

А. Шепелєв

ФАЗА ШУБНІКОВА

До 75-ї річниці відкриття надпровідності II роду

Двічі лауреат Нобелівської премії з фізики Дж. Бардін [1] у доповіді на конференції «Надпровідність у науці і техніці» (Чикаго, 1966) зазначив, що це явище було відкрито російським фізиком Шубніковим [2] близько 1937 р. Наведемо кілька фактів з історії цього відкриття.

11 квітня 1936 р. у спеціальний випуск журналу *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion* надійшла стаття співробітників Українського фізико-технічного інституту Л.В. Шубнікова, В.Г. Хоткевича, Ю.Д. Шепелева, Ю.М. Рябініна [3] з результатами дослідження впливу магнітного поля на магнітні властивості монокристалів чистих металів і сплавів, усесвітньо визнана тепер як експериментальне відкриття надпровідників II роду. Вони, як відомо, відіграють велику роль у сучасній науці й техніці (див., наприклад, [4, 5]).

Такі надпровідники (а це більшість надпровідних сплавів і сполук, виявлених за останні 50 років) характеризує параметр Гінзбурга–Ландау

$$\kappa = \frac{\lambda}{\zeta} > \frac{1}{\sqrt{2}},$$

де λ — глибина проникнення магнітного поля, ζ — довжина когерентності між електронами в куперівській парі.

Дослідження впливу магнітного поля на електричні властивості полікристалів надпровідних сплавів почалися в 1929 р. у лабораторії Камерлінг Оннеса [6]. Було виявлено, що на відміну від чистих надпровідників, у яких відбувається різке руйнування надпровідності, коли $H = H_c$, у сплавах

існує широкий інтервал полів, за яких надпровідність руйнується поступово.

Перші експериментальні дослідження магнітних властивостей надпровідних сплавів (на жаль, в основному неоднорідних двофазних полікристалів) виконали канадські [7], британські [8], голландські [9] і радянські вчені [10] протягом 1934–1935 рр. у 4-х з 5-ти криогенних лабораторій світу, що мали в той час рідкий гелій. Де Гааз і Вогод у кінці 1934 р. чітко виявили, що на відміну від чистих надпровідників, у яких магнітні властивості змінюються стрибком, коли $H = H_c$, у надпровідних сплавах існує область поступового проникнення магнітного поля всередину сплаву, починаючи зі слабкого магнітного поля $H < H_c$. Це підтвердили британські і радянські дослідники, при цьому останні ввели позначення H_{c1} — для поля початку проникнення, H_{c2} — для поля повного руйнування надпровідності сплаву.

Зазначені відмінності електричних і магнітних властивостей сплавів від чистих надпровідників усі тодішні автори пов'язували з неоднорідністю зразків. Відома гіпотеза «губки Мендельсона» [8] припускала існування у сплавах неоднорідностей складу, структури, внутрішніх напружень, які призводять до появи багатозв'язних тонких утворень з набором аномально високих полів, які служать струмовими шляхами. Ця гіпотеза домінувала близько 20–25 років, хоча в тому ж 1935 р. з'явилися теорії Гортера і Лондона [11], які показали, що надпровідні сплави без неоднорід-

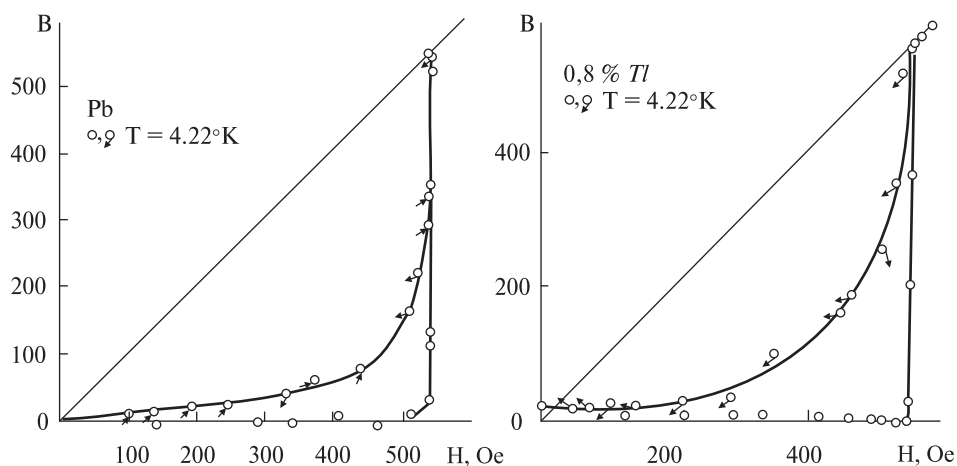


Рис. 1. Залежність індукції від поздовжнього магнітного поля для циліндричних зразків монокристалів чистого свинцю (ліворуч) і сплаву Pb+0,8wt%Tl (праворуч [2, 3])

ностей у магнітному полі можуть розбиватись на тонкі надпровідні й нормальні шари, що чергуються і паралельні магнітному полю. За товщини надпровідних шарів, меншої від глибини проникнення магнітного поля λ , надпровідність може існувати у великих магнітних полях. Однак ні ці теорії, ні «губка Мендельсона» не могли пояснити проникнення магнітного поля у сплав, коли $H < H_c$.

Л.В. Шубніков, В.Г. Хоткевич, Ю.Д. Шепелев, Ю.М. Рябінін [2, 3, 12] досліджували магнітні властивості ретельно приготованих монокристалів однофазних сплавів Pb-Tl і Pb-In. Вони вперше виявили, що:

1. Існує межа концентрації домішки в надпровідних сплавах, до якої їхні магнітні властивості подібні до магнітних властивостей чистих надпровідників — повний ефект Мейснера за полів, менших за критичні, різке руйнування надпровідності за подальшого збільшення магнітного поля (рис. 1);

2. Зі збільшенням концентрації домішки за цю межу (у межах сучасних уявлень — зі збільшенням параметра Гінзбурга–Ландау κ) магнітні властивості сплавів різко відрізняються від властивостей чистих надпровідників: ефект Мейснера існує тільки до магнітного поля H_{c1} , і за подальшого збільшення поля сплави залишають-

ся надпровідними до H_{c2} , але при цьому магнітне поле поступово проникає у сплав (рис. 2);

3. Зі збільшенням концентрації домішки (тобто зі збільшенням параметра κ) інтервал між H_{c1} і H_{c2} розширюється: H_{c1} зменшується, а H_{c2} зростає (рис. 3);

4. Виявлені незвичайні властивості надпровідних сплавів не можна пояснити гістерезисними явищами, тому що якраз за високих полів, які зменшуються і збільшуються, явище доволі добре оборотне і гістерезис невеликий;

5. Різницю вільної енергії намагніченого і нормального надпровідника подано через площу кривої

$$\Delta F = \int M dN,$$

де намагніченість $M = (B - H)/4\pi$, а різницю ентропії відображає похідна

$$\Delta S = -(\partial F / \partial T)_B.$$

Учені [2, 3] здійснили підрахунок різниці ентропій для сплавів. Він показав, що в цьому випадку так само, як і з чистими надпровідниками, це величини одного порядку, вони подібним чином залежать від температури. Тому стрибок теплоємності за надпровідного переходу в нульовому магнітному полі для сплаву порівнянний з таким у чистого надпровідника;

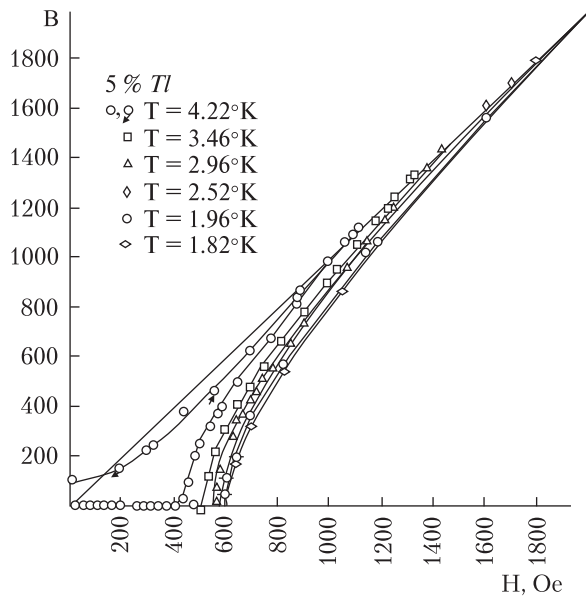
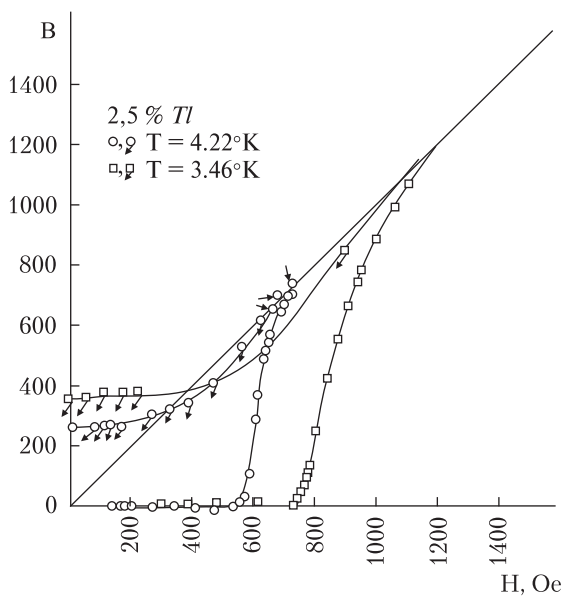


Рис. 2. Залежність індукції від поздовжнього магнітного поля для циліндричних зразків монокристалів сплавів Pb+2,5wt%Tl; Pb+5wt%Tl [2, 3]

6. Рентгенівські дослідження надпровідних сплавів показали, що в них твердий розчин не зазнає розпаду (сплави однофазні)

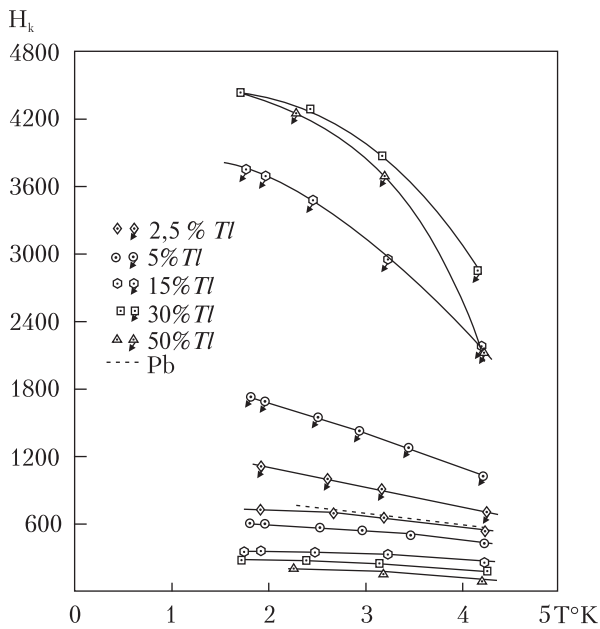


Рис. 3. Температурна залежність H_{c1} і H_{c2} для монокристалів сплавів Pb-Tl зазначених концентрацій і H_c для чистого свинцю [2, 3]

всупереч попереднім уявленням про те, що їхні особливі надпровідні властивості викликані впливом неоднорідностей.

Таким чином, саме в цих роботах Л.В. Шубнікова, В.Г. Хоткевича, Ю.Д. Шепелева, Ю.М. Рябініна вперше було зроблено обґрунтований і правильний висновок про існування нового типу надпровідників на противагу всім попереднім авторам, які пояснювали отримані результати неоднорідностями складу і структури зразків.

Під час VI Міжнародного конгресу холоду в Гаазі (1936) М. Руеман поширив серед учасників спеціальний випуск Phys.Z.Sowjet. зі статтею Шубнікова і співробітників [3], і їхні здобутки відразу стали відомими за кордоном. М. Руеман виступав на конгресі з доповіддю про дослідження магнітних властивостей сплавів замість Шубнікова, якого влада не випустила за кордон. Саме на цю статтю в спеціальному випуску посилались у публікаціях Джексон, Бартон, Сміт, Вільгельм і Мендельсон [13]. До того ж цей журнал видавали німецькою й англійською мовами тиражем 1700 екземплярів і розсилали в усі найбільші фізичні центри світу.

Однак обговорювана робота суттєво випередила час, її тріумфальне визнання відбулось тільки в 1963 р. на Міжнародній конференції з надпровідності (США) [14] вже після того, як О.О. Абрикосов [15] побудував теорію явища на базі експериментів Шубнікова і співавторів [2] і теорії Гінзбурга–Ландау [16].

Концепція надпровідників II роду (фаза Шубнікова) увійшла до золотого фонду світової науки, її викладено в усіх сучасних монографіях із надпровідності. Немає жодних сумнівів у тому, що надпровідники II роду знайдуть у майбутньому ще більше застосування.

Детальніше матеріал викладено в книзі й у відкритому доступі [17].

Автор вдячний директорів Інституту теоретичної фізики ім. Ахієзера ННЦ «ХФТУ» академікові М.Ф. Шульзі і членам ученої ради за обговорення матеріалу.

1. *J. Bardeen* / Superconductivity in Science and Technology (ed. M.H. Cohen). — Chicago&London: University of Chicago Press, 1968. — P. 4.
2. *Л.В. Шубніков, В.И. Хоткевич, Ю.Д. Шенелев, Ю.Н. Рябинин* // ЖЭТФ. — 1937. — Т. 7. — № 2. — С. 221; *Ukrainian J. Phys.* — 2008. — V. 53, Special Issue. — P. 42 (Reprinted in English).
3. *L.W. Schubnikow, W.I. Chotkevitsch, J.D. Schepelew, J.N. Rjabinin* // Sondernummer Phys.Z.Sowjet. Arbeiten auf dem Gebiete tiefer Temperaturen. — 1936. — Juni. — S. 39; *Phys.Z.Sowjet.* — 1936. — Bd. 10. — H. 2. — S. 165.
4. *L. Rossi* // Supercond. Science and Technology. — 2010. — V. 23. — № 3. — P. 1.
5. *E. Salpietro* // Supercond. Sci. Technol. — 2006. — V. 19. — № 3. — P. 84.
6. *W.J. De Haas, J. Voogd* // Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden. — 1929. — V. 18. — № 199c. — P. 31; *ibid.* — 1930. — V. 19. — № 208b. — P. 9; *ibid.* — V. 19. — № 214b. — P. 9.
7. *F.G.A. Tarr, J.O. Wilhelm* // Canad. J. Research. — 1935. — V. 12. — № 1. — P. 265.
8. *T.C. Keeley, K. Mendelsohn, J.R. Moore* // Nature. — 1934. — V. 134. — № 3394. — P. 773; *K. Mendelsohn, J.R. Moore* // *ibid.* — 1935. — V. 135. — № 3420. — P. 826; *K. Mendelsohn* // Proc. Roy. Soc. (London). — 1935. — V. 152A. — № 875. — P. 34.
9. *W.J. De Haas, J.M. Casimir-Jonker* // Proc. Roy. Acad. Amsterdam, Proc. Sec. Sci. — 1935. — V. 38. — № 1. — P. 2; *Nature.* — 1935. — V. 135. — № 3401. — P. 30; *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden.* — 1935. — V. 21. — № 233c. — P. 1.
10. *J.N. Rjabinin, L.W. Schubnikow* // Phys.Z.Sowjet. — 1935. — V. 7. — H. 1. — S. 122; *Nature.* — 1935. — V. 135. — № 3415. — P. 581.

11. *C.J. Gorter* // Physica. — 1935. — V. 2. — № 1–12. — P. 449; *H. London* // Proc. Roy. Soc. (London). — 1935. — V. 152A. — № 877. — P. 650.
12. *Г.Д. Шенелев*. Магнитные свойства сверхпроводящих сплавов. Диссертация (Харьковский Государственный университет), 1938.
13. *M. Ruhemann*. Low Temperature Physics. — Cambridge: University Press, 1937. — P. 313; *D. Shoenberg*. Superconductivity. — Cambridge: University Press, 1938. — P. 82, 84, 85; *L.C. Jackson* // Repts. Progr.Phys. — 1940. — V. 6. — P. 338; *E.F. Burton, H.G. Smith, J.O. Wilhelm*. Phenomena at the temperature of liquid helium. — N.Y.: Reinhold Publ. Corp., 1940. — P. 319; *K. Mendelsohn* // Repts. Progr.Phys. — 1946. — V. 10. — P. 362, 363; *D. Shoenberg*. Superconductivity (2nd ed.). — Cambridge: University Press, 1952. — P. 41, 44.
14. *J. Bardeen, R.W. Schmitt* // Revs. Mod. Phys. — 1964. — V. 36. — № 1. — Pt. 1. — P. 2; *C.J. Gorter* // *ibid.* — P. 6; *K. Mendelsohn* // *ibid.* — P. 10; *B.B. Goodman* // *ibid.* — P. 15; *T.G. Berlincourt* // *ibid.* — P. 20.
15. *А.А. Абрикосов* // ЖЭТФ. — 1957. — Т. 32. — № 6. — С. 1442.
16. *В.Л. Гинзбург, Л.Д. Ландау* // ЖЭТФ. — 1950. — Т. 20. — № 12. — С. 1064.
17. *A.G. Shepelev* / Superconductor (ed. A.M. Luiz). — Rijeka: Sciyo, 2010. — P. 17; <http://www.intechopen.com/books/show/title/superconductor>.

А. Шенелев

ФАЗА ШУБНИКОВА

До 75-ї річниці відкриття надпровідності II роду

Резюме

У статті викладено коротку історію відкриття надпровідності II роду видатним фізиком Л.В. Шубніковим і співавторами в УФТІ в 1936 р. Наведено основоположні експериментальні результати і високу оцінку відкриття міжнародним науковим співтовариством.

Ключові слова: надпровідні сплави, параметр Гінзбурга–Ландау, ефект Мейснера, магнітні системи.

A. Shepeliev

SHUBNIKOV PHASE

Devoted to 75th anniversary of II type superconductivity discovering

Abstract

The brief history of 2nd type superconductivity discovering by prominent physicist L. Shubnikov and joint researchers in 1936 at Ukrainian physics and technics institute is shown in the paper. The principal experimental results and high estimation of this discovery by international scholar community are pointed out.

Keywords: superconductive alloys, Ginzburg–Landau variable, Meissner effect, magnet systems.