокаційного розширення резонансної лінії, що зроблено у роботах [5, 6]. Комплекс проведених теоретичних і експериментальних досліджень створив передумови для використання ФМР як метод аналізу структурних властивостей феромагнетиків. Так, наприклад, ФМР використовували для вивчення процесів, що відбуваються у нікелі, опроміненому йонами гелію [7]. У певних ситуаціях у феромагнетикі поряд із дислокаціями можуть утворюватися об'ємні дефекти у вигляді пор і дрібнодисперсних включень, оточених полями неоднорідних пружних деформацій. Теоретичні дослідження [8, 9] показали, що наявність подібних дефектів у феромагнетикі приводить до розширення резонансної лінії, величина якої залежить від магнетних і пружних характеристик феромагнетика, розмірів пор (включень), їх кількості, а також від тиску, який чинять ці дефекти на матеріал. Експериментальна перевірка впливу напружених пор на ширину лінії ФМР пов'язана з необ-

хідністю створення у феромагнетику таких дефектів в кількості, достатній для виявлення ефекту.

Імітаційним дослідженням процесів структурної перебудови, що відбуваються в металах і стопах під дією опромінення йонами газів, присвячено цілу низку публікацій — статті, огляди, монографії (див., наприклад, [10, 11]). У таких дослідженнях як модельний матеріал набув поширеного використання нікель. Це пояснюється тим, що опромінення нікелю важкими йонами створює пошкодження, подібні спостережуваним у матеріалах під час їх експлуатації у реакторах. Так, унаслідок опромінення нікелю йонами гелію в ньому утворюються пори (бульбашки), заповнені гелієм, що призводить до збільшення обсягу (розпухання) конструкційних матеріалів та істотно впливає на властивості їхньої міцності. Це зумовлює інтерес до поведінки гелію у нікелі (див., наприклад, [12–19]).

Окреслені фактори багато в чому визначають радіаційну стійкість реакторних матеріалів й істотно залежать від їхньої поверхневої енергії (ПЕ). Якщо для визначення тиску, що чиниться газонаповненими порами на матеріал, існує багато різних методів структурного аналізу (див., наприклад, [19–24]), то визначення поверхневої енергії металів у твердому стані є набагато складнішим завданням через низку причин [25–28]. Основна причина полягає в тому, що молекули (атоми) твердих тіл позбавлені можливості вільно переміщуватися. Проте, у літературі є відомості про розроблені способи і пристрої, що дозволяють вимірювати (або хоча б оцінювати) ПЕ металів у твердому стані [29–31]. Аналіз публікацій, присвячених вимірюванню ПЕ металів у твердому стані, засвідчив неспокійний інтерес до цієї проблеми [32–34].

Наведені в літературі численні дані про процес виникнення і розвитку гелієвих пор у нікелі, опроміненому йонами Гелію, зокрема й такі, що містять кількісні характеристики цих пор (густина, середні розміри), уможливили постановку задачі про експериментальне виявлення впливу цих дефектів на ширину лінії ФМР. Прикладний аспект таких досліджень полягає у розробці резонансних методів оцінки тиску гелію в порах і поверхневої енергії нікелю. Мета цієї роботи полягає у тому, щоб здійснити експериментальну перевірку на зразках нікелю, опромінених йонами Гелію, теоретичних даних про вплив напружених пор на ширину лінії ФМР і оцінити тиск газу в них, а також ПЕ нікелю за величиною розширення резонансної лінії, викликаного цими дефектами.

## 2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Зразки для досліджень виготовляли з полікристалічного нікелю чистоти 99,99, мали форму дисків діаметром 3 мм і товщину 0,1 мм. Попередньо зразки відпалювали у вакуумі  $10^{-4}$  Па за  $T = 1100$  К

протягом 2-х годин, а потім піддавали електрополіруванню. Для створення ансамблю пружних пор у нікелі використовували йонний прискорювач.

Опромінення зразків проводили за кімнатної температури у йонному прискорювачі пучком йонів  $\text{He}^+$  з енергією 20 кеВ до дози  $4,0 \cdot 10^{21}$  йон·м<sup>-2</sup>. За такої енергії накопичення йонів гелію відбувається в межах скін-шару зразка, який за частоти ФМР  $\omega_0 \sim 10^{11}$  с<sup>-1</sup> становить десятки частки мікрона. Після опромінення зразки піддавали ізохронному відпалу протягом 30 хвилин, починаючи з  $T = 700$  К і до  $T = 1150$  К через кожні 50 К. Такі режими опромінення та наступного відпалу забезпечували утворення у зразках нікелю бульбашок гелію [11, 12, 16, 17].

Техніка і методика реєстрації лінії ФМР подібна до описаної в [35]. У даній роботі використовували спектрометр ФМР з модуляцією статичного магнетного поля, що дозволяє реєструвати резонансну лінію на частоті 8 ГГц. Ширину лінії визначали як відстань між піками на кривій похідної лінії поглинання. Лінію ФМР реєстрували у зразках нікелю відразу після опромінення, а потім через кожні 30 хвилин відпалу. Резонансні вимірювання проводили за кімнатної температури.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На рисунку 1 наведено графік залежності величини розширення лінії ФМР, одержаного в результаті опромінення зразків нікелю йонами гелію та їх подальшого ізохронного відпалу, від температури  $T$  відпалу. За нульовий рівень відліку прийнята величина ширини лінії, виміряна в неопромінених зразках, що дорівнює  $\Delta H = 350$  Е. Графік починається з температури відпалу  $T = 900$  К, оскільки до цієї температури розширення лінії не змінюється, залишаючись рівним 650 Е.

Для аналізу результатів, наведених на рисунку 1, представимо спостережуване розширення лінії ФМР  $\Delta H(T)$  у вигляді суми:

$$\Delta H(T) = \Delta H_d(T) + \Delta H_p(T), \quad (1)$$

де  $\Delta H_d(T)$  і  $\Delta H_p(T)$  — залежності від температури відпалу  $T$  дислокаційного розширення і розширення резонансної лінії напруженими порами відповідно.

Як показано в [7], причиною виникнення  $\Delta H_d(T)$  є радіаційно-індуковані дислокаційні петлі. Починаючи з температури відпалу 900 К і до 1050 К, величина розширення лінії зменшується. Це пояснюється процесом відновлення структури опроміненого нікелю за рахунок зменшення об'ємної густини дислокаційних петель радіаційного походження в результаті відпалу [36–38]. Відповідно до

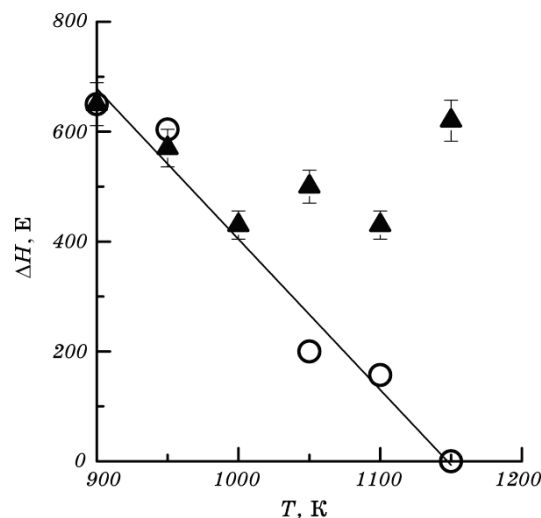
результатів [6], величину  $\Delta H_d(T)$  можна представити у вигляді:

$$\Delta H_d(T) = An(T)^{1/2}, \quad (2)$$

де  $A$  — коефіцієнт пропорційності, що залежить від магнетопружних характеристик феромагнетика і характеру розподілу дислокацій в кристалі,  $n$  — об'ємна густина дислокаційних петель.

На рисунку 1 наведено значення  $\Delta H_d(T)$  (кружечки), розраховані за формулою (2) з використанням коефіцієнта  $A = 8,02 \cdot 10^{-9} \text{ Е} \cdot \text{м}^{3/2}$  і величин  $n(T)$ , наведених в [11], а також лінійна апроксимація цієї залежності методом найменших квадратів. Як видно з рис. 1,  $\Delta H_d(T)$  є лінійною функцією температури в інтервалі 900–1150 К. Відхилення експериментальних значень  $\Delta H_d(T)$  в інтервалі температур 1050–1150 К вказує на наявність у цьому інтервалі додаткового розширення лінії ФМР.

Зазначимо, що за температур розглядуваного діапазону відпалу нікеля відбуваються процеси зародження і розвитку гелієвої пористості, кінетика яких детально досліджена (див., наприклад, [10–13, 16, 39–41]). Так, починаючи з  $T = 900 \text{ К}$  домінують процеси росту гелієвих бульбашок, однак спад величини дислокаційного роз-



**Рис. 1.** Залежність розширення лінії ФМР у зразках нікелю, опромінених йонами гелію з енергією 20 кеВ до дози  $4,0 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$ , від температури ізохронного відпалу: ▲ — експериментальні дані, ○ — розраховані значення величини  $\Delta H_d(T)$ .

**Fig. 1.** Dependence of the FMR line broadening in nickel samples, irradiated with 20 keV helium ions to the dose of  $4.0 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-2}$  on the isochronous annealing temperature: ▲—experimental data, ○—calculated values of  $\Delta H_d(T)$ .

ширення, пов'язаний зі зменшенням густини дислокаційних петель у результаті відпалу за цієї температури, превалює: після відпалу за  $T = 1050$  К густина дислокаційних петель зменшується більше, ніж на порядок. З рисунку 1 видно, що за цієї температури відпалу характер залежності  $\Delta H(T)$  змінюється: виникає розширення лінії, яке цілком обґрунтовано можна віднести до впливу гелієвої пористості, що розвивається у разі відпалу. Як видно з рис. 1, в інтервалі температур 1050–1100 К в розширення лінії ФМР вносять помітний внесок обидва доданки формули (1).

Припускаючи адитивність внесків  $\Delta H_d(T)$  і  $\Delta H_p(T)$  в розширення резонансної лінії і використовуючи розрахункові значення  $\Delta H_d(T)$  у цьому інтервалі температур, одержуємо величину розширення лінії ФМР бульбашками гелію  $\Delta H_p(T) \approx 300$  Е. За температури відпалу  $T = 1150$  К дислокаційні петлі радіаційного походження виявляються лише епізодично [38] і, отже, розширення  $\Delta H_d$  практично дорівнює нулю. Водночас, за цієї температури різко зростає розширення лінії (див. рис. 1), оскільки в результаті термодесорбції гелію з об'єму матеріалу утворюється так звана «дірчаста» структура поверхні зразків, що призводить до погіршення якості їхньої поверхні [38, 39]. Це має наслідком значне розширення резонансної лінії [4], що ускладнює оцінку величини  $\Delta H_p$ .

Таким чином, є підстави вважати розширення  $\Delta H \cong 300$  Е в інтервалі температур 1050–1100 К результатом впливу пружних деформацій, створених гелієвими бульбашками. Підкреслимо, що вимірювання ФМР проводили за кімнатної температури. За температури утворювання гелієвих бульбашок близько 1000 К вони знаходяться у рівноважному стані. У разі охолодження зразків від температури утворювання до кімнатної температури гелієві бульбашки переходять у нерівноважний стан, внаслідок чого створюють навколо себе пружні деформації. Саме така ситуація закладена в теоретичну модель, що описує вплив напружених пор на ширину лінії ФМР [8]. Для оцінки тиску  $p$ , який створюють такі пори, використовували вираз для ширини лінії ФМР, одержаний у даній роботі:

$$\Delta H_p = \frac{\pi^2 \mu_0}{\hbar g} \left( \frac{B_1^2}{M_0^3} \right) \left( \frac{1 + \sigma}{E} \right)^2 p^2 n_p \frac{a^6}{\sqrt{\alpha^3}}. \quad (3)$$

Тут  $\mu_0$  — магнетон Бора,  $\hbar = h/2\pi$  — стала Планка,  $g$  — гіромагнетне відношення,  $B_1$  — магнетопружна стала,  $M_0$  — намагнетченість насичення,  $\sigma = 0,28$  — коефіцієнт Пуассона,  $E$  — модуль Юнга,  $\alpha$  — стала обмінної взаємодії.

Підстановка у вираз (3) значення  $\Delta H_p = 300$  Е = 23,12 кА·м<sup>-1</sup>, довідкових даних магнетних і пружних величин, середніх значень радіуса бульбашок і їхньої концентрації в інтервалі температур 1050–1100 К [10,11]:  $a \approx 3 \cdot 10^{-8}$  м і  $n_p \approx 6,8 \cdot 10^{22}$  м<sup>-3</sup>, дала змогу отримати

величину тиску гелію в порах за кімнатної температури  $p = 10^8$  Па, яка узгоджується з даними, наприклад, [19, 22, 24]. Припускаючи далі, що за температури  $T \approx 1000$  К тиск гелію у порах дорівнює лавласівському, тобто  $p = 2\gamma/a$ , отримуємо значення поверхневої енергії  $\gamma$  нікелю за цієї температури:  $\gamma = 4500$  мДж·м<sup>-2</sup>.

Для розрахунку цієї величини враховували, що температура утворення гелієвих бульбашок приблизно втричі більша кімнатної і, відповідно до газових законів, тиск гелію у стільки ж разів більше знайденого з виразу (3). Одержане значення приблизно вдвічі перевищує наведені у довідниках (див., наприклад, [42, 43]), і можна говорити про збіг тільки за порядком величини. Відзначимо одну з можливих причин такої розбіжності. Більшість довідкових даних відносяться до плоскої макроскопічної межі кристал–розтоп, розтоп–газ. Суттєвий вплив на величину поверхневої енергії чинить розмір часток матеріалу. У [44] показано, що поверхнева енергія викривленої міжфазної межі залежить від радіуса її кривизни, а її відхилення від «плоского» значення характеризується параметром, який називають довжиною Толмена. Визначенню цього параметра присвячено багато досліджень (див., наприклад, [45–47]). У нашому випадку довжина Толмена негативна, оскільки спонтанний радіус кривизни пор має тенденцію викривлювання поверхні до газової фази. Це означає, що величина поверхневої енергії, визначена для випадку гелієвих бульбашок нанометрових розмірів, буде перевищувати її «плоске» значення. Не можна виключати і досить значну похибку нашого способу оцінки тиску і поверхневої енергії за шириною лінії ФМР. Основними джерелами похибки є значення середнього радіуса пор та їхньої концентрації, які, як було зазначено вище, взяті з літературних джерел. Відносні похибки прямих вимірювань кожної з цих величин за допомогою електронної мікроскопії складають приблизно 30% [38–40]. Отже, відносна похибка величини поверхневої енергії, визначена за допомогою даних про ширину лінії і виразу (1), становить близько 60%.

#### 4. ВИСНОВКИ

Одержані нами значення тиску газу в порах і поверхневої енергії нікелю збігаються за порядком величини з наведеними в літературі. Це дозволяє зробити висновок про те, що теоретичні дані про розширення лінії ФМР напруженими порами [8] знаходять експериментальне підтвердження. Зафіксована чутливість ширини лінії ФМР до процесів, що відбуваються в результаті імплантації йонів Гелію у ґратницю нікелю і його подальшого відпалу, свідчить про перспективність подальшого розвитку методу ФМР для прикладних і фундаментальних фізичних досліджень з метою одержання більш детальної інформації про радіаційні дефекти.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. V. G. Baryakhtar, M. A. Savchenko, and V. V. Tarasenko, *ZhETF*, **51**, No. 3: 936 (1966) (in Russian).
2. V. G. Baryakhtar, M. A. Savchenko, and V. V. Tarasenko, *ZhETF*, **54**, No. 5: 1603 (1968) (in Russian).
3. A. S. Bulatov, V. G. Pinchuk, and M. B. Lazareva, *Fiz. Met. Metalloved.*, **34**, No. 5: 1066 (1972) (in Russian).
4. V. G. Baryakhtar, R. I. Garber, and A. I. Spolnik, *Soviet Physics-Solid State*, **16**, No. 8: 1506 (1975).
5. A. I. Akhiezer, V. S. Boiko, and A. I. Spolnik, *Fizika Tverdogo Tela*, **16**, No. 11: 3411 (1974) (in Russian).
6. A. I. Akhiezer, V. V. Gann, A. I. Spolnik, *Fizika Tverdogo Tela*, **17**, No. 8: 2340 (1975) (in Russian).
7. A. I. Spolnik, A. N. Grigor'ev, and A. N. Moroz, *Ukrayins'kyy Fizychnyy Zhurnal*, **35**, No. 6: 934 (1990) (in Russian).
8. A. I. Spolnik and Z. A. Spolnik, *Ukrayins'kyy Fizychnyy Zhurnal*, **38**, No. 12: 56 (1993) (in Russian).
9. A. I. Spolnik, A. S. Abizov, I. V. Volchok, and M. A. Chegoryan, *Dopovidi Natsional'noyi Akademiyi Nauk Ukrayiny*, **11**: 78 (2009) (in Russian).
10. V. F. Zelenskiy, I. M. Neklyudov, and T. P. Chernyaeva, *Radiatsionnye Defekty i Raspuhvanie Metallov* [Radiation Defects and Swelling of Metals] (Kyiv: Naukova Dumka: 1988) (in Russian).
11. A. G. Zaluzhnyi, Yu. N. Sokurskiy, and B. H. Tebus, *Geliy v Reaktornykh Materialakh* [Helium in Reactor Materials] (Moscow: Energoatomizdat: 1988) (in Russian).
12. V. I. Bendikov, A. V. Nikitin, V. V. Ruzhitskiy, V. F. Ryibalko, and S. M. Hazan, *J. Surface Investigation*, No. 10: 67 (1996) (in Russian).
13. H. Iwakiri, K. Yasunaga, K. Morishita, and N. Yoshida, *J. Nucl. Mater.*, **283–287**: 1134 (2000).
14. A. N. Kalashnikov, I. I. Chernov, B. A. Kalin, and S. Yu. Binyukova, *J. Nucl. Mater.*, **307–311**: 362 (2002).
15. I. M. Neklyudov and G. D. Tolstolutsкая, *Problems of Atomic Science and Technology, Series 'Physics of Radiation Damage and Radiation Materials Science'*, No. 3: 3 (2003) (in Russian).
16. S. Yu. Binyukova, I. I. Chernov, B. A. Kalin, and M'о Khtet Vin, *Atomic Energy*, **99**: 550 (2005) (in Russian).
17. V. N. Chernikov, H. Trinkaus, and H. Ullmaier, *J. Nuclear Materials*, **250**, Iss. 2–3: 103 (1997).
18. Shi-Hao Li, Jing-Ting Li, and Wei-Zhong Han, *Materials*, **12**, Iss. 7: 1036 (2019).
19. M. Thompson, *Defekty i Radiatsionnye Povrezhdeniya v Metallakh* [Defects and Radiation Damage in Metals] (Moscow: Mir: 1971) (in Russian).
20. U. Valdre, *Electron Microscopy in Material Science* (New York and London: Academic Press: 1971).
21. B. L. Eyre, *J. Physics F: Metal Physics*, **3**, No. 2: 422 (1973).
22. S. E. Donnelly, *Radiat. Eff.*, **90**: 1 (1985).
23. L. G. Petrova, V. A. Aleksandrov, and S. I. Barabanov, *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, **54**: 60 (2011) (in Russian).



24. C. A. Walsh, J. Yuan, and L. M. Brown, *Phil. Mag. A*, **80**, Iss. 7: 1507 (2000).
25. A. A. Griffith, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, **221**: 163. (1921).
26. J. Gilman, *J. Appl. Phys.*, **31**: No. 12: 2208 (1960).
27. R. M. Digilov, S. N. Zadumkin, V. H. Kумыиков, and H. B. Hokonov, *Fiz. Met. Metalloved.*, **28**, No. 5: 523 (1976) (in Russian).
28. W. Missol, *Energiya Poverkhnosti Rozdela Faz v Metallakh* [Surface Energy of Phase Separation in Metals] (Moscow: Metallurgiya: 1978) (in Russian).
29. H. B. Hokonov, I. G. Shebzuhova, and T. M. Taova, *Sposob Izmereniya Poverkhnostnogo Natyazheniya Tverdykh Tel* [Method for Measuring the Surface Tension of Solids], Authors' Certificate 1356696 SSSR (Published 1984) (in Russian).
30. T. M. Taova, B. H. Unezhev, and H. B. Hokonov, *Ustroystvo dlya Izmereniya Poverkhnostnogo Natyazheniya Tverdogo Tela* [Device for Measuring the Surface Tension of a Solid], Patent Russian Federation No. 2200313 (Published 2003) (in Russian).
31. V. M. Jurov, *Sposob Izmereniya Poverkhnostnogo Natyazheniya Magnitnykh Materialov* [The Method of Measuring the Surface Tension of Magnetic Materials] Patent RK No. 58158 (Published 2009) (in Russian).
32. V. M. Jurov, *Eurasian Physical Technical Journal*, **8**, No. 1 (15): 10 (2011).
33. H. B. Hokonov, T. M. Taova, I. G. Shebzuhova, V. K. Kумыиков, and B. B. Alchagirov, *Electronic Journal*, No. 2: 10 (2019) (in Russian).
34. V. M. Jurov, V. S. Oleshko, and I. S. Pigovkin, *Advances in Current Natural Sciences*, No. 7: 88 (2012) (in Russian).
35. Ch. Pul, *Tekhnika EPR Spektroskopii* [Technique of Electron-Paramagnetic Resonance in Spectroscopy] (Moscow: Mir: 1970) (in Russian).
36. J. L. Strudel and J. Washburn, *Philos. Mag.*, **9**: 491 (1964).
37. I. Lemahieu, D. Segers, L. Deschepper, L. Dorikens-Vanpraet, M. Dorikens, L. Stals, C. Mommaert, and G. Severne, *Cryst. Res. Technol.*, **22**: No. 11: K210 (1987).
38. B. A. Kalin, I. I. Chernov, A. N. Kalashnikov, and S. Yu. Binyukova, *VANT*, No. 4: 20 (2000) (in Russian).
39. J. Ehrenberg, R. B. Behrisch, and M. U. Scherzer, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **194**: Iss. 1–3: 501 (1982).
40. V. N. Chernikov, H. Trinkaus, P. Jung, and H. Ulmaier, *J. Nucl. Mater.*, **170**, Iss. 1: 31 (1990).
41. B. N. Singh and H. Trinkaus, *J. Nucl. Mater.*, **186**, Iss. 2: 153 (1992).
42. E. R. Hayward and A. P. Greenough, *J. Institute of Metals*, **88**: 217 (1959).
43. I. S. Grigoreva and E. Z. Meylihora, *Fizicheskie Velichiny* [Physical Quantities] (Moscow: Energoatomizdat: 1970) (in Russian).
44. R. C. Tolman, *J. Chemical Physics*, **17**, Iss. 3: 333 (1949).
45. Yu. G. Frolov, *Kurs Kolloidnoy Khimii. Poverkhnostnye Yavleniya i Dispersnye Sistemy* [The Course of Colloid Chemistry. Surface Phenomena and Disperse Systems] (Moscow: Khimiya: 1982) (in Russian).
46. T. V. Byikov and A. K. Schyokin, *Neorganicheskie Materialy*, **35**, No. 6: 759 (1999) (in Russian).
47. D. I. Zhuhovitskiy, *Zhurnal Fizicheskoy Khimii*, **75**, No. 7: 1 (2001) (in Russian).