

УДК 539.67 : 539.32 : 539.374

© 1993

АНОМАЛИИ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ И ДЕФЕКТА МОДУЛЯ ЮНГА В ПРОЦЕССЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ КРЕМНИСТОЙ БРОНЗЫ

К. В. Сапожников, С. Б. Кустов, П. Копаня,¹ Ш. Пилецки

Внутреннее трение (ВТ) и дефект модуля Юнга (ДМЮ) поликристаллической кремнистой бронзы исследованы в процессе деформирования в температурном диапазоне 200—400 К. Возбуждение ультразвуковых колебаний частотой около 100 кГц и измерения ВТ, ДМЮ и амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) проводились методом составного вибратора. Пики ВТ, сопровождаемые скачкообразным изменением резонансной частоты вибратора, наблюдались в процессе деформирования образцов двух типов бронз. АЧХ вибратора имели два максимума в окрестностях пиков ВТ. Наблюдаемые аномалии связываются с наличием в исследованных образцах частиц второй фазы. Показано, что параметры аномалий зависят от размеров и формы частиц второй фазы, температуры деформирования, исходного уровня и распределения внутренних напряжений в образцах.

Первые результаты исследований ВТ и ДМЮ в процессе деформирования образцов промышленной кремнистой бронзы приведены в [1]. Были обнаружены аномалии в поведении исследованных характеристик: пики ВТ, сопровождаемые скачкообразным изменением резонансной частоты вибратора. В настоящей работе результаты [1] сравниваются с данными, полученными для сплава, отличающегося от промышленного структурой и содержанием примесей. Исследовано влияние целенаправленного изменения структуры данного сплава на особенности поведения ВТ и ДМЮ в процессе деформирования.

1. Методика экспериментов

Возбуждение в образцах ультразвуковых колебаний частотой около 100 и 150 кГц и измерения ВТ, ДМЮ, АЧХ проводились резонансным методом трехкомпонентного пьезоэлектрического вибратора на установке с автоматизированным управлением и обработкой данных [2]. Образцы сечением около 2×2 мм и длиной три полуволны ультразвука (около 50 мм для частоты 100 кГц) вырезались из заготовок и отжигались в течение 2 ч при температуре около 160 °С во время приклейки к пьезокварцам. Измерения осуществлялись в процессе трехточечного изгиба таким образом, что точки приложения нагрузки находились в узлах смещения стоячей волны [3]. Эксперименты проводились при постоянной амплитуде колебательной деформации в амплитудно-независимой области (около 10⁻⁶). Образцы деформировались в гидравлической машине «Инстрон 1341», оснащенной температурной камерой. Использовалась скорость перемещения опор в диапазоне 10⁻⁵—10⁻³ мм/с, ее изменение слабо влияло на наблюдаемые зависимости.

¹ Институт основных проблем техники АН Польши, Варшава.

2. Характеристика образцов

В данной работе исследовалась кремнистая бронза двух типов: 1) промышленный сплав марки ВК-31 (Cu — 94.8, Si — 1.6, Mn — 1.4, Ti — 0.7, прочее — 1.5 мас. %); 2) лабораторный сплав (Cu — 96.3, Si — 1.5, Mn — 1.4, Ti — 0.7, прочее — не более 0.1 мас. %; чистота исходных материалов: Cu — 99.9, Si — не хуже 99.99, Mn — 99.0, Ti — 99.5 мас. %). Отливки ВК-31 подвергались гомогенизации и термомеханической обработке. По данным металлографических исследований бронзы ВК-31, средний размер зерна порядка 0.1 мм, в зернах наблюдается небольшое число частиц второй фазы размером до 5 мкм. Бронза лабораторного состава выплавлялась в атмосфере аргона и не подвергалась гомогенизации и термомеханической обработке. Металлографические исследования показали наличие дендритной структуры, имеющей в сечении вид сетки из четырехугольных ячеек размером около 0.03 мм, средний размер литейного зерна порядка 1 мм. Внутри зерен, в областях, обедненных медью, имеется значительное количество частиц второй фазы размером до 50 мкм. Данные оптической микроскопии подтверждаются фотографиями, полученными с помощью растрового электронного микроскопа.

Эксперименты были проведены на семи образцах бронзы ВК-31 (один на частоте 150 кГц, остальные — 100 кГц) и на шести образцах лабораторного состава (все — 100 кГц). Для проверки влияния степени неоднородности структуры на наблюдаемые особенности один из образцов лабораторной бронзы после экспериментов в исходном состоянии дважды был подвергнут отжигу в вакууме при 1000 °С (первый раз — в течение 15 мин, второй раз — 5 ч) с последующей закалкой в воду. После каждого отжига проводились измерения ВТ и ДМЮ в процессе деформирования. Металлографические исследования показали, что в результате термообработок размер зерна практически не менялся, дендритная структура не обнаруживалась уже после первого отжига, частицы второй фазы приобрели более округлую форму после первого отжига и значительно уменьшились в размерах после второго (наблюдались частицы размерами до 15 мкм).

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Образцы деформировались с постоянной скоростью перемещения опор до напряжений, несколько превышающих предел текучести на изгиб, после чего разгружались. Почти во всех образцах (кроме двух) во всем исследованном температурном диапазоне (200—400 К) в процессе деформирования наблюдались пики ВТ, которые появлялись либо сразу во время первого нагружения образца при комнатной температуре, либо только в процессе деформирования при повышенной температуре (после чего пик наблюдался уже и при более низких температурах). От образца к образцу наблюдавшиеся пики отличались по высоте, ширине и величине нагрузки на образце, при которой они регистрировались. На рис. 1, а показан пик ВТ для одного из образцов бронзы ВК-31 при комнатной температуре. Пик сопровождается скачкообразным изменением резонансной частоты вибратора (рис. 1, б).

В двух образцах (один — ВК-31, другой — лабораторный), в которых аномалии ВТ и ДМЮ в процессе деформирования не наблюдались, металлографические исследования не показали видимых отличий структуры от структуры других образцов. Если учесть, что в некоторых образцах пики ВТ первоначально появлялись только в процессе деформирования при повышенной температуре, то можно предположить, что для данных образцов температура деформирования, при которой могут появиться пики, лежит выше верхней границы исследованного температурного диапазона.

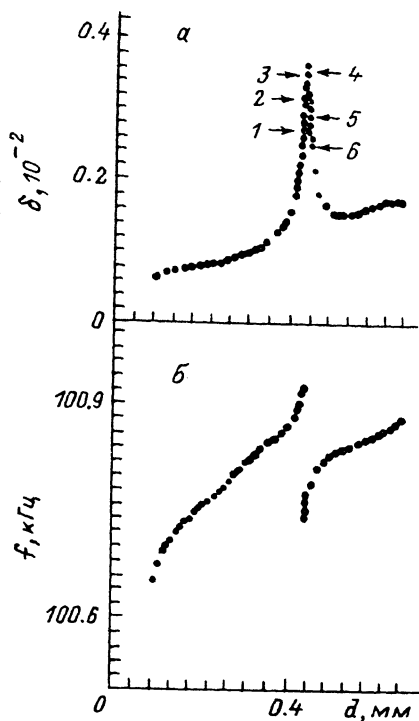
Рис. 1. Декремент δ (а) и резонансная частота f (б) вибратора в зависимости от стрелы прогиба d для образца бронзы ВК-31 при наличии пика ВТ.

Стрелки указывают точки, для которых на рис. 4 приведены резонансные кривые вибратора.

Для образцов промышленной и лабораторной бронзы отмечено значительное отличие в величинах деформирующих напряжений, вызывающих появление пика ВТ. В образцах лабораторной бронзы пик регистрировался в упругой области диаграммы деформирования, иногда в самом начале нагружения, а в образцах бронзы ВК-31 — в окрестностях начала пластического течения или в пластической области. При разгрузке образцов пики ВТ также наблюдались, но смещались в сторону меньших величин приложенных напряжений. При этом форма пиков сохранялась, а высота обычно несколько увеличивалась. В некоторых образцах как ВК-31, так и лабораторной бронзы, кроме основного пика ВТ, наблюдались один или два дополнительных пика меньшей величины, также сопровождавшиеся скачкообразным изменением резонансной частоты вибратора.

При повторных нагружениях одного и того же образца форма и высота пика менялись слабо, а величина нагрузки на образце, при которой наблюдался пик, зависела от величины промежутка времени между нагружениями. На рис. 2 показана динамика пика ВТ в одном из образцов лабораторной бронзы для двух последовательных циклов нагрузка—разгрузка. Видно, что при немедленном повторном нагружении пик наблюдается при значениях нагрузки, близких к значениям для пика при предшествующей разгрузке (рис. 2, б, в). Этот факт можно объяснить, если предположить, что появление пика ВТ зависит от уровня внутренних напряжений в образце. Напряжения, созданные в образце при первом нагружении, за короткий промежуток времени между нагружениями (около 10 мин) не успевают релаксировать, и уровень внутренних напряжений, необходимый для появления пика ВТ, достигается при меньших значениях нагрузки. В случаях, когда повторное нагружение производилось через достаточно длительный промежуток времени (сутки), пик ВТ успевал вернуться к тем значениям нагрузки, при которых он наблюдался при предшествующем нагружении. Сделанное выше предположение позволяет также объяснить смещение пика в область меньших напряжений при разгрузке образца. Поскольку наличие частиц второй фазы и границ зерен приводит к локальной концентрации внутренних напряжений на границах [4], можно также предположить, что большую роль в появлении пика ВТ играет распределение внутренних напряжений в образце.

На рис. 3 изображены зависимости ВТ в процессе деформирования одного и того же образца при температурах 200, 300 и 400 К для ВК-31 (а) и лабораторного сплава (б). Измерения проводились в следующем порядке: сначала при комнатной температуре, затем при повышенной, снова при комнатной и в последнюю очередь — при пониженной. Видно, что чем ниже температура деформирования, тем меньше пик ВТ.



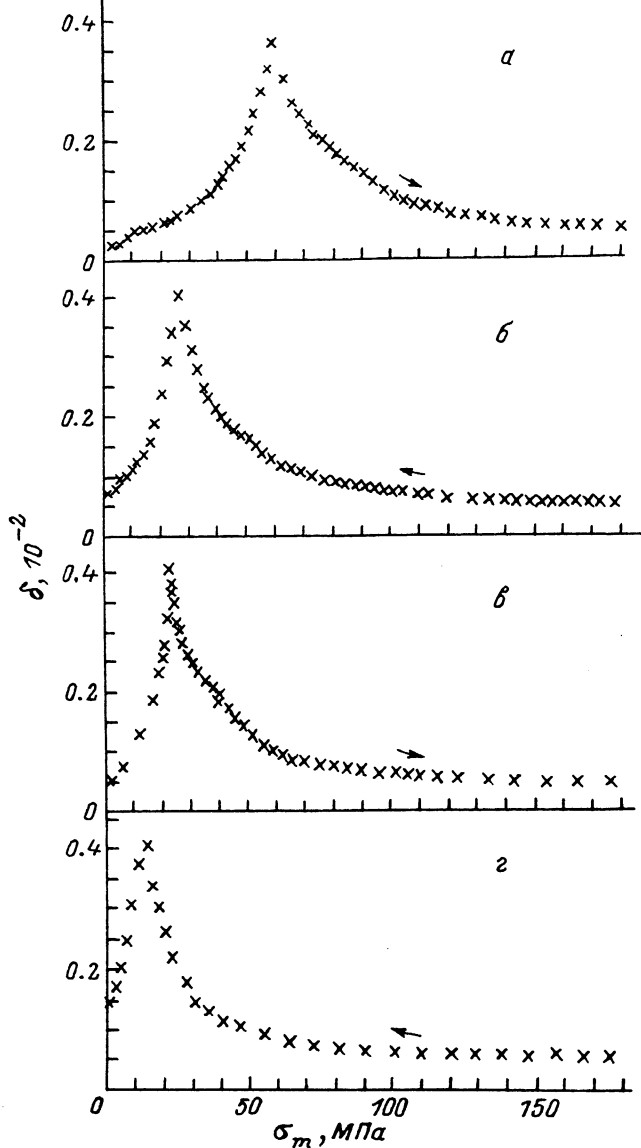


Рис. 2. Декремент вибратора δ в зависимости от нагрузки на образце, пересчитанной в максимальное напряжение крайнего волокна σ_m , для двух последовательных циклов нагрузка — разгрузка образца лабораторной бронзы.

Стрелки показывают направление изменения величины нагрузки.

Понижение температуры деформирования приводит также к смещению пика в область больших значений прогиба (деформирующих напряжений), особенно при температурах ниже комнатной. Эти закономерности характерны как для лабораторной бронзы, так и для ВК-31. Исходя из результатов экспериментов при различных температурах, можно сделать вывод, что повышение температуры деформирования облегчает условия протекания процесса, сопровождаемого наблюдаемыми аномалиями. Высокий уровень ВТ в пластической области для образца лабораторной бронзы при 200 К (кривая 1 на рис. 3, б) связан с появлением при предшест-

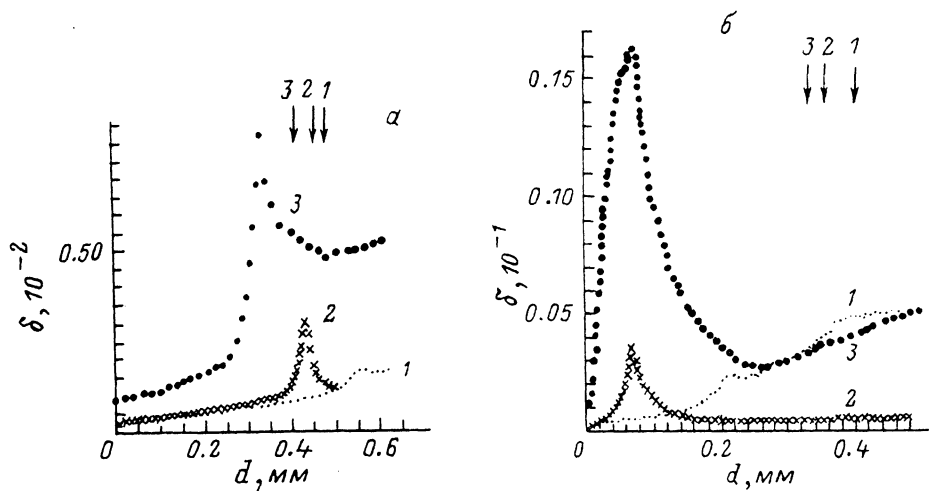


Рис. 3. Зависимости декремента вибратора δ от стралы прогиба d одного из образцов бронзы ВК-31 (а) и одного из образцов лабораторного сплава (б) при температурах 200 (1), 300 (2), 400 К (3). Стрелки показывают величины прогиба, соответствующие началу пластического течения образца.

вующем деформировании дополнительного пика ВТ в окрестности начала пластического течения.

В ряде экспериментов производились измерения АЧХ пьезоэлектрического вибратора для каждой экспериментальной точки в процессе деформирования. Было обнаружено, что АЧХ вибратора имеют два максимума в окрестностях пиков ВТ. Когда достигается максимальная величина затухания, амплитуды максимумов равны и скачкообразное изменение резонансной частоты (рис. 1, б) соответствует переходу с одного максимума на другой в процессе их плавного изменения, так как экспериментальная установка автоматически настраивается на максимум амплитуды. На рис. 4 показаны АЧХ вибратора, измеренные в точках, отмеченных на рис. 1, а стрелками. Эксперименты показали, что форма пиков ВТ и величины скачкообразных изменений резонансной частоты вибратора зависят от того, насколько разнесены по частоте максимумы АЧХ составного вибратора, от их ширины и динамики изменения.

Согласно теории колебаний, АЧХ имеет два максимума в случае вынужденных колебаний системы с двумя степенями свободы [5]. Расщепление резонансной частоты колебательной системы, приводящее к неоднозначности в определении упругих модулей, отмечалось неоднократно при измерениях температурных зависимостей ВТ и упругих постоянных различных материалов резонансным методом [6-11], а в процессе деформирования подобное поведение колебательной системы зарегистрировано, по-видимому, впервые. Пики ВТ наблюдались ранее как в процессе активного деформирования [3, 12-18], так и в процессе ползучести [19, 20]. К сожалению, данные о поведении дефекта модуля приведены только в [18-20]. В этих работах изменение дефекта модуля не было скачкообразным. Появление в процессе деформирования пиков ВТ связывалось с процессами динамики дислокаций [12-15, 18-20] или с наличием в образцах малоугловых границ [17].

Влияние высокотемпературного отжига с последующей закалкой на пик ВТ для одного из образцов лабораторной бронзы отображено на рис. 5. Видно, что после 15-минутного отжига при 1000 °С пик ВТ резко сместился в пластическую область, а 5-часовой отжиг при той же темпе-

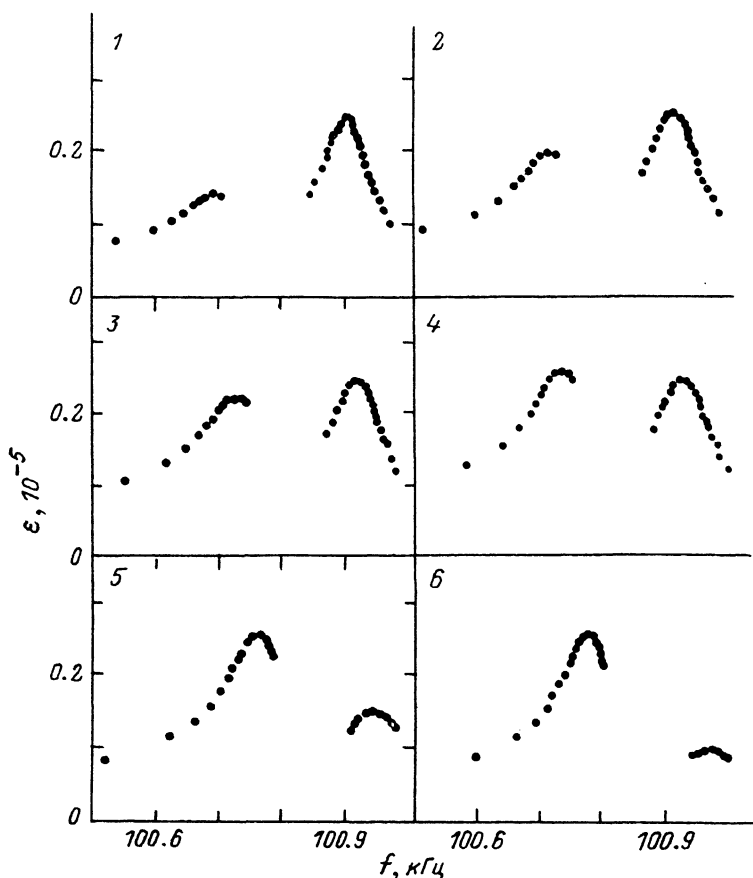


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики вибратора при различных значениях стрелы прогиба в окрестностях изображенного на рис. 1 пика ВТ в образе бронзы ВК-31.

Амплитуда колебаний стабилизировалась на уровне $\varepsilon = 2.5 \cdot 10^{-6}$.

ратуре привел к значительному уменьшению высоты пика. Сравнивая эти данные с результатами исследования влияния отжига на структуру бронзы лабораторного состава (см. раздел 2), можно отметить связь между изменениями формы и размеров частиц второй фазы и параметрами пика ВТ в процессе деформирования. Этот результат согласуется также с наблюдаемым отличием в величинах деформирующих напряжений, вызывающих появление пика ВТ, для промышленного и лабораторного сплавов. Все это позволяет связать наблюдаемые в процессе деформирования аномалии ВТ, ДМЮ и АЧХ вибратора с наличием в исследованных образцах частиц второй фазы. Результаты данной работы показывают, что параметры аномалий зависят от размеров и формы частиц второй фазы, температуры деформации, исходного уровня и распределения внутренних напряжений в образцах. Необходимо отметить, что авторами [11] проявление дополнительных степеней свободы колебательной системы также связывалось с особенностями структуры исследованных ими материалов.

Более подробное обсуждению результатов данной работы и их интерпретации будет посвящено отдельное сообщение.

Авторы благодарят С. Н. Голяндина, Б. К. Кардашева, С. П. Никанорова, С. А. Пульнева и В. М. Чернова за помощь в работе и полезные обсуждения,

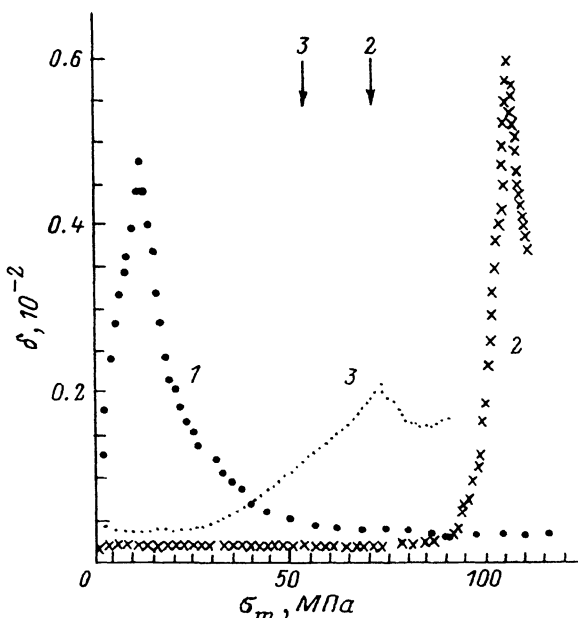


Рис. 5. Декремент вибратора δ в зависимости от нагрузки на образце, пересчитанной в максимальное напряжение крайнего волокна σ_m , для одного из образцов лабораторной бронзы.

1 — в исходном состоянии, 2 — после 15-минутного отжига при 1000°C и последующей закалки, 3 — после 5-часового отжига при 1000°C и последующей закалки. Стрелки показывают величины напряжений, соответствующих началу пластического течения (для образца в исходном состоянии начало пластического течения при $\sigma_m = 140$ МПа).

С. П. Степанова (ФЭИ, Обнинск) — за проведение электронно-микроскопических исследований.

Список литературы

- [1] Pilecki S., Kopania P., Kustov S. B., Kardashev B. K., Sapozhnikov K. V., Chernov V. M. // Proc. 6th European Conf. Internal Friction and Ultrasonic Attenuation in Solids. 1991. (In print).
- [2] Кустов С. Б., Кардашев Б. К., Иванов В. И., Голяндин С. Н., Буренков Ю. А., Никаноров С. П., Чернов В. М., Люфт М., Маттауш Г., Хегенбарт Е., Шрайбер Ю. // Препринт ФЭИ-2141. Обнинск, 1990. 20 с.
- [3] Хохлов Г. Г., Кардашев Б. К., Костыгов А. С., Никаноров С. П., Пеллер В. В., Ретель В. Р. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1976. Т. 40. № 7. С. 1388—1391.
- [4] Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов: Пер. с англ. М., 1972. 408 с.
- [5] Крауфорд Ф. Волны: Пер. с англ. М., 1974. 528 с.
- [6] Hoeschli U. T. // Solid State Commun. 1970. V. 8. N 18. P. 1487—1490.
- [7] Перро И. Т., Фрицберг В. Л. // ФТТ. 1979. Т. 21. № 10. С. 3176—3178.
- [8] Барьяхтар В. Г., Варюхин В. Н., Дацко О. И., Резников А. В., Стронгин С. Б. // ФНТ. 1988. Т. 14. № 9. С. 984—987.
- [9] Белецкий В. И., Бондаренко А. В., Моргун В. Н., Оболенский М. А., Попов В. П., Чеботаев Н. Н., Воронов А. П., Каток Л. А., Панфилов А. С., Свечкарев И. В. // Тез. докл. 2-й Всесоюзной конф. по ВТСП. Киев, 1989. Т. 3. С. 16—17.
- [10] Бурханов А. М., Гудков В. В., Жестовских И. В., Ткач А. В., Устинов В. В. // ФММ. 1990. № 1. С. 68—74.
- [11] Мелик-Шахназаров В. А., Арабаджян Н. Л., Тавхелидзе В. М. // Сверхпроводимость. 1990. Т. 3. № 9. С. 2054—2060.
- [12] Maringer R. E. // J. Appl. Phys. 1953. V. 24. N 12. P. 1525.
- [13] Chiao W. F., Gordon R. B. // Appl. Phys. Letters. 1963. V. 3. N 5. P. 88—89.
- [14] Swanson R. A., Green R. E., Jr. // Trans. AIME. 1964. V. 230. N 6. P. 1390—1394.
- [15] Baker G. S., Carpenter S. H. // Rev. Sci. Instrum. 1965. V. 36. N 1. P. 29—31.
- [16] Baker G. S., Carpenter S. H. // Trans. AIME. 1966. V. 236. N 5. P. 700—702.
- [17] Иванов В. И., Воробьев М. А., Кардашев Б. К., Никаноров С. П., Пеллер В. В. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1980. Т. 44. № 2. С. 337—339.

- [18] Лебедев А. Б., Кустов С. Б., Кардашев Б. К. // ФТТ. 1992. Т. 34. № 9. С. 2915—2921.
[19] Bonetti E., Evangelista E., Gondi P. // Phys. Stat. Sol. (a). 1981. V. 63. N 2. P. 645—653.
[20] Kong Q. P., Shan B. // Proc. 9th Int. Conf. Internal Friction and Ultrasonic Attenuation in Solids / Ed. T. S. Ke. Beijing, 1990. P. 419—422.

Поступило в Редакцию
3 августа 1992 г.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург
