

УДК 537.31+539.89

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СКАЧКООБРАЗНОЙ ДЕФОРМАЦИИ АЛЮМИНИЯ

В. С. Бобров, М. А. Лебедин

При скачкообразной деформации ряда металлов на гранях деформируемых образцов регистрируются электрические импульсы разной формы и длительности. Приводятся результаты исследований этих импульсов в условиях низкотемпературной деформации алюминия. Делается вывод, что короткие (\sim мкс) импульсы могут быть связаны с эффектом увлечения электронов при динамическом движении дислокационных скоплений, а импульсы большей длительности (\sim мс) могут определяться суперпозицией эффектов термоэдс и увлечения электронов. Обсуждается механизм низкотемпературной скачкообразной деформации исследованных монокристаллов.

При движении в металлах дислокации взаимодействуют с электронами проводимости, испытывают вязкое торможение и вовлекают электроны в дрейфовое движение. Теоретически эти эффекты были впервые рассмотрены в работах [1, 2]. Влияние электрон-дислокационного взаимодействия на подвижность дислокаций было установлено при исследованиях пластического течения сверхпроводников в условиях изменения их электронного состояния (см., например, обзор [3]), а первые наблюдения эффекта увлечения электронов были проведены при низкотемпературном двойниковании ниобия [4].

В [4-7] сообщалось, что в моменты скачков нагрузки на гранях деформируемых образцов ниобия регистрируются серии коротких электрических импульсов (10—100 мкВ, 1—10 мкс), каждый из которых связан с движением одной двойниковой прослойки или нескольких, движущихся одновременно со скоростью, близкой к звуковой. Двойникование — специфический механизм деформации, который можно описать как синхронное движение двойникующих дислокаций в смежных атомных плоскостях. Представляло интерес наблюдение эффекта увлечения электронов в других металлах и, в частности, в таких, деформация которых определяется дислокационным скольжением.

Для наблюдения эффекта увлечения электронов необходимы высокие плотности потока подвижных дислокаций, которые реализуются, например, в условиях скачкообразной деформации металлов [4]. Были проведены контрольные опыты при низкотемпературной скачкообразной деформации алюминия, рения и молибдена. При этом, как и в случае ниобия, регистрировались электрические импульсы, форма и величина которых зависела от условий протекания деформационных процессов. В настоящей работе содержатся результаты более подробных исследований этих эффектов при скачкообразной деформации алюминия, которая не связана с двойникованием, а определяется движением дислокационных скоплений [8].

1. М е т о д и к а

Монокристаллические образцы алюминия (99.9999 %) приготавливались в форме параллелепипедов ($4 \times 4 \times 10$ мм) с ориентацией оси, близкой к кристаллографическим направлениям типа $\langle 111 \rangle$ или $\langle 110 \rangle$, и

деформировались сжатием со скоростью 100 мкм/мин в диапазоне $T = 1.5 \div 20$ К. Контроль температуры, при которой деформировались образцы, осуществлялся при помощи полупроводниковых термометров, а ниже 4.2 К — по давлению паров гелия. Для оценки приращения деформации $\Delta \epsilon$ во время скачков нагрузки использовалось соотношение $\Delta \epsilon \approx |\Delta P| / KL$, где ΔP — глубина скачка нагрузки, $K \approx 1 \div 2$ кг/мм — жесткость системы «машина—образец», $L = L(\epsilon)$ — длина образца при степени деформации ϵ .

Электрические измерения проводились по методике [4] с улучшенной системой предварительного усиления сигналов ($K_{yc} \approx 400$ в диапазоне 40 Гц—1 МГц). Использовались измерительный трансформатор, усилитель с низким уровнем шумов и запоминающие осциллографы С8-12 и С8-14

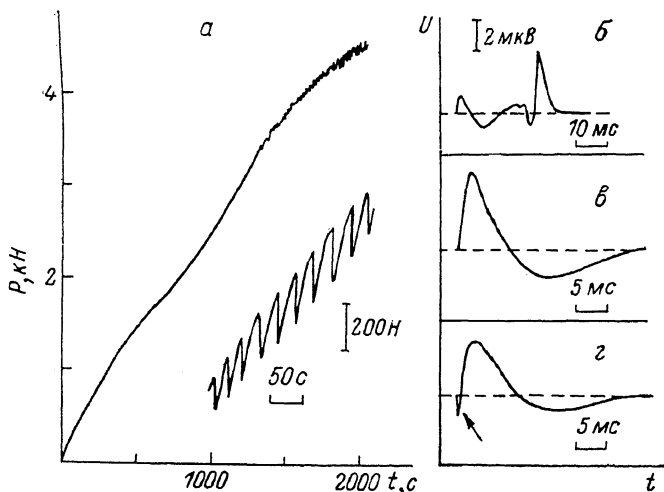


Рис. 1. Деформационные кривые (а) и примеры электрических мс-импульсов (б—з), регистрируемых на гранях деформируемых образцов Al в моменты глубоких ($\Delta \epsilon \sim 10^{-3} \div 10^{-2}$) скачков нагрузки.

P — нагрузка, t — время, U — эдс.

с блоками Я40-1102 и Я40-1103. Электрические контакты в большинстве опытов размещались на тонких «усах», отогнутых от образцов. Для этого вдоль двух противоположных боковых ребер делались глубокие надрезы. В отдельных опытах соединительные провода приваривались точечной сваркой непосредственно к граням образцов. С целью уменьшения термоэдс соединение образцов с трансформатором осуществлялось с помощью специально приготовленной из чистого алюминия (99.999 %) проволоки диаметром 0.1 мм. Для проверки влияния термоэдс использовались также медная (0.1 мм) и константановая (0.3 мм) проволоки.

Осуществлялись контрольные опыты, в которых деформируемые образцы и измерительный трансформатор помещались в экранирующий сверхпроводящий цилиндр. Проводились также специальные исследования влияния на электрические сигналы внешнего магнитного поля, которое создавалось с помощью сверхпроводящего соленоида и стабилизированного источника питания.

2. Результаты и обсуждение

В диапазоне $T \leq 10$ К после предварительной деформации до значений $\epsilon \geq 10\%$ пластическое течение исследованных монокристаллов алюминия становилось скачкообразным. Участки кривых деформации при разных уровнях регистрации нагрузки P и времени t приведены на рис. 1, а. Глубина скачков нагрузки возрастала по мере деформирования, значения $\Delta \epsilon$ обычно лежали в диапазоне $10^{-3} \div 10^{-2}$. В моменты

скачков нагрузки на гранях деформируемых образцов регистрировались импульсные электрические сигналы разной величины, формы и длительности, которые в зависимости от их длительности τ можно разделить на две основные группы: $\tau = 1 \div 10$ мс (мс-импульсы) и $\tau = 2 \div 5$ мкс (мкс-импульсы).

На рис. 1, б—г представлены примеры мс-импульсов. У разных образцов их форма отличалась, но для каждого образца она слабо зависела от температуры и степени деформации. Заметные качественные изменения формы этих импульсов наблюдались лишь в некоторых опытах, что проявлялось, как правило, в возникновении дополнительных пиков.¹ Амплитуда U мс-импульсов также не зависела от температуры испытаний, однако наблюдалась заметная зависимость U от глубины скачков нагрузки и характера сдвигообразования кристаллов. Соответствующие данные измерений амплитуды импульсов наиболее простой формы (рис. 1, в) приведены на рис. 2. Значения U были заметно выше у образцов,

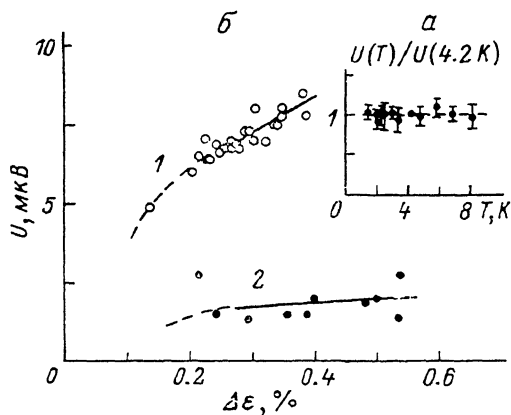


Рис. 2. Нормированная температурная зависимость амплитуды U мс-импульсов (а) и зависимость U от приращения деформации $\Delta \epsilon$ при скачках нагрузки (б).

Данные для двух образцов Al: 1 — деформация преимущественно по одной системе скольжения, 2 — по нескольким системам скольжения.

деформирующихся преимущественно по одной системе скольжения, по сравнению с образцами, скольжение которых происходило по двум и более системам. О степени анизотропии скольжения можно было судить по форме кристаллов, которую они принимали в результате деформации [9]. Характер сдвигообразования можно было изменять с помощью надрезов на боковых гранях образцов.

На фоне мс-импульсов при повышении уровня чувствительности наблюдались серии мкс-импульсов (рис. 3, а, б). Амплитуда U_i , число этих импульсов и, следовательно, их суммарная амплитуда $U_{\Sigma} = \sum |U_i|$ увеличивались с ростом глубины скачков нагрузки, причем нормированная величина суммарной амплитуды $U_{\Sigma}/\Delta \epsilon$ была примерно одинаковой для скачков разной глубины, но зависела от степени деформации. Как и в случае мс-импульсов, не было обнаружено заметного влияния температуры испытаний на амплитуду и форму мкс-импульсов.

В некоторых опытах перед глубокими скачками нагрузки наблюдались скачки заметно меньшей величины, которым соответствовали приращения деформации $\delta \epsilon \approx 10^{-5} \div 10^{-4}$. Они могут быть связаны с движением отдельных дислокационных скоплений, содержащих, по оценкам, $\sim 10^3 \div 10^4$ дислокаций. При таких скачках нагрузки регистрировались одиночные электрические импульсы (рис. 3, в, г), которые по форме, величине и длительности были аналогичны мкс-импульсам, регистрируемым в виде серий при глубоких скачках нагрузки.

Для установления природы обнаруженных электрических эффектов экспериментально проверялись и анализировались различные причины, которые могли бы приводить к возникновению разности потенциалов на гранях деформируемых образцов. В первую очередь была проверена роль электромагнитной индукции при смещении и вибрации образцов и соединительных проводов в магнитном поле Земли и наведенных маг-

¹ Ниже λ -точки жидкого гелия мс-импульсы сопровождаются электрическими колебаниями. Это явление будет рассмотрено ниже.

нитных полях. Для этого были проведены исследования при деформировании образцов во внешнем магнитном поле. Магнитное поле до 10^3 Э не влияло на регистрируемые электрические импульсы, а при $H \geq 100$ Э наряду с мс- и мкс-импульсами наблюдались индуцированные электрические колебания, амплитуда которых зависела от H и условий монтажа проводов. Эти данные, а также результаты контрольных опытов с использованием сверхпроводящего экрана позволяют сделать вывод, что исследуемые импульсы не связаны с индукцией.

При резком сдвиге образцов в моменты скачков нагрузки может проявляться эффект Стюарта—Толмена [10]. Наиболее заметную роль он мог бы играть в случае мкс-импульсов. По оценкам, в которых использовались представления об ускоренном сдвигообразовании в образцах при скачках нагрузки, даже для этих импульсов величина эффекта Стюарта—Толмена примерно на два порядка ниже амплитуды регистрируемых импульсов.

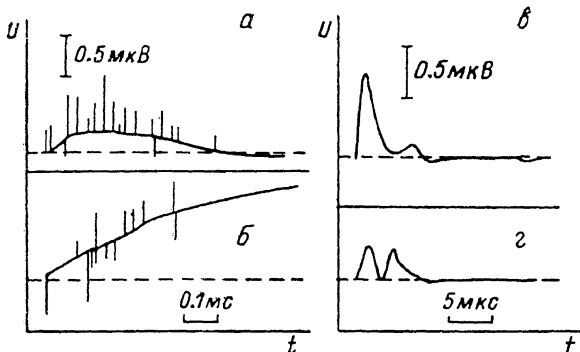


Рис. 3. Примеры коротких (мкс-) электрических импульсов, регистрируемых на фоне мс-импульсов в моменты глубоких скачков нагрузки (а, б), и одиночных мкс-импульсов, наблюдаемых при небольших ($\delta \sim 10^{-5} \div 10^{-4}$) скачках нагрузки (в, г).

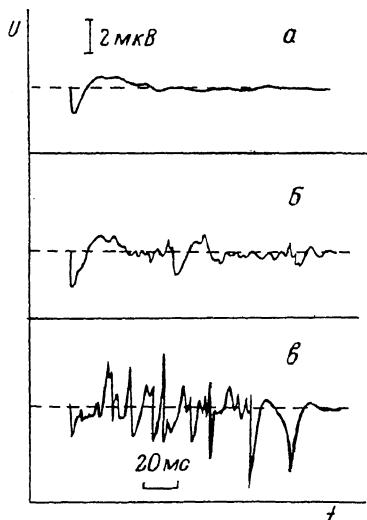


Рис. 4. Примеры мс-импульсов и сопровождающих их электрических колебаний, регистрируемых при глубоких скачках нагрузки в условиях понижения температуры деформирования Al ниже λ -точки жидкого гелия.

Измерения после предварительной деформации при 4.2 К. а — 2.18, б — 2.09, в — 1.47 К.

При скачках нагрузки в кристаллах выделяется тепло, поэтому особое внимание было уделено роли термоэдс. Электрические эффекты, связанные с термоэдс, могут выступать в качестве альтернативной причины исследуемых импульсов и маскировать эффект увлечения электронов.

Выше уже отмечалось, что мс- и мкс-импульсы не зависели от температуры испытаний и магнитного поля до 10^3 Э. Если учесть, что термоэдс зависит от этих факторов, причем термоэдс алюминия при низких температурах меняет знак в полях $H \leq 10^3$ Э [11], то эти данные могут свидетельствовать об отсутствии заметного вклада термоэдс в эти импульсы. Однако такой вывод можно считать обоснованным только при небольшом разогреве образцов по сравнению с исходной температурой.

С помощью термопары, которая приваривалась к одной из боковых граней кристаллов, были проведены контрольные измерения температуры в моменты скачков нагрузки. В этих опытах были зарегистрированы кратковременные ($\sim 1 \div 10$ мс) повышения температуры приповерхностной области образцов на $\Delta T \leq 20 \div 40$ К. Полученные данные, которые следует рассматривать только как оценку снизу истинного нагрева внутри кристаллов [8, 12, 13], сопоставимы или заметно превышают диапазон исходных значений T . Характерные времена изменения T примерно совпадают с длительностью мс-импульсов. Это дает основания для пред-

положения о возможной связи мс-импульсов с процессами выделения и релаксации тепла в деформируемых образцах.

О существенной роли термоэда в возникновении мс-импульсов свидетельствует также чувствительность их амплитуды к изменению материала соединительных проводов и геометрии расположения контактов на образцах. Например, при использовании алюминиевых соединительных проводов перемещение контактов с «усов» на грани кристаллов приводило к уменьшению амплитуды мс-импульсов в 1,5—2 раза, а при замене материала одного из проводов на константан наблюдалось ее увеличение в 3—5 раз.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что основную роль в формировании мс-импульсов играет термоэдс пары «образец—соединительные провода». Вместе с тем разнообразие формы этих импульсов (см., например, рис. 1) и влияние геометрии скольжения на их величину (рис. 2) дают основания полагать, что они в какой-то мере отражают и характер развития процессов деформации.

В связи с ролью термоэда в мс-импульсах обратим внимание на своеобразное явление, которое было обнаружено при понижении температуры деформирования ниже λ -точки жидкого гелия после предварительной деформации при 4,2 К. При $T < T_\lambda$ обычные мс-импульсы сопровождались дугом (~ 100 мс) электрических колебаний, а в отдельных опытах возникала также тонкая осциллирующая структура самих мс-импульсов. Колебания появлялись вблизи T_λ и развивались по мере понижения температуры (рис. 4), а отогрев образцов выше T_λ приводил к их исчезновению. Амплитуда этих колебаний зависела от материала соединительных проводов, она увеличивалась при использовании проводов из константана. С помощью термодпары были зарегистрированы коррелирующие с этими колебаниями осцилляции температуры поверхности образцов. Учитывая эти результаты, можно предположить, что обнаруженные колебания имеют термоэлектрическую природу. Они могут быть связаны, например, с тепловыми волнами в сверхтекучем гелии или с температурными неустойчивостями в самих образцах из-за измененных условий теплоотвода на поверхности [14]. В связи с ролью поверхности отметим, что наблюдалось влияние состояния поверхности на амплитуду этих колебаний, а в некоторых опытах при деформации образцов с тщательно полированной поверхностью они отсутствовали. Обратим внимание на некоторое сходство этого явления с температурно-электрическими волнами, возникающими при джоулевым саморазогреве проводников, которые подробно рассмотрены в монографии [15].

Мкс-импульсы в отличие от мс-импульсов не зависели от материала соединительных проводов и изменений в геометрии их размещения. При измерениях температуры образцов в моменты скачков нагрузки ни в одном из опытов не было зарегистрировано даже следов кратковременных повышений T в мкс-диапазоне. Можно поэтому полагать, что в возникновении мкс-импульсов термоэдс пары «образец—соединительные провода» не играет существенной роли.

Проанализируем роль локального разогрева в формировании мкс-импульсов. Короткие импульсы термоэда при локальном разогреве могут возникнуть, если термоэлектрические свойства образцов в процессе деформации становятся неоднородными. Амплитуда этих импульсов должна зависеть от степени неоднородности дифференциальной термоэда и уровня локального разогрева по сравнению с T окружающего объема образца, а кинетика — от времени делокализации нагрева $\tau_T \sim \rho l^2 c / 4\lambda$, где ρ , c , λ — плотность, теплоемкость и теплопроводность материала; l — характерный размер образца. Исследования показали, что амплитуда и длительность мкс-импульсов не зависят от степени деформации образцов. Не было обнаружено заметного уменьшения амплитуды и увеличения длительности мкс-импульсов в сериях при глубоких скачках нагрузки по мере общего нагрева кристаллов, т. е. по мере увеличения показаний термодпары или коррелирующей с ними величины мс-импульсов (см.,

например, рис. 3, а, б).² Наконец, как указывалось выше, амплитуда и длительность импульсов в сериях соответствуют отдельным мкс-импульсам при скачках нагрузки небольшой величины, когда общий нагрев образцов не превышает нескольких градусов.

Приведенные данные позволяют сделать вывод, что мкс-импульсы имеют нетермоэлектрическую природу. Сопоставим экспериментальные данные с результатами теории увлечения электронов подвижными дислокациями [2]. Для оценки разности потенциалов U на гранях образцов при увлечении электронов направленным потоком дислокаций воспользуемся соотношением [2-4]

$$U \sim \frac{\Delta^2 d}{4e\mu v_F \kappa} \dot{\epsilon},$$

где μ , Δ — химический и деформационный потенциалы; e , v_F — заряд и фермиевская скорость электронов; d , κ — поперечный размер образцов и ориентационный множитель; $\dot{\epsilon}$ — скорость пластической деформации в моменты скачков нагрузки. Используя применительно к алюминию следующие значения параметров: $\Delta \sim \mu \sim \epsilon_F \approx 10$ эВ, $v_F \approx 2 \cdot 10^8$ см/с, $d \approx 0.5$ см, $\kappa \approx 0.5$, получим для амплитуды электрических сигналов оценку $U \sim 10^{-8} \dot{\epsilon}_{\max}$ В. Численное сопоставление данных удобно провести для одиночных мкс-импульсов при неглубоких скачках нагрузки ($\delta\epsilon \approx 10^{-5} \div 10^{-4}$), поскольку в этом случае, как уже отмечалось, каждому импульсу можно поставить в соответствие приращение деформации при данном скачке нагрузки. Форма мкс-импульсов близка к треугольной, что позволяет воспользоваться для оценки максимальной скорости деформации во время скачков нагрузки соотношением $\dot{\epsilon}_{\max} \approx 2 \langle \dot{\epsilon} \rangle \approx 2\delta\epsilon / \tau \approx 7 \div 70$ ($\tau \approx 3$ мкс — полуширина импульсов). Отсюда получим оценку $U \sim 0.07 \div 0.7$ мкВ, которая хорошо согласуется с экспериментальными данными ($U \approx 0.1 \div 1$ мкВ).³

Суммируя результаты, можно сделать вывод, что электрические сигналы, регистрируемые при скачкообразной деформации алюминия, имеют различную природу. Мкс-импульсы можно связать с эффектом увлечения электронов при движении дислокационных скоплений, причем длительность этих импульсов свидетельствует о динамической природе их движения ($V \sim 10^5$ см/с). Что касается мс-импульсов, важную роль в их возникновении играет термоэдс. Определенный вклад в мс-импульсы может давать и эффект увлечения электронов, который наряду с влиянием движущихся дислокаций на формирование температурного поля в образцах может быть причиной разнообразия формы мс-импульсов (рис. 1, б—г).

На основании проведенных исследований можно высказать предположение, что скачкообразная деформация алюминия связана с активацией движения дислокаций в результате локального разогрева кристаллов при движении отдельных дислокаций или их скоплений. Тепловой механизм скачкообразной деформации рассматривается в ряде работ, например [8, 16, 17]. Наблюдение мкс-импульсов свидетельствует о том, что наряду с термоактивационными процессами происходит и динамическое движение дислокационных скоплений. Учитывая, что мс-импульсы обычно предваряются мкс-импульсами (рис. 3), можно предположить, что именно эти скопления инициируют термостимулированное формирование дислокационных лавин при скачкообразной деформации алюминия.

Таким образом, наблюдение электрических эффектов при деформации различных металлов представляет интерес не только для проверки предсказаний теории электрон-дислокационного взаимодействия, но и

² Эти результаты аналогичны данным исследований мкс-импульсов в условиях двойникования ниобия [4-7]. Отметим, что мс-импульсы в ниобии удавалось наблюдать только при использовании соединительных проводов из константана, а их амплитуда была в несколько раз ниже амплитуды мкс-импульсов.

³ Отметим, что сопоставление теории и эксперимента можно проводить только по порядку величины, так как в теории [2] рассматривается случай равномерного движения дислокаций, однородно распределенных по кристаллу.

с точки зрения исследования кинетики и механизмов деформационных процессов и сопровождающих явлений, связанных с возбуждением фононной и электронной подсистем деформируемых кристаллов. В частности, исследуемое явление может выступать в качестве инструмента исследования быстропротекающих деформационных процессов.

Авторы благодарят Ю. А. Осипьяна и В. Я. Кравченко за внимание к работе и обсуждение результатов, А. В. Старшинова за содействие, С. С. Шевага — за техническую помощь.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Кравченко В. Я. // ФТТ. 1966. Т. 8. № 3. С. 927—935.
- [2] Кравченко В. Я. // ФТТ. 1967. Т. 9. №. 4. С. 1050—1057.
- [3] Ossiryan Yu. A., Bobrov V. S. // Cryst. Res. Sc Technol. 1984. V. 19. N 6. P. 827—838.
- [4] Бобров В. С., Лебедкин М. А. // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т. 38. № 7. С. 334—336.
- [5] Lebjodkin M. A., Zorin S. N., Bobrov V. S. // Proc. Second Intern. Conf. on Phonon Physic. Budapest, 1985. P. 242—244.
- [6] Лебедкин М. А., Бобров В. С. // Тез. докл. на 24 Всес. совещ. по физике низких температур. Тбилиси, 1986. Ч. II. С. 105—106.
- [7] Бобров В. С., Лебедкин М. А. // Тез. докл. на Всес. семинаре «Фундаментальные проблемы физики ударных волн». Азау, 1987. Т. 1. Ч. I. С. 86—87.
- [8] Клявин О. В. Физика пластичности кристаллов при гелиевых температурах. М.: Наука, 1987. 256 с.
- [9] Смирнов Б. И. Дислокационная структура и упрочнение кристаллов. Л.: Наука, 1981. 236 с.
- [10] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 620 с.
- [11] Блатт Ф. Дж., Шредер П. А., Фойлз К. Л., Грейг Д. Термоэлектродвижущая сила металлов. М.: Metallurgia, 1980. 248 с.
- [12] Баранова Г. К., Бобров В. С., Копецкий Ч. В., Сальников Г. И. // ЖЭТФ. 1979. Т. 77. № 1 (7). С. 257—269.
- [13] Долгин А. М., Бенгус В. Э., Ефимов Ю. В. // Тез. докл. на XI Всес. конф. «Физика прочности и пластичности». Куйбышев, 1986. 194 с.
- [14] Халатников И. М. Теория сверхтекучести. М.: Наука, 1971. 320 с.
- [15] Гуревич А. В., Минц Р. Г. Тепловые автоволны в нормальных металлах и сверхпроводниках. М., ИВТАН, 1987. 165 с.
- [16] Малыгин Г. А. // ФММ. 1987. Т. 63. № 5. С. 864—875.
- [17] Estrin Yu., Kubin L. P. // Scripta Met. 1980. V. 14. N 12. P. 1359—1364.

Институт физики твердого тела АН СССР
Черноголовка
Московская область

Поступило в Редакцию
20 октября 1988 г.
В окончательной редакции
6 января 1989 г.