

©1993

ВЛИЯНИЕ ГЕТЕРОГЕННОЙ И ГОМОГЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ СТЕКЛЕ

В.А.Хоник, И.А.Сафонов, Т.Н.Рябцева

Исследовано влияние гетерогенной и гомогенной пластической деформации на температурные зависимости внутреннего трения и модуля упругости металлического стекла $Ni_{60}Nb_{40}$ при температурах ниже комнатной. Установлено, что гетерогенная деформация приводит к возникновению релаксационных максимумов затухания и появлению гистерезисного внутреннего трения. Обнаруженные аномалии неупругих свойств могут быть качественно интерпретированы в рамках дислокационных представлений о гетерогенном пластическом течении металлического стекла. Гомогенная деформация не оказывает влияния на низкотемпературное внутреннее трение. Сделан вывод о существенном различии микромеханизмов локализованной и однородной деформации металлического стекла.

Измерения внутреннего трения (ВТ) могут давать уникальную, пока не достижимую другими методами информацию о динамике дефектной структуры твердых тел. В полной мере это относится и к металлическим стеклам (МС). Однако потенциально высокие возможности метода ВТ остаются в значительной степени не реализованными для исследования процессов пластического течения МС.

Как известно [1,2], пластическая деформация МС в зависимости главным образом от температуры испытания является либо гетерогенной (локализованной с образованием полос сдвига), либо гомогенной (однородной, вязкой). Целенаправленное изучение методом ВТ металлических стекол, подвергнутых предварительной гетерогенной деформации, было проведено в работах [3-9]. В [3] установлено слабое влияние больших степеней гетерогенной деформации прокаткой (до 70%) на затухание в предкристаллизационной области температур. Автором [4] обнаружены некоторое увеличение высокотемпературного фона затухания и появление небольших пиков ВТ вблизи $T = 400$ К после локализованной деформации растяжением при комнатной температуре. Однако такой способ нагружения не позволяет получить значительной остаточной деформации. Очевидно, по этой причине величина наблюдавшихся эффектов была мала. В работах [6-9] было установлено, что небольшая (на несколько процентов) гетерогенная деформация ковкой или прокаткой вызывает появление мощных максимумов релаксационного затухания и других аномалий неупругих свойств при температурах ниже комнатной. При этом характер затухания в деформированных образцах дает убедитель-

ные аргументы в пользу дислокационного подхода [5,7,8-12] к описанию гетерогенной деформации МС.

Вместе с тем нам неизвестны какие-либо попытки исследования влияния гомогенной деформации на низкотемпературное затухание в МС. Этот вопрос представляется актуальным, ибо сходство влияния гомогенной и гетерогенной деформации на низкотемпературное затухание, будучи установленным, может свидетельствовать о сходстве соответствующих микромеханизмов деформации, как это, например, предполагается в известных моделях свободного объема [13,14]. В любом случае результат исследований может дать важную информацию о природе локализованного и однородного течения МС.

Исходя из вышеизложенного, мы поставили задачу детального исследования влияния предварительной гетерогенной и гомогенной деформации МС на низкотемпературное затухание в идентичных экспериментальных условиях.

1. Методика эксперимента

В качестве объекта исследований был выбран аморфный сплав $Ni_{60}Nb_{40}$, полученный стандартным методом спиннингования в виде ленты толщиной 40–50 мкм и шириной 1–2 мм. Аморфность структуры контролировалась рентгенографией и просвечивающей электронной микроскопией. ВТ измерялось в консольно закрепленных образцах длиной 5–10 мм, совершающих свободнотухающие колебания [8]. Ошибка определения ВТ составляла 8–9% при уровне затухания $\approx 10^{-2}$ и 1–2% при $Q^{-1} \approx 10^{-4}$. Используемая экспериментальная установка позволяла определять амплитуду растягивающей деформации ϵ_0 , реализующейся при изгибных колебаниях. Соответствующие подробности изложены в [8]. Величина ϵ_0 варьировалась в пределах $3 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-4}$. Погрешность определения ϵ_0 оценивалась в 40–50% на краях и в $\approx 15\%$ в середине этого диапазона. Измерения проводились в вакууме $\approx 10^{-3}$ Торр на частотах 200–3000 Гц при температурах 30–300 К. Температурный шаг измерений составлял 2 К. Все измерения температурных зависимостей ВТ при различных частотах, амплитудах деформации и после различных термообработок осуществлялись без демонтажа образцов из зажима во избежание их неконтролируемых пластических деформаций при перезакреплении.

Предварительная гетерогенная деформация производилась с помощью прокатного стана, аналогичного описанному в [15]. Уменьшение толщины ленты составляло 0.5–1% за один проход в валках. Величина предварительной деформации ϵ_p рассчитывалась как среднее из относительного уменьшения толщины и относительного увеличения длины образцов. Прокатка сопровождалась образованием полос сдвига, аналогичных показанным в [16].

2. Результаты и обсуждение

1) ВТ после гетерогенной деформации. Температурные зависимости ВТ и нормированного модуля упругости исследуемых МС в исходном состоянии и после прокатки показаны на рис. 1. После аккуратного монтажа исходного образца $Q^{-1}(T)$ и $E(T)$ не имеют каких-либо

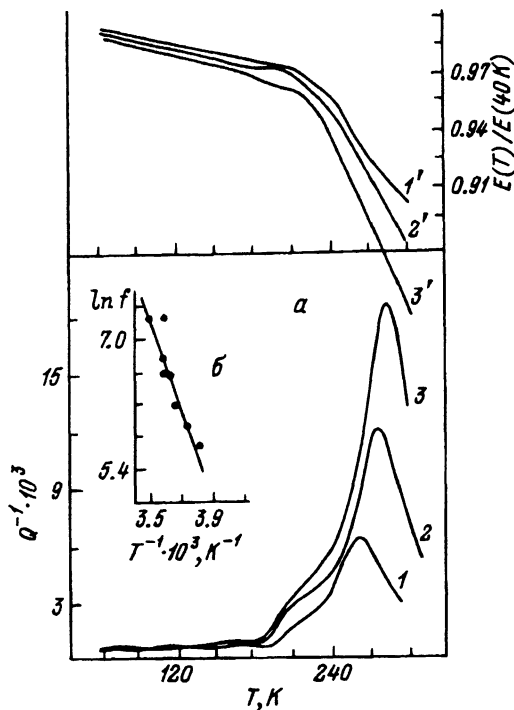


Рис. 1. Температурные зависимости ВТ (1-6) и нормированного модуля упругости (1'-6') МС $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{40}$ на частоте ≈ 300 Гц в исходном состоянии при $\epsilon_0 = 1 \cdot 10^{-5}$ (1,1'), после прокатки на 3% при $\epsilon_0 = 7 \cdot 10^{-6}$ (2,2'), $\epsilon_0 = 3 \cdot 10^{-5}$ (3,3'), $\epsilon_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ (4,4') и после прокатки на 12% при $\epsilon_0 = 1.6 \cdot 10^{-5}$ (5,5').

6,6' — зависимости $Q^{-1}(T)$ и $E(T)$ деформированного на 2.5% образца после отжига при 523 К в течение 15 мин, $\epsilon_0 = 1.6 \cdot 10^{-5}$.

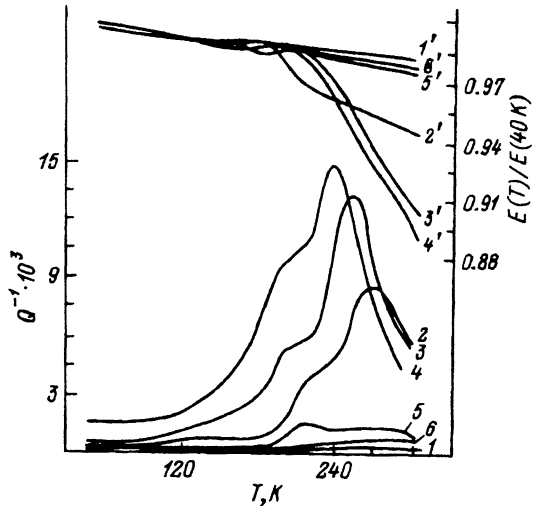
особенностей: ВТ слабо растет, а E слабо снижается с ростом температуры (кривые 1, 1'). В результате прокатки на 2-4% появляется большой пик ВТ (Q^{-1}_{max} может достигать $1 \div 3 \cdot 10^{-2}$), которому соответствует дефект модуля $\approx 10 \div 12\%$ (кривые 2, 2'-4, 4'). Форма пика ВТ хорошо воспроизводится при повторных измерениях $Q^{-1}(T)$ одного и того же образца при фиксированной амплитуде деформации и частоте. Однако для различных образцов, сдеформированных на одну и ту же величину, форма пика может значительно отличаться.

Характер температурных зависимостей $Q^{-1}(T)$ и $E(T)$ деформированных образцов сильно зависит от амплитуды деформации ϵ_0 , предварительной деформации ϵ_p и частоты f . Увеличение ϵ_0 при фиксированных ϵ_p и f вызывает рост пика ВТ и его сдвиг в сторону низких температур на 30-40 К при увеличении ϵ_0 примерно на порядок (кривые 2-4 на рис. 1). Одновременно возрастает уровень низкотемпературного (при $T < 150$ К) затухания. Дальнейшая предварительная деформация приводит к снижению высоты пика ВТ, и в сильно деформированных образцах $Q^{-1}(T)$ и $E(T)$ близки к соответствующим зависимостям в исходном состоянии.

Увеличение частоты при фиксированных ϵ_p и ϵ_0 приводит к сдвигу пика ВТ в высокотемпературную сторону и увеличению его высоты. Однако уровень низкотемпературного затухания при этом остается неизменным (рис. 2,а). Совместное рассмотрение рис. 1, 2 приводит к выводу о том, что затухание в деформированных образцах имеет смешанный характер: при $T < 150 \div 180$ К ВТ носит в основном гистерезисный (частотно-независимый) характер, а при $180 \text{ К} < T < 300 \text{ К}$ на гистерезисное ВТ накладывается релаксационный пик ВТ. Следует также

Рис. 2. а) Температурные зависимости ВТ (1-3) и нормированного модуля упругости E (1'-3') после прокатки на 3% на частотах 309 (1,1'), 703 (2,2') и 1440 Гц (3,3') при $\epsilon_0 = 2.5 \cdot 10^{-5}$.

б) Зависимость логарифма частоты колебаний от обратной температуры пика ВТ.



отметить, что в свежезакаленных образцах ВТ является амплитудонезависимым, а в деформированных образцах всегда наблюдается сильная амплитудная зависимость ВТ.

Зависимость обратной температуры пика ВТ от частоты показана на рис. 2,б. Вычисленные из этой зависимости активационные параметры составили: энергия активации $U = 0.51$ эВ, частотный фактор $\tau_0^{-1} = 1 \times 10^{13} \text{ с}^{-1}$.

Вызванный гетерогенной деформацией пик ВТ стабилен в процессе естественного старения при комнатной температуре: 5-6 месячная выдержка не оказывает существенного влияния на $Q^{-1}(T)$. Однако умеренная термообработка приводит к подавлению пика ВТ. Так, отжиг при 523 К в течение 15 мин (температура начала кристаллизации исследуемого МС составляет около 915 К при $T = 10$ К/мин) вызывает практически полное его исчезновение (рис. 1, кривая 6). Повторная деформация восстанавливает пик ВТ.

Рис. 3 иллюстрирует влияние облучения электронами энергией 2 МэВ на $Q^{-1}(T)$ и $E(T)$ предварительно деформированного образца. Эксперимент проводился следующим образом. После прокатки и измерения $Q^{-1}(T)$ и $E(T)$ (результаты измерений представлены кривыми 1,1')

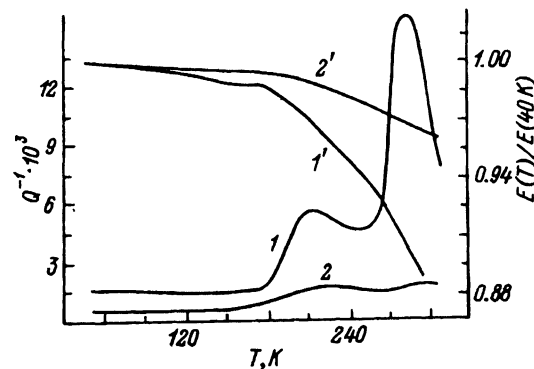


Рис. 3. Влияние 2 МэВ электронного облучения на деформационный пик ВТ: температурные зависимости Q^{-1} (1,2) и E (1',2') на частоте ≈ 300 Гц при $\epsilon_0 = 7 \cdot 10^{-5}$ после прокатки на 2.5% (1,1') и последующего облучения флюенсом $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ (2,2').

образец вместе с зажимом был подвергнут электронному облучению. Доза облучения и интенсивность источника составили $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ и $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ соответственно. Во избежание нагрева при облучении образец охлаждался водой. Как видно из кривых 2, 2', облучение привело к почти полному исчезновению пика ВТ и соответствующего дефекта модуля.

2) Природа низкотемпературных деформационных пиков в ВТ. Прежде всего отметим, что вышерассмотренные деформационные пики ВТ вполне аналогичны наблюдавшимся ранее в холоднотемпературных МС Cu-Ti, Ni-Si-B и Pd-Cu-Si [5,7-9]. Настоящие авторы наблюдали подобные пики ВТ также в ряде МС на основе Fe-Ni и Co. Поэтому можно предполагать, что появление пиков ВТ после гетерогенной деформации является типичным для МС явлением.

Полученные результаты дают определенную информацию о природе низкотемпературного затухания в деформированных МС и могут быть интерпретированы в рамках дислокационных представлений о гетерогенной пластической деформации МС. По нашему мнению, в настоящее время эти представления дают наиболее верную картину локализованной деформации неупорядоченных структур.

Как отмечалось ранее, затухание в деформированных образцах при низких температурах носит гистерезисный характер. Известно [17], что гистерезисное затухание в ферромагнитных и не испытывающих фазовых превращений кристаллах является типично дислокационным эффектом и в звуковом диапазоне частот обусловлено отрывом дислокаций от центров закрепления. В бездислокационных (нитевидных) кристаллах гистерезисное затухание отсутствует [18]. Поэтому амплитудонезависимый характер ВТ в исходных образцах может являться результатом отсутствия подвижных дислокаций в структуре. Гетерогенная деформация вызывает образование дислокаций, и их движение в поле внешних знакопеременных напряжений обуславливает появление гистерезисного затухания и релаксационного пика ВТ.

Следует отметить, что, по нашему мнению, попытки интерпретировать амплитудозависимое затухание с позиций движения точечно-подобных дефектов будут сопряжены со значительными трудностями. В частности, если такую возможность предположить, становится непонятным отсутствие амплитудной зависимости ВТ в исходном состоянии, для которого определенно характерна значительная плотность точечно-подобных дефектов.

Характерная особенность деформационных пиков ВТ в МС заключается в возможности их исчезновения в результате больших деформаций или облучения. Аналогичная ситуация имеет место и в случае деформированных кристаллов [17], и этот факт является одним из наиболее ярких свидетельств их дислокационной природы. Блокировка знакопеременного движения дислокаций в МС либо вследствие роста внутренних напряжений при увеличении степени пластической деформации, либо вследствие образования точечно-подобных дефектов радиационного происхождения представляется вероятной причиной подавления пика ВТ в результате больших деформаций или облучения. Возможность снижения высоты пика ВТ после деформации явно указывает на линейный характер дефектов, возникающих при гетерогенной деформации, так

как в противоположном случае (течение путем образования и движения точечно-подобных дефектов) следовало бы ожидать только увеличения высоты пика ВТ.

Другим обстоятельством, указывающим на «неточечный» характер возникающих при гетерогенной деформации дефектов, является уменьшение температуры пика ВТ при увеличении амплитуды деформации ϵ_0 (рис. 1, кривые 2-4). Если бы наблюдаемый пик ВТ был обусловлен релаксацией точечно-подобных дефектов, то изменение ϵ_0 не должно приводить к изменению температуры пика, так как такая релаксация характеризуется малым активационным объемом V . В этом случае эффективная энергия активации $U_{\text{эф}}$ не зависит от прикладываемого сдвигового напряжения σ_s . Если механизм релаксации включает в себя движение линейных дефектов с большим активационным объемом, то эффективная энергия активации уменьшается как $U_{\text{эф}} = U_0 - \sigma_s V$ ($U_0 = \text{const}$). Уменьшение энергии активации при фиксированной частоте означает снижение температуры пика ВТ. Такая ситуация реализуется в случае дислокационной релаксации кристаллов [19].

Оценим активационный объем релаксации. Релаксационный пик ВТ имеет место при условии [17]

$$\omega\tau = 1,$$

где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота, $\tau = \tau_0 \exp((U_0 - \sigma_s V)/kT)$ — время релаксации. Если измерения выполняются при двух различных амплитудах сдвиговой деформации σ_{s1} и σ_{s2} ($\sigma_{s1} < \sigma_{s2}$), то соответствующие температуры пиков будут равны T_1 и T_2 ($T_1 > T_2$). Легко показать, что

$$V = \frac{U_0(T_1 - T_2)}{T_1\sigma_{s2} - T_2\sigma_{s1}}. \quad (1)$$

Амплитуда сдвиговой деформации может быть определена из закона Гука

$$\sigma_s = \epsilon_0 E / \sqrt{3},$$

где ϵ_0 — амплитуда растягивающей деформации, E — модуль Юнга. Принимая $E = 109$ ГПа [16], $\epsilon_{01} = 7 \cdot 10^{-6}$, $\epsilon_{02} = 5 \cdot 10^{-5}$, $T_1 = 270$ К, $T_2 = 235$ К (кривые 2-4 на рис. 1), $U_0 = 0.51$ эВ, получаем $V = 3.8$ нм³. В единицах b^3 (b — среднее межатомное расстояние, которое для МС Ni₆₀Nb₄₀ составляет 0.263 нм [20]) $V \approx 210$, а в единицах Ω (Ω — средний атомный объем) — примерно вдвое больше. Столь значительная величина активационного объема противоречит предположению о точечно-подобном характере дефектов, ответственных за релаксацию, и является аргументом в пользу дислокационного механизма течения. Отметим также, что полученное значение V совпадает по порядку величины со значением активационного объема, вычисленного из данных по релаксации напряжений в том же МС при комнатной температуре [16]. Значения $V \approx 100 b^3$ характерны для дислокационных релаксаций в кристаллах при низких температурах [21].

По нашему мнению, дислокационный характер гетерогенной деформации при комнатной температуре определяется тем обстоятельством, что скорость структурной релаксации при комнатной температуре очень мала и элементарные акты сдвига поэтому являются коррелированными.

С другой стороны, в условиях интенсивно протекающей структурной релаксации течение МС становится гомогенным и может быть интерпретировано как совокупность некоррелированных актов сдвига [22,23] (т.е. как результат эволюции системы точно-подобных дефектов). Если такая точка зрения верна и если возникающие при гетерогенной деформации дислокации ответственны за наблюдаемые низкотемпературные пики ВТ, то гомогенное течение должно оказывать существенно иное влияние на низкотемпературное затухание. Эксперимент подтвердил это предположение.

3) Влияние гомогенной деформации на низкотемпературное ВТ. Образцы деформировались растяжением при $T_d = 773$ К (деформация прокаткой при высоких температурах являлась технически трудно осуществимой). Выбор этой температуры определялся необходимостью деформации на 4–6%, что невозможно при более низких температурах [24]. Пластическое течение МС Ni₆₀Nb₄₀ при этой температуре и выбранной скорости нагружения $5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ является полностью гомогенным [23].

Образцы пластически деформировались на 1,8, 4 или 6% (точки 1–3 на диаграмме растяжения; рис. 4,а), охлаждались в нагруженном состоянии до комнатной температуры, разгружались, укорачивались и монтировались в установке для измерения ВТ. При этом методически эксперимент проводился таким образом, чтобы избежать перезакрепления образцов в зажиме и соответственно предотвратить возможность дополнительной неконтролируемой гетерогенной деформации образца. Результаты эксперимента приведены на рис. 4,б. Как видно, предварительная гомогенная деформация не оказывает влияния на температурные зависимости ВТ и модуля упругости. Более того, эти зависимости полностью идентичны таковым после отжига при $T = 773$ К в течение 20 мин (такое время необходимо для растяжения на 6%) без предварительной деформации.

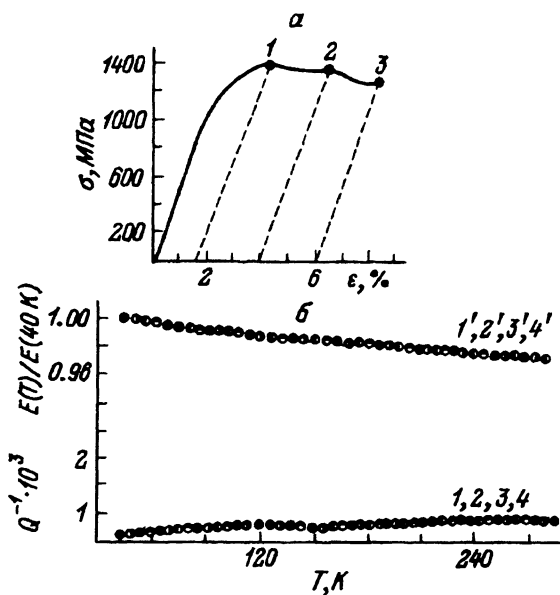


Рис. 4. Влияние гомогенной деформации на низкотемпературное ВТ.

а — диаграмма растяжения при $T = 773$ К со скоростью $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$; б — температурные зависимости ВТ (1–4) и нормированного модуля упругости (1'–4') после деформации на 1,8 (1,1') 4 (2,2') и 6% (3,3') (соответственно точкам 1–3 на диаграмме σ – ϵ) или после отжига недеформированного образца при $T = 773$ К в течение 20 мин (4,4'). $\epsilon_0 = 5 \cdot 10^{-5}$, $f \approx 300$ Гц.

Полученные результаты делают возможным следующее заключение. Микроскопические механизмы гетерогенного и гомогенного течения МС существенно различны. Гомогенное течение не сопровождается образованием новых структурных дефектов, и деформация является результатом эволюции системы точно-подобных дефектов, приводящей к исчезновению одних и генерации новых дефектов. При этом исходная и деформированная структуры эквивалентны в статическом смысле, что, очевидно, определяет неизменность диссипативных свойств материала. Гетерогенная деформация вызывает образование новых, не характерных для исходного состояния линейных дефектов (дислокаций), которые определяют вышерассмотренные аномалии неупругих свойств.

Список литературы

- [1] Masumoto T., Maddin R. // Mater. Sci. Eng. 1975. V. 19. N 1. P. 1-24.
- [2] Pampillo C.A. // J. Mater. Sci. 1975. V. 10. N 7. P. 1194-1227.
- [3] Sinning H.-R., Haessner F. // Proc. 5 Int. Conf. on Rapid. Quench. Metals. V. 1. Würzburg, 1985. P. 243-246.
- [4] Bonetti E. // Phil. Mag. B. 1987. V. 56. N 2. P. 185-198.
- [5] Золотухин И.В., Белявский В.И., Хоник В.А. // ФТТ. 1985. Т. 27. № 6. С. 1788-1794.
- [6] Золотухин И.В., Белявский В.И., Хоник В.А., Сафонов И.А., Рябцева Т.Н. // Металлофизика. 1988. Т. 10. № 5. С. 99-100.
- [7] Белявский В.И., Хоник В.А., Рябцева Т.Н. // Металлофизика. 1989. Т. 11. № 3. С. 106-111.
- [8] Золотухин И.В., Белявский В.И., Хоник В.А., Рябцева Т.Н. // ФММ. 1989. Т. 68. № 1. С. 186-191.
- [9] Zolotukhin I.V., Belyavskii V.I., Khonik V.A., Ryabtseva T.N. // Phys. Stat. Sol. (a). 1989. V. 116. N 1. P. 255-265.
- [10] Gilman J.J. // J. Appl. Phys. 1973. V. 44. N 2. P. 675-679.
- [11] Li J.C.M. // Metallurg. Trans. 1985. V. 16A. N 7/12. P. 2227-2223.
- [12] Косилов А.Т., Хоник В.А., Рябцева Т.Н. // Металлофизика. 1990. Т. 12. № 3. С. 37-41.
- [13] Spaepen F. // Acta Met. 1977. V. 25. N 4. P. 407-415.
- [14] Argon A.S. // Acta Met. 1979. V. 27. N 1. P. 47-58.
- [15] Gibbs M.R.J., Evetts J.E. // Scr. Met. 1980. V. 14. N 1. P. 63-66.
- [16] Золотухин И.В., Косилов А.Т., Хоник В.А., Рябцева Т.Н., Лукин А.А., Прокошина Г.Ф. // ФТТ. 1990. Т. 32. № 5. С. 1378-1384.
- [17] Новик А., Берри Б.С. Релаксационные явления в кристаллах. М., 1975. 471 с.
- [18] Дрожжин А.И., Сидельников И.В., Постников В.С. // ФТТ. 1975. Т. 17. № 8. С. 2417-2419.
- [19] Koiwa M., Hasiguti R.R. // Acta Met. 1965. V. 13. N 12. P. 1219-1230.
- [20] Swab E., Meszaros Gy., Kaneczcs G., Ishmaev S.N., Isakov S.L., Sadikov I.P., Chernyshov A.A. // J. Non-Cryst. Sol. 1988. V. 104. N 2-3. P. 291-299.
- [21] Старцев В.И., Ильичев В.Я., Пустовалов В.В. Пластичность и прочность металлов и сплавов при низких температурах. М., 1975. 327 с.
- [22] Дзюба Г.А., Золотухин И.В., Косилов А.Т., Хоник В.А. // ФТТ. 1991. Т. 33. № 11. С. 3393-3399.
- [23] Хоник В.А. // Автореф. докт. дис. Воронеж, 1992.
- [24] Золотухин И.В., Косилов А.Т., Рябцева Т.Н., Хоник В.А. // ФММ. 1990. № 11. С. 175-179.

Воронежский государственный педагогический
государственный институт

Поступило в Редакцию
17 февраля 1991 г.
В окончательной редакции
11 мая 1993 г.