

Моделирование демпфирующей способности графитизированных чугунов

Петрушина А.Г.[†]

[†]alenka_mk@inbox.ru

Тульский государственный университет, пр-т Ленина 92, 300012 Тула

Modelling of damping capacity of graphitized cast iron

A.G.Petrushina

Tula State University, Lenin avenue 92, 300012 Tula

Получена статистическая модель, позволяющая оценить вклад в рассеяние энергии параметров графитных включений, в число которых входит объемная доля, размер, фактор формы и удельная межфазная поверхность «включение-матрица». Оценка параметров графитных включений чугунов проведена с использованием автоматического анализатора изображений и пакета прикладных программ.

Ключевые слова: графитизированные чугуны, фактор формы, статистическая модель.

A statistical model is designed in order to assess the relative contribution to the energy dissipation parameters of graphite inclusions, which include the volume fraction, size, form factor and specific interphase “inclusion-matrix” surface. Estimation of the parameters of graphite inclusions in cast irons is carried out using the automated image analyzer and software package.

Keywords: graphitized cast iron, form factor, statistical model.

1. Введение

Графитизированные чугуны остаются в настоящее время одним из основных конструкционных материалов, применяемых в промышленности. Сочетание хороших технологических и эксплуатационных свойств делает чугун незаменимым в условиях знакопеременного циклического нагружения. Являясь материалом с резко выраженной гетерогенностью структуры, чугун может служить в качестве модели, на которой возможно изучать влияние морфологии графитных включений на физико-механические свойства.

Моделирование упругих свойств структурно-неоднородных материалов часто основано на многочисленных теоретических моделях, используемых для композиционных материалов, где основным параметром является объемная доля фаз [1]. Применение таких теоретических моделей к чугунам приводит к громадной (до 30 %) разнице в значениях модулей нормальной упругости, рассчитанных по разным моделям, вследствие того, что при разработке таких моделей не учитывается в явной форме реальная морфология графитных включений. Чугуны являются естественными композиционными материалами, физико-механические свойства которых определяются графитной фазой и металлической основой.

До настоящего времени остаются дискуссионными вопросы вклада матрицы и графита в формирование высокой демпфирующей способности чугунов [2, 3].

Моделирование демпфирующих свойств чугунов с учетом параметров графитных включений дает возможность конструирования чугунов с заданными физико-механическими свойствами для конкретных условий эксплуатации. Анализ, сделанный в работе [4], свидетельствует о многообразии параметров методов их измерения, позволяющих идентифицировать графитные включения. Наиболее простой из них предложен С. А. Салтыковым [5], который использовал безразмерный фактор формы для оценки включений в соответствие с формулой $\Phi = 3,545 \cdot \sqrt{F/P}$ где F и P - площадь и периметр включения, соответственно. Количественная оценка параметров графитных включений с использованием автоматического анализатора изображений позволяет перейти к аналитическому описанию зависимости «структура-свойство». В данной работе проведено моделирование относительного рассеяния энергии в чугунах на ферритной металлической основе с учетом количественной оценки параметров графитных включений. Исследование чугунов с одинаковой металлической основой, но с различной морфологией графитных включений позволяет исключить влияние жесткости металлической основы и оценить вклад графитной фазы

в формирование демпфирующей способности графитизированных чугунов.

Использование автоматического анализатора изображений совместно с пакетом прикладных программ Axio Vision предопределило установление погрешности, вносимой средством измерений, при определении количественных значений параметров графитных включений.

2. Материалы и методики исследований

Материалом для исследований являлись графитизированные чугуны на ферритной основе с различной морфологией графитных включений. В табл. 1 приведены параметры графитных включений в соответствии с ГОСТ 3443 – 87 и условное обозначение исследуемых чугунов с пластинчатой (ЧПГ), вермикулярной (ЧВГ) и шаровидной (ЧШГ) формой включений графита.

Измерение амплитудной зависимости внутреннего трения чугунов проводили на стержневых образцах квадратного сечения 1,20×1,20 мм и рабочей длиной 83 мм. Образцы получали электроэрозионной резкой предварительно отшлифованных пластин толщиной 1,20 мм. Для снятия внутренних напряжений, возникающих в процессе изготовления, образцы подвергали отжигу в течение одного часа при температуре 500 °С.

Количественный металлографический анализ по определению параметров графитных включений проводили на полированной поверхности микрошлифов чугуна с использованием автоматического анализатора изображений. Статистическую обработку результатов измерений выполняли с применением пакета прикладных программ Statgraphics Plus for Windows. Предварительно идентификацию графитных включений оценивали визуально в соответствии с ГОСТ 3443-87, результаты которой представлены в табл. 1.

Обратный крутильный маятник. Измерение амплитудной зависимости внутреннего трения чугунов проводили при комнатной температуре в вакууме на обратном крутильном маятнике с деформирующим устройством РДУ [6] в герцевом диапазоне частот (1,5 – 2,0 Гц) методом затухающих колебаний. Интервал рабочих амплитуд деформации составлял от $1 \cdot 10^{-5}$ до $8 \cdot 10^{-4}$.

Внутреннее рассеяние энергии оценивали логарифмическим декрементом колебаний по формуле

$$\delta = \frac{1}{n} \cdot \frac{\ln A_1}{A_{1+n}}, \quad (1)$$

где A_1 и A_{1+n} – амплитуды колебаний в начале и конце интервала, состоящего из n – циклов. Относительное рассеяние энергии Ψ рассчитывали, используя соотношение $\Psi=2\delta$.

Автоматический анализатор изображений. Аналитический компьютеризированный комплекс на базе металлографического микроскопа Observer.D1m совместно с пакетом прикладных программ (ППП) Axio Vision позволяет оценить параметры графита с фотографий микрошлифов чугуна при помощи расчета фрактальной размерности для изображений по методу сеток.

С помощью ППП Axio Vision количественную оценку графитных включений в чугунах проводили с определением следующих параметров: периметр, площадь графитного включения, фактор формы, объемная доля графита. Из перечисленных выше параметров независимыми друг от друга являются только периметр и площадь графитного включения, а фактор формы включений является производной величиной, определяемой с использованием ППП Axio Vision.

В качестве структурного параметра для идентификации формы включений графита принимали фактор формы, который описывает геометрию включения и представляет собой производную величину от площади и периметра включения. Он показывает, какая доля периметра фигуры охватывает равновеликий ей круг. Для идеального шаровидного графита фактор формы равен единице. Фактор формы, определяемый с использованием ППП Axio Vision, вычисляется по формуле [5]:

$$\Phi = \frac{3,545\sqrt{F}}{P} \quad (2)$$

где F и P площадь и периметр включения, соответственно.

Количественный анализ структуры чугунов проводили на полированной поверхности образцов. С целью снижения погрешности измерений и повышения точности получаемых результатов электронные изображения микроструктуры с графитными включениями предварительно подвергали обработке в графическом редакторе Adobe Photoshop. Статистическую обработку результатов измерений проводили с помощью программы Statgraphics Plus for Windows.

3. Идентификация графитных включений в чугунах с использованием компьютерной технологии

Погрешность, вносимую средством измерения в зависимости от размеров объекта, оптического увеличения и других факторов оценивали, используя метод графического моделирования формы графитных включений. Алгоритмом решения такой задачи является: выбор мо-

Таблица 1

Структура исследуемых чугунов в соответствии с ГОСТ 3443 - 87.

Условное обозначение чугуна	Структура чугуна по ГОСТ 3443 - 87
	Графит
ЧПГ_Ф (7)	ПГф1 – ПГр1 – ПГд45 – Ф
ЧПГ_Ф (6)	ПГф2 – ПГр3 – ПГд90 – Ф
ЧПГ_Ф (1)	ПГф2 – ПГр6 – ПГд25 – Ф
ЧПГ_Ф (2)	ПГф1 – ПГр1 – ПГд180 – Ф
ЧПГ_Ф (9)	ПГф1 – ПГр3 – ПГд45 – Ф
ЧВГ_Ф (2)	ВГф3 – ВГр1 – ВГд70 – Ф
ЧШГ_Ф (2)	ШГф5 – ШГр1 – ШГд45 – Ф

делей графитных включений; подготовка электронных вариантов моделей; анализ эталонных структур с помощью ППП «Axio Vision» с определением параметров графитных включений для эталонных структур. Модели графитных включений представляли собой черно-белые изображения прямоугольника, круга, полукольца, которые можно принять за геометрические фигуры, близкие по форме к реальным включениям в чугунах.

Установлено, что изменение площади, занимаемой моделируемыми включениями, оказывает несущественное влияние на относительную погрешность (менее 2-х %) при определении их параметров [7]. Отсюда следует, что объемная доля графитных включений в пределах от 4 до 15 % является незначимой величиной для оценки погрешности моделируемых включений, зависящей только от площади отдельного включения, которая определяется с увеличением микроскопа.

Определение количественных параметров структуры чугунов, которыми являлись объемная доля, фактор формы и размер графитных включений, проводили на полированной поверхности образцов в 10-ти полях зрения при увеличении $\times 200$ с использованием автоматического анализатора изображений на базе микроскопа Observer. D1m с использованием ППП Axio Vision.

За размер включения вне зависимости от его формы принимали площадь включения. Объемную долю графита оценивали планиметрическим методом, основанном на принципе Кавальери-Акера, согласно которому суммарная площадь графитных включений в поле зрения, отнесенная к площади секущей поверхности, равна отношению суммарного объема частиц к объему образца, т.е. объемной доле графитной фазы в чугуне. Удельную межфазную поверхность «включение-матрица» определяли методом случайных секущих, основанном на втором стереометрическом соотношении, из которого следует, что суммарная площадь граничных поверхностей в единице объема равна удвоенному числу точек пересечения случайных секущих с включениями графита, отнесенному к единице длины секущих [8].

Средние значения параметров включений графита исследуемых чугунов на ферритной основе с различной морфологией графитных включений приведены в табл. 2. Статистическую обработку результатов по определению

Таблица 2

Средние значения структурных параметров включений графита графитизированных чугунов на ферритной основе.

Условное обозначение чугуна	Объемная доля V , %	Размер (площадь) включений, F , мкм ²	Фактор формы Φ	Удельная межфазная поверхность, S_v , мм ² / мм ³
ЧПГ_Ф (1)	10,2	10	0,54	155
ЧПГ_Ф (9)	11,0	40	0,60	70
ЧВГ_Ф (2)	17,4	210	0,69	30
ЧПГ_Ф (2)	15,9	420	0,38	35
ЧШГ_Ф (2)	9,0	75	0,88	20
ЧПГ_Ф (6)	11,8	220	0,12	25
ЧПГ_Ф (7)	12,5	45	0,18	55

количественных параметров графитных включений проводили с помощью программы Statgraphics Plus for Windows.

4. Моделирование демпфирующей способности чугунов с учетом параметров графитных включений

Демпфирующую способность чугунов на ферритной металлической основе с различной морфологией графитных включений оценивали путем измерения амплитудной зависимости внутреннего трения (АЗВТ).

Показано, что серые чугуны, которые характеризуются различными параметрами включений пластинчатого графита, обладают более высокой демпфирующей способностью по сравнению с чугунами с шаровидной и вермикулярной формой графита. Причем, в серых чугунах интенсивный рост демпфирующей способности наблюдается уже с малых амплитуд напряжений. Корректное сопоставление диссипативных свойств материалов следует проводить при выполнении гомологических условий по показателю относительного рассеяния энергии Ψ . Под гомологическими условиями понимают определение значения относительного рассеяния энергии Ψ при амплитуде напряжений σ , составляющей определенную долю от характеристик прочности, например, предела текучести при испытаниях на растяжение.

Графический анализ амплитудных зависимостей внутреннего трения серых чугунов с пластинчатой формой графита в координатах «относительное рассеяние энергии – амплитуда напряжений» позволил установить амплитуду напряжений, при которой наблюдается отклонение от линейности между напряжением и относительным рассеянием энергии, что характеризуется переходом из упругой области нагружения в упруго – пластическую (рис. 1). Значение амплитуды численно соответствует напряжению, составляющему 0,5 условного предела текучести исследуемых чугунов, который определяли с учетом коэффициента эквивалентности. В табл. 3 приведены значения временного сопротивления разрыву исследуемых чугунов при растяжении и значения условного предела текучести. Исходя из этого, принято условие определения индекса демпфирования чугунов при гомологических напряжениях, составляющих 0,5 предела текучести чугунов.

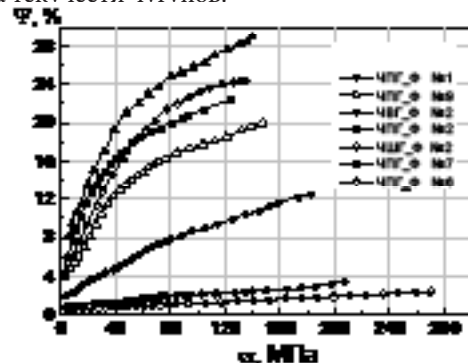


Рис. 1. Амплитудная зависимость внутреннего трения исследуемых чугунов

Так как параметры графитных включений имеют численные значения, существенно отличающиеся по абсолютной величине, то с целью представления этих параметров равнозначными по отношению друг к другу была выполнена их кодировка в интервале значений от -1 до +1. Условно за «+1» принимали максимальное значение переменной, а за «-1» - ее минимальное значение. Остальные значения переменной получали из выражения:

$$x_i = (X_i - X_{0i}) / \Delta X_i \quad (3)$$

где x_i - кодированное значение переменной; ΔX_i - диапазон варьирования, который рассчитывали по формуле

$$\Delta X_i = 0,5(x_{\max} - x_{\min}) \quad (4)$$

Параметр масштабирования показывающий изменение центрируемых значений в раз, определяли как:

$$X_i = 1 / \Delta X_i \quad (5)$$

Параметр центрирования, который устанавливает перенос начала координат эксперимента в центр плана с координатами в натуральных переменных, определяли из выражения:

$$X_{0i} = 0,5(x_{\max} + x_{\min})$$

Значения индекса демпфирования и параметров графитных включений в кодированных переменных представлены в табл. 4.

Статистическая модель, устанавливающая влияние параметров включений графита на рассеяние энергии в чугунах на ферритной основе, имеет вид:

$$\Psi_{0,5} = 17,14 - 14,35 \cdot (V)^2 - 6,62 \cdot (F)^2 \cdot \Phi - 1,48 \cdot S_v, \quad (6)$$

где значения параметров графитных включений V, Φ, F, S_v представлены в кодированных переменных.

Полученная корреляционная зависимость «структура-свойство» показывает, что в данных граничных условиях параметров графитных включений наиболее значимым параметром, влияющим на значение индекса демпфирования чугунов, является объемная доля, в то время как фактор формы, размер включений, а также межфазная поверхность оказывают влияние на рассеяние энергии в меньшей степени.

На рис. 2 представлен график прогнозирующей способности модели, адекватно отражающий экспериментальные значения функции, которой является индекс демпфирования чугунов. Модель хорошо удовлетворяет критериям выбора, которыми являются коэффициент детерминации $R\text{-squared} = 98\%$ и параметр значимости $P\text{-Value} = 0,005$.

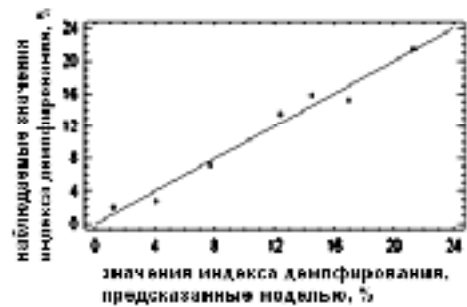


Рис. 2. График прогнозирующей способности модели демпфирующей способности чугунов

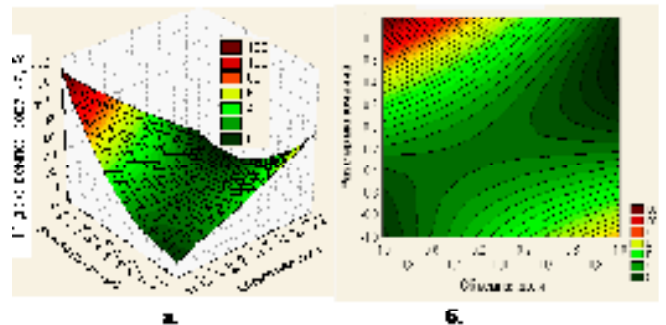


Рис. 3. Поверхность отклика (а) и контурный график (б) зависимости индекса демпфирования чугунов от размера (площади) и объемной доли графитных включений. (Параметры графитных включений приведены в кодированных значениях).

Представленная на рис. 3а поверхность отклика, построенная по разработанной модели, наглядно показывает, что увеличение объемной доли и размера включений графита прогнозирует повышение демпфирующей способности чугуна. Контурный график, приведенный на рис. 3б, позволяет оценить значение индекса демпфирования ферритных чугунов при известных значениях параметров включений графита.

5. Заключение

Стереологическими методами количественного описания структуры определены количественные параметры графитных включений чугунов на ферритной металлической основе: объемная доля, фактор формы, размер включений, а также удельная межфазная поверхность «включение-матрица», которые были использованы при составлении статистической модели «структура-свойство».

Таблица 3

Механические свойства и значения индекса демпфирования исследуемых чугунов

Условное обозначение чугуна	Временное сопротивление при растяжении, σ_s , МПа	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа	Индекс демпфирования при амплитуде напряжений $\sigma_s = 0,5 \sigma_{0,2}$	
			σ_s , МПа	$\Psi_{0,5}$, %
ЧПГ_Ф (1)	150	135	70	7,2
ЧПГ_Ф (9)	105	95	50	13,5
ЧВГ_Ф (2)	395	355	180	2,8
ЧПГ_Ф (2)	95	75	40	15,8
ЧШГ_Ф (2)	440	395	200	2,0
ЧПГ_Ф (6)	100	85	40	15,2
ЧПГ_Ф (7)	125	110	55	21,5

Таблица 4

Индекс демпфирования и параметры структуры чугунов в кодированных переменных

Условное обозначение чугуна	Объемная доля V	Размер (площадь) включений, F	Фактор формы Φ	Удельная межфазная поверхность S_v	Индекс демпфирования $\Psi_{0,5}$, %
ЧПГ_Ф (1)	-0,714	-1,000	+0,105	+1,000	7,2
ЧПГ_Ф (9)	-0,524	-0,854	+0,263	-0,306	13,5
ЧВГ_Ф (2)	+1,000	-0,024	+0,500	-0,849	2,8
ЧПГ_Ф (2)	+0,643	+1,000	-0,316	-0,798	15,8
ЧШГ_Ф (2)	-1,000	-0,683	+1,000	-1,000	2,0
ЧПГ_Ф (6)	-0,333	+0,024	-1,000	-0,964	15,2
ЧПГ_Ф (7)	-0,167	-0,829	-0,842	-0,479	21,5

Выбор в качестве объектов исследования чугунов с металлической основой одинаковой жесткости преследовал цель обратить особое внимание на вклад графитной составляющей структуры в формирование диссипативных свойств чугунов. Разработанная статистическая модель демпфирующей способности позволяет при данных граничных условиях оценить степень влияния морфологии графитных включений на рассеяние энергии в графитизированных чугунах на ферритной основе.

Анализ коэффициентов регрессии модели свидетельствует о существенном влиянии объема графитной фазы на индекс демпфирования чугунов по сравнению с остальными параметрами. В то же время, вклад удельной межфазной поверхности «включение-матрица» в демпфирующую способность чугунов, согласно значению коэффициента регрессии, наименьший. Разработанная модель хорошо удовлетворяет статистическим критериям выбора; график прогнозирующей способности модели адекватно отражает экспериментальные значения функции, которой является индекс демпфирования графитизированных чугунов на ферритной основе.

Автор благодарен профессору С.А. Головину за консультации по графическому анализу амплитудных зависимостей внутреннего трения чугунов и доценту С. И. Архангельскому за интерес к работе и обсуждение полученных результатов.

Работа была выполнена в рамках мероприятия 1.4 «Развитие внутрироссийской мобильности научных и научно-педагогических кадров путем выполнения научных исследований молодыми учеными и преподавателями в научно-образовательных центрах» федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Литература

- Cooper C.A., Elliott R., Young R.J. Acta mater. **50**(16), 2002(4037).
- V.I. Litovka, A.A. Snezhko, A.P. Yakovlev, M.V. Voloschenko, P.P. Luzan Naukova Dumka Cyclic strength of cast iron. - Kiev., 1973. - 168 p. (in Russian) [Литовка В. И., Снежко А. А., Яковлев А. П., Волощенко М. В., Лузан П. П. Циклическая вязкость чугуна. - Киев: Наукова Думка, 1973. - 168 с.].
- A.I. Skvortsov, Physics of Metals and Metallography. **97**(1), 2004 (102) (in Russian) [Скворцов А. И. Физика металлов и металловедение. **97**(1), 2004 (102)].
- K.V. Makarenko, Foundry. **4**, 2009(2). (in Russian) [Макаренко К. В. Литейное производство. **4**, 2009 (2)].
- S.A. Saltykov. Stereometric metallography. - Moscow, Metallurgy, 1970. - 376 p. (in Russian) [Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. - М.: Металлургия, 1970. - 376 с.].
- A.N. Chukanov. Improved apparatus for the measurement of low-frequency internal friction. Crystal defects and alloys with special properties. - Tula - TulPI - 1994 (177-182). (in Russian). [Чуканов А. Н. Совершенствование аппаратуры для измерения низкочастотного внутреннего трения. Дефекты кристаллической решетки и сплавы с особыми свойствами. - Тула, - ТулПИ, 1994 (177-182)].
- S.I. Archangelsky, G.D. Petrushin, A.G. Petrushina, V.G. Mikhailov, Factory laboratory. Diagnostic of materials. **77** (7), 2011(34). (in Russian) [Архангельский С.И., Петрушин Г.Д., Петрушина А.Г., Михайлов В.Г. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. **77** (7), 2011(34)].
- K.S. Cherniavsky. Stereology in metallurgy. Moscow, Metallurgy, 1977, 280 p. (in Russian) [Чернявский К. С. Стереология в металловедении. М., Металлургия, 1977, 280 с.].