

К ВОПРОСУ О ДЕМПФИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЧУГУНОВ

Аннотация. *Обработка экспериментальных данных по амплитудным зависимостям внутреннего трения в рамках различных теоретических моделей выявила стадийность и механизмы рассеяния энергии в графите с ростом амплитуды колебаний при циклическом нагружении. Показано, что уровень демпфирующей способности пластинчатого чугуна зависит от соотношения упругих и прочностных характеристик графита и матричной фазы. В чугунах с жесткой матричной структурой (перлит, мартенсит) рассеяние энергии определяется объемной долей и формой исходной графитной фазы. В чугунах с более мягкой металлической основой (феррит) контактное взаимодействие графитных включений с матрицей и ее свойства вносят дополнительные источники высокого демпфирования.*

Ключевые слова: графит, чугун, демпфирующая способность, механизмы рассеяния энергии, дислокационные и микропластические модели

Одним из требований, предъявляемых в машиностроении к функциональным материалам, является способность гасить вредные вибрационные колебания. Поэтому вопрос о демпфирующей способности чугунов привлекает внимание специалистов уже многие десятилетия. Актуальность определяется как практической значимостью разработок во многих областях техники, так и научным интересом исследований чугуна как модельного материала для металлических композиций с резко выраженной гетерогенностью [1; 2; 3]. В настоящей работе сделана оценка вклада графита как структурной составляющей в рассеяние энергии в системах (чугунах) с различной структурой матричной фазы. Этот вопрос рассматривался в двух аспектах: каков механизм внутреннего поглощения энергии в графите, а также, каково влияние графита на свойства чугунов с различной структурой.

Амплитудные зависимости внутреннего трения (АЗВТ) измеряли на образцах электродного графита (ГОСТ 10274-79, ЭУЗ-М) и серых чугунов с пластинчатой формой графита на ферритной, перлитной и мартенситной основе (табл. 1). Измерения АЗВТ на частоте 3Гц при комнатной температуре проведены на динамическом анализаторе DMAQ800 TAInstruments на образцах размером $35 \times 6 \times 1,5$ мм³ в режиме вынужденных изгибных колебаний.

Таблица 1

Химический состав, структура и объемные доли
графита исследованных марок чугуна

Марка чугуна	Содержание элементов, %			Структура по ГОСТ 3443-87		Объемная доля графита, %	Модуль упругости чугуна E, МПа
	C	Si	Mn	Основа	Тип графита		
СЧф	3.68	2.17	0.32	Ф	ПГф1-ПГд45-ПГр1	8.21	112500
СЧп	2.84	1.54	0.34	П	ПГф1-ПГд45-ПГр1	6.26	126500
СЧм	2.84	1.54	0.34	М	ПГф1-ПГд45-ПГр1	6.26	-

АЗВТ графита привлекали пристальное внимание многих исследователей [4–8]. Для различных температур измерений ниже комнатных амплитудно-независимая область рассеяния энергии не была достигнута для деформаций $\varepsilon_0 = 5 \times 10^{-7}$ даже при 50 К. Обработка данных по АЗВТ выполнялась в основном в рамках теории модели струны [9]. В работах Тсузуку и Саито пытались получить соответствующие данные для различных видов углерода и графита путем построения графика в координатах модели Гранато-Люкке (ГЛ) для АЗВТ. Несмотря на разногласия между результатами Тсузуку и Саито [7] и измерениями, приведенными Мерлином с сотрудниками [5–6], в целом не была найдена прямая корреляция с феноменологической моделью. В диапазоне амплитуд от 10^{-5} до 4×10^{-3} , наблюдали отклонения от нее как для низких, так и для более высоких амплитуд.

Анализ механизмов АЗВТ в графите был сделан в работе [4]. Показано, что построенные автором и другими исследователями зависимости АЗВТ в координатах модели ГЛ проявляют в целом возможность качественного описания АЗВТ графита в рамках теории Гранато – Люкке, но не отражают полный спектр механизмов рассеяния энергии в широком диапазоне амплитуд деформаций. Интервал рабочих амплитуд деформаций, в котором на кривых АЗВТ адекватно выполнялась модель струны в графите, был весьма ограничен. Ранее отмечалось, что аномально высокое амплитудно-независимое ВТ вблизи комнатных температур в графите контролируется движением дислокаций в периодическом поле напряжений и может интерпретироваться согласно модели струны [10, 11]. В чистых металлах область проявления колебаний дислокаций согласно модели ГЛ ограничена критическими деформациями начала отрыва дислокационных сегментов $\varepsilon_{кр1}$ и петель дислокаций от жестких узлов закрепления $\varepsilon_{кр2}$ [12]. Это позволяет предполагать, что с ростом амплитуды напряжений в графите также возможно проявления микро- (или макро-) пластичности. Поэтому для описания закономерностей рассеяния энергии при АЗВТ необходимо использовать

соответствующие модели рассеяния энергии и расчетные зависимости для определения пластической компоненты ВТ [13].

В работе Пегуина с сотрудниками [14] в основу расчетной характеристики модели принята деформация за счет термически активируемого процесса, энергия активации которого ΔU контролируется величиной напряжения сдвига, необходимого для преодоления дислокацией препятствия. Соответствующая компонента

микропластического рассеяния энергии $\delta_{пл}$ определена как $B = \alpha \frac{V \Delta U}{kT}$, где V

– активационный объем, $\alpha = 0.5$, $\Omega = 0,5-1$. Откуда следует возможность появления линейной зависимости при обработке данных по АЗВТ в координатах ГЛ. Так как эффективный активационный объем также является функцией приложенного напряжения, Бардетт [15] показал, что линеаризацию возможно ожидать и в координатах $(\delta_{пл}\epsilon) - (\epsilon - \epsilon_i)^{1/2}$, где

угол наклона равен $\sim \frac{U^{\frac{1}{2}}}{2kT}$.

Мэзон и Бешерс [16] показали, что при амплитудах деформации больше $\epsilon_{к2}$ (в области макропластичности) нестабильные дислокационные петли формируют равновесные скопления вблизи границ зерен. Скорость движения дислокаций контролируется линейным вязким торможением дислокаций. Расчетная модель в этом случае предполагает линеаризацию соответствующих участков АЗВТ в координатах $\ln(\delta - \delta_u) - \ln \epsilon$, где значения δ_u должны быть проверены в достаточно широком диапазоне амплитуд деформаций выше $\epsilon_{кр2}$.

Ниже нами выполнена обработка экспериментальных данных по АЗВТ графита в рамках указанных выше теоретических моделей с построением производных от расчетных кривых. Методика представления результатов измерений и обработки экспериментальных данных детально описана в работе [13]. На рис. 1 показаны АЗВТ графита при последовательном ступенчатом повышении амплитуды деформации в цикле «нагружение-разгрузка» (Н-Р). Следует отметить, что адаптация к условиям ступенчатой формы измерения кривых АЗВТ проходит во всем интервале амплитуд деформаций – каждый предварительный цикл Н-Р меняет форму и раскрытие последующей петли при повышении амплитуды деформации. Замкнутые контуры образующихся амплитудных зависимостей ВТ при амплитудах деформации до $\approx 4 \times 10^{-4}$ предполагают возможность колебания дислокационных петель в рамках модели струны; при больших амплитудах имеет место раскрытие петель Н-Р и остаточная микродеформация (уход нуля отсчета) при снятии нагрузки.

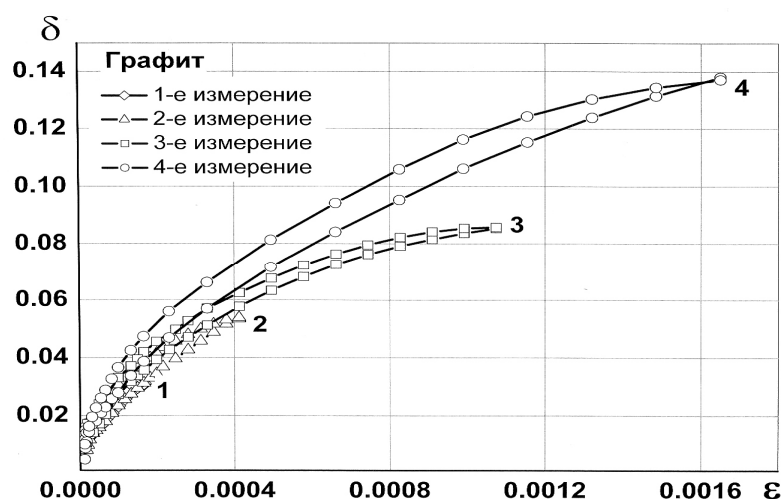


Рис. 1. АЗВТ графита при ступенчатом повышении амплитуды деформации

В качестве критерия применимости той или иной модели для описания экспериментальной АЗВТ принимали линеаризацию кривой (или ее участка) в координатах, предписываемых моделями. Наличие линеаризации проверяли по кривым производных соответствующих функций. Значения производных рассчитывали по трем ближайшим точкам с использованием параболического приближения и двойного сглаживания (рис. 2).

Видно, что ни одна из рассматриваемых моделей не обеспечивает линеаризацию в соответствующих координатах во всем измеренном диапазоне амплитуд деформаций. По мере роста амплитуды деформации для графита характерен двухступенчатый механизм проявления неупругости. На первой стадии до амплитуд деформаций $\epsilon_{кр2} \sim 2 \times 10^{-4}$ механизм проявления неупругого обратимого колебания дислокаций как модели закрепленной струны подтверждается значениями производных соответствующих кривых. При амплитудах выше $\epsilon_{кр2}$ более вероятна модель отрыва дислокаций от примесных атмосфер и преодоления ими близко- и дальнедействующих препятствий в плоскости скольжения в поле приложенных напряжений (рис. 2б). Вязкое движение дислокаций и структурная перестройка в рамках модели Мэсона для графита не подтверждается (рис. 2в). Достижимые при измерениях значения амплитуд деформаций были недостаточны для проявления макропластичности, а при их росте в образцах графита происходил скол без остаточной деформации.

Анализ механизмов рассеяния энергии графита в рамках указанных выше моделей описания АЗВТ показал, что по мере повышения напряжения проходят две стадии рассеяния энергии: стадия колебаний закрепленных петель дислокаций (ГЛ модель) и стадия микропластичности за счет отрыва дислокаций и их термоактивационного преодоления препятствий в плоскости скольжения.

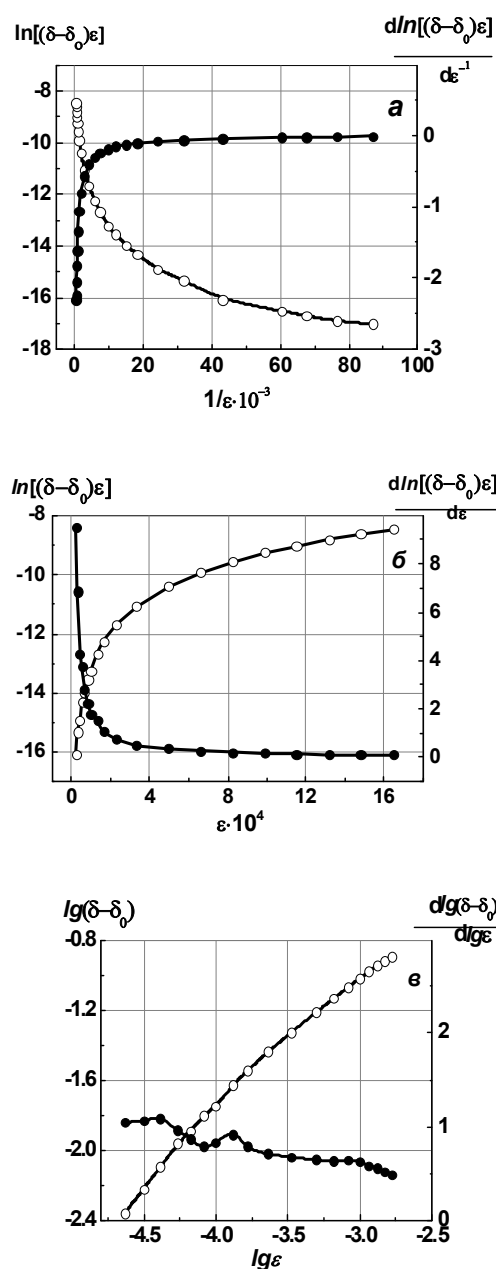


Рис. 2 Значения производных АЗВТ графита в координатах Гранато – Люкке (а), Пегуина (б) и Мэзона (в) (светлые точки) и значения производных соответствующих кривых (темные точки)

Демпфирующая способность чугуна во многом связана с контактным взаимодействием графита с матричной фазой. Морфология графитных включений и структура матричной фазы определяют характер развития локальных деформаций в чугунах [17]. Увеличение демпфирующей способности чугуна определяется неоднородностью напряженно-деформированного состояния матрицы, определяющей уровень концентрации напряжений вблизи графитных включений и строение

межфазных границ «металлическая матрица-графит». В специальной литературе приведены многочисленные результаты измерений АЗВТ чугунов и нет однозначного ответа об определяющих их демпфирующих свойства механизмах рассеяния энергии.

На рис. 3а представлены кривые АЗВТ указанных в табл. 1 марок чугуна и электродного графита, на рис. 3б показаны АЗВТ чугунов на ферритной и перлитной основе за вычетом значений АЗВТ графита. Для данного класса чугунов при одинаковых условиях измерений АЗВТ возможна оценка роли графита и матричной фазы на демпфирующую способность чугунов. Для пластинчатого серого чугуна на ферритной основе рассеяние энергии с ростом амплитуды колебаний интенсивно возрастает как за счет графитной фазы, так и за счет дополнительных источников поглощения энергии – на границах раздела матричной и графитной фаз, за счет образования и роста локальных микродеформаций около включений, магнитного рассеяния энергии в феррите и других факторов.

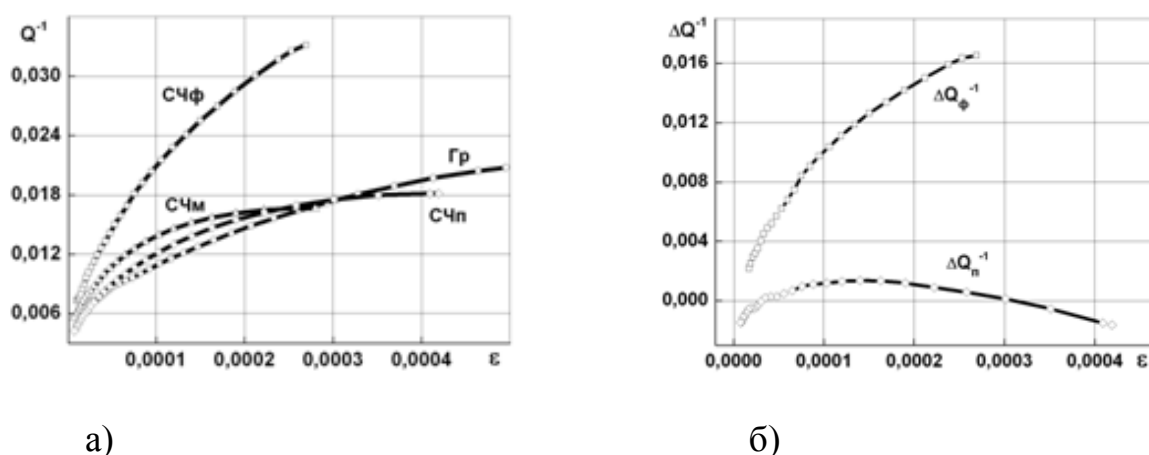


Рис. 3. а) АЗВТ графита и чугунов на различной основе (СЧф, СЧп, СЧм); б) АЗВТ чугунов на ферритной и перлитной основе за вычетом значений АЗВТ для графита

В чугунах с более «жесткой» основой (по характеристикам прочности и упругости) – перлит, мартенсит – реальный уровень демпфирования колебаний пластинчатого чугуна определяют объемная доля и форма графитных включений. В этом случае на АЗВТ чугуна структура матрицы и ее свойства практически влияния не оказывают, вклад графита в общее рассеяние энергии чугунов является определяющим. Естественно, сделанное выше заключение может быть принято для конкретных, указанных выше, нормированных структур.

К основным выводам по работе можно отнести:

1. Анализ механизмов рассеяния энергии графита в рамках существующих теоретических моделей описания АЗВТ показал, что по мере повышения напряжения проходят две стадии неупругого поглощения энергии приложенных колебаний: стадия колебаний закрепленных дислокаций (ГЛ модель) и стадия микропластичности за счет отрыва дислокаций и их перемещения при преодолении препятствий в плоскости скольжения.

2. Высказана гипотеза, что уровень демпфирования колебаний пластинчатого чугуна с ростом амплитуды деформации зависит от соотношения механических свойств (предел прочности, модуль упругости) графита и матрицы. В чугунах с жесткой матричной структурой (перлит, мартенсит) влияние графита на рассеяние энергии является определяющим фактором. В чугунах с более мягкой металлической основой (феррит) основные источники высокого демпфирования связаны с поглощением энергии как в графите, так и за счет его контактного взаимодействия с матричной фазой.

Список использованных источников

1. *Фавстов Ю. К., Шульга Ю. Н.* Сплавы с высокими демпфирующими свойствами. М.: «Металлургия», 1973, 256 с.
2. *Головин С.А., Пушкар А., Левин Д.М.* Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов. М.: Metallurgy, 1987. 190 с.
3. *Головин С.А.* Рассеяние энергии механических колебаний в металлических материалах с резко выраженной гетерогенностью // Тула: Известия ТулГУ. Сер. «Материаловедение», 2002. Вып. 3. С. 105–127.
4. *Tomas E. Firlе* Torsional damping in pyrolytic graphite // Carbon. Vol. 7, Issue 5. 1969. P. 595–607.
5. *Merlin J., Mondinom M., Lerroy J.* // Phys. Stat. Sol. 21 (1974). 435.
6. *Merlin J., Merle P., Fququet F., Pelletier J.M.* // Scripta Met. 12?, 1978. P. 227–232.
7. *Tsuzuku T., Kawamura K., Saito M.H.* Precipitation of intercalants onto dislocations in graphite // Synthetic Metals. Vol. 6. 1983. P. 129–134.
8. *Baba M., Saito M., Tsuzuku T.* Hysteretic anelasticity of graphitehalogen residue compounds at high temperatures // Carbon. Vol. 21, Issue 3. 1983. P. 269–274.
9. *Гранато А., Люкке К.* Струнная модель и дислокационное поглощение звука // Физическая акустика. Т. 4, ч. А. М.: Мир, 1969. С. 261–321.

10. *Millet P., Schaller R., Benoit W.* Study of the internal friction spectrum of grey cast iron // *Journal de Physique, Colloque C9*. 1983. Suppl. 12. Tome 44. P. 9–11.
11. *Головин С.А., Петрушина А.Г.* Температурный спектр внутреннего трения чугунов // *Известия вузов «Черная металлургия»*. 2009. № 9. С. 51–54.
12. *Головин С.А.* Дислокационная структура металлов и затухание колебаний // *Рассеяние энергии при колебаниях механических систем*. Киев: Наукова Думка, 1968. С. 329–332
13. *Головин С.А., Юркин И.Н., Николаева Н.Н.* О применимости теоретических моделей при обработке данных по АЗВТ железа // *Взаимодействие дефектов кристаллической решетки и свойства металлов*. Тула: ТПИ, 1979. С. 154–160.
14. *Peguin P., Perez J., Gobin P.* Amplitude-dependent part of the internal friction of aluminum // *Trans Metall Soc AIME*, 1967. 239. P. 438–451.
15. *Burdett C.F.* Internal friction in gadolinium // *Phil. Mag.* 1968. № 154. P. 745–752; 1971. № 192. P. 1452–1468.
16. *Mason W.P., Beshers D.N.* Internal friction during ultrasonic deformation of alpha-brass // *J. Appl. Phys.* 1976. V. 47, № 6. P. 2336–2344.
17. *Ренне И.И., Петрушин Г.Д., Головин С.А.* О распределении локальных деформаций в микрообластях чугуна при статическом нагружении // *Проблемы прочности*. 1981. № 2. С. 66–68.
18. *Abstract.* The treatment of ADIF experimental data on graphite within different theoretical models shows the multistage nature of the energy dissipating processes under loading as well as their mechanisms. A hypothesis has been proposed and justified that the level of oscillation damping of laminate grey iron depends on the ratio of hardness between the graphite and the matrix phase. In cast iron with a hard matrix structure (perlite, martensite) the influence of graphite on energy dissipation is primary. In cast iron with a less rigid metal matrix (ferrite) the main sources of high damping depend on the graphite and its contact interaction with the matrix.