

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



Р8 - 10498

4/7-77

Г-657

2551/2-77

И.Н.Гончаров

О ВОЗНИКНОВЕНИИ ПИК-ЭФФЕКТА
В СВЕРХПРОВОДНИКАХ ВТОРОГО РОДА

1977

P8 - 10498

И.Н.Гончаров

О ВОЗНИКНОВЕНИИ ПИК-ЭФФЕКТА
В СВЕРХПРОВОДНИКАХ ВТОРОГО РОДА

Направлено в "Письма в ЖЭТФ"



О возникновении пик-эффекта в сверхпроводниках второго рода

В достаточно концентрированной системе относительно слабых пиннинг-центров пик вблизи H_{C2} в полевой зависимости объемной силы пиннинга появляется тогда, когда в средних магнитных полях (где эффективные модули упругости решетки вихревых нитей максимальны) упругие взаимодействия между вихрями существенно понижают результирующую силу их зацепления. Тогда пик является результатом "плавления" решетки вихрей при $V \rightarrow H_{C2}$.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

Origin of Peak-Effect in the Second Type Superconductors

The macroscopic pinning force peak appears near H_{C2} when elastic interactions between vortexes appreciably decrease their connection with a concentrated enough system of relatively weak pinning centers in the middle magnetic field region (where effective moduls of the flux line lattice have a maximum value). In such a case the peak effect results from "melting" of the flux line lattice at $V \rightarrow H_{C2}$.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1977

1. В настоящее время получили распространение два основных подхода к расчету объемной плотности макроскопической силы пиннинга F_p , т.е. силы зацепления вихревых нитей /ВН/ на различных дефектах кристаллической решетки - пиннинг-центрах/ПЦ/.

А. В одном из них /1,2/ считается, что важную роль в явлении пиннинга играют упругие свойства решетки вихревых нитей /РВН/, которые определяют максимальные смещения u_m вихревых нитей из равновесных положений в треугольной решетке под действием тех или иных локальных сил пиннинга $f_p(b,t)$, а также движущих сил. Например, в случае точечных ПЦ силу пиннинга можно представить таким образом:

$$F_p^A \sim \frac{f_p}{4\pi a_\phi^2 \mu_{eff}} n_p f_p \sim \frac{u_m}{a_\phi} n_p f_p, \quad /1/$$

где n_p - объемная плотность ПЦ, a_ϕ - расстояние между ВН, $b = V/H_{C2}(T)$ - приведенная индукция, $t = T/T_c$ - приведенная температура, μ_{eff} - эффективный модуль упругости РВН.

При таком подходе для расчета μ_{eff} используются упругие постоянные $C_{ij}(b,t)$, вычисленные для идеальной треугольной РВН /1/. Величина $f_p/4\pi a_\phi^2 \mu_{eff} = u_m/a_\phi$ служит мерой эффективности ПЦ, учитывающей упругие силы в решетке вихрей. Это так называемое "решеточное" приближение.

Б. В другом подходе /3/, наоборот, считается, что вихревая решетка полностью разрушена достаточно большими силами пиннинга, так что ее упругими свойствами можно пренебречь. При этом каждый ПЦ действует на РВН с максимальной силой f_p /т.е. эффективность равна 1/, и оказывается возможным вычислить

объемную силу пиннинга прямым суммированием действий отдельных ПЦ:

$$F_p^B \sim n f_p \quad /2/$$

При сравнении с экспериментом сделать выбор между двумя подходами в большинстве случаев очень сложно из-за трудностей в определении характера, зоны действия, эффективной плотности ПЦ и т.п. Что касается теоретических оценок /1,4,5/ максимальной силы пиннинга $F_{p\lim}^{resh}$, которая определяет верхнюю границу применимости "решеточного" приближения, то, во-первых, они сделаны только для разреженной системы точечных ПЦ, а, во-вторых, численные значения их различаются более чем на порядок /хотя они предсказывают одну и ту же температурную зависимость $F_{p\lim}^{resh} \sim H_{C2}^{2,5}(T) /$.

2. Просмотр всей совокупности экспериментальных фактов указывает на то, что в целом ряде случаев для заданных b и t существует большой интервал объемных сил пиннинга, который лежит между значениями $F_{p\lim}^A(b,t)$ и $F_{p\lim}^B(b,t)$, определяющими границы применимости первого и второго подходов, и который характеризуется тем, что в нем упругими свойствами РВН еще нельзя пренебречь, но уже нельзя пользоваться для расчетов и эффективным модулем упругости, рассчитанным для идеальной вихревой решетки. В этом интервале упругие свойства вихревой решетки можно учесть, например, введя эффективный модуль, который сам является некоторой функцией от объемной силы пиннинга $\mu_{eff}^*(F_p) < \mu_{eff}$. Тогда с ростом F_p ($b = const$, $t = const$) выражение /1/, в котором вместо μ_{eff} подставлен $\mu_{eff}^*(F_p)$, непрерывным образом перейдет в /2/, когда μ_{eff}^* снизится настолько, что упругими свойствами РВН можно пренебречь. Это можно представить себе как процесс постепенного "размягчения" и, наконец, "плавления" РВН. Заметим, что в действительности границы между тремя указанными интервалами, очевидно, размыты.

Т.к. эффективный модуль упругости обычно максимален в области средних b , то, например, форма $F_p^{экспер}(b) |_{t=const}$ будет сильно зависеть от того, где именно по отношению к вышеуказанным границам окажется измеренная при этих средних b сила пиннинга. Если $F_p(b \rightarrow 0,4) < F_{p\lim}^B$, то по мере уменьшения μ_{eff}^* с ростом b/a также при $b \rightarrow 0$ /в конце концов возникает ситуация, когда РВН начинает "плавиться", что сопровождается заметным ростом сил пиннинга /см. рис.1/:

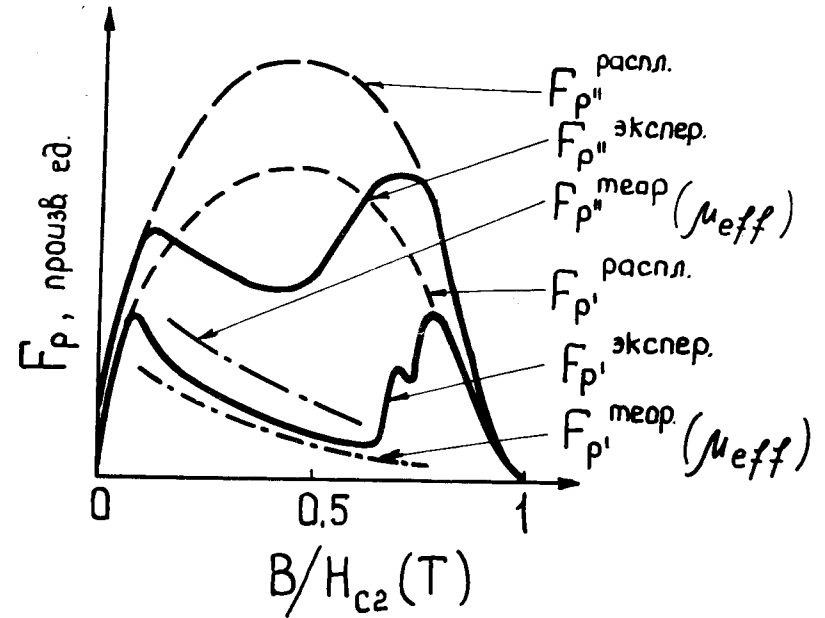


Рис. 1. Схематический вид кривых $F_p(b) |_{t=const}$ для двух различных систем ПЦ /отмечены одним или двумя штрихами/, распределенных в одном и том же сверхпроводнике.

как статической $F_c = j_c B$, так и динамической $F_d = j_d B / j_d$ определяется экстраполяцией к нулю линейного участка вольтамперной характеристики. Это - так называемый "верхний" пик /6-8/. Обычно, если t не очень близко к единице, на подъеме к нему возникают эффек-

ты /6,7/, похожие на синхронизацию /см., например, /9// - на ВАХ ниже линейного участка появляются неустойчивости или даже выгиб, с которым связано заметное повышение критического тока и, соответственно, статической силы пиннинга /иногда в виде некоторого искажения формы верхнего пика, а иногда и в виде дополнительного - "нижнего" - пика F_c). * Правее "верхнего" пика РВН полностью "расплавлена", и сила пиннинга следует вдоль кривой $F_p^{распл}(b)|_t$, которая является максимально возможной для данной микроструктуры образца. Можно предполагать, что в средних магнитных полях $F_p^{распл}(b)$ имеет, как правило, куполообразную форму, причем реальная сила пиннинга тем ближе к ней, чем больше F_p / F_p^{lim} .

На основании вышеизложенного становится ясно, почему пик-эффект, который наблюдался в очень многих работах, не связан с какой-либо определенной микроструктурой и почему он наблюдается только при средних значениях силы пиннинга /причем, по-видимому, система относительно слабых ПЦ должна быть достаточно концентрированной/.

В следующей работе будет сделан подробный анализ экспериментальных фактов, подтверждающих высказанную здесь гипотезу, приведены оценки и соображения по выбору одного из трех интервалов, к которому следует относить измеренную на опыте силу пиннинга, а также проведено сравнение с альтернативными моделями и, в частности, с моделью Крамера /11/.

Литература

1. Labush R. *Phys. stat. sol.*, 1967, 19, p.715; 1969, 32, p.439; *Crystal Lattice Defects*, 1969, 1, p.1.
2. Fietz W.A., Webb W.W. *Phys. Rev.*, 1969, 178, p.657.
3. Dew-Hughes D. *Phil.Mag.*, 1974, 30, p. 293.
4. Antesberger G., Ullmaier H. *Phil.Mag.*, 1974, 29, p. 1101.

* Впервые идея о возрастании j_c за счет перестройки РВН при уменьшении ее модуля сдвига вблизи $H_{C2}(T)$ была высказана Пиппардом /10/.

5. Ларкин А.И., Овчинников Ю.Н. *ЖЭТФ*, 1973, 65, с.1704.
6. Fricsovszky G., Goncharov I.N., Khukhareva I.S. *In.: Proc. of the 14th International Conference on Low Temperature Physics, v. 2. American Elsevier Publishing Company, New York, 1975, p.353.*
7. Борка С. и др. ОИЯИ, P8-9376, Дубна, 1975.
8. Борка С. и др. ОИЯИ, P8-10005, Дубна, 1976.
9. Кемпбелл А.М. *Критические токи в сверхпроводниках. "Мир", М., 1975.*
10. Pippard A.V. *Phil.Mag.*, 1969, 19, p.217.
11. Kramer E.J. *J.Appl. Phys.*, 1973, 44, p.1360; *Proceedings of International Discussion Meeting on Flux Pinning in Superconductors, ed. by P.Haasen and H.C.Freyhardt. Akademie der Wissenschaften in Gottingen, p.240, 1975; J. of Electronic Materials, 1975, 4, p.839.*

Рукопись поступила в издательский отдел
15 марта 1977 года.