



НЭТИ

Обработка металлов

(технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Ультразвуковая неразрушающая система прогнозирования свойств отливок из чугуна с шаровидным графитом

*Дигвиджай Мхамане^{1, а, *}, Ананд Бевур^{2, в}*¹ Инженерно-исследовательский колледж Зил, Хархе Пуне, Университет Савитрибай Пхуле, г. Пуна, штат Махараштра, 411041, Индия² Инженерный колледж для женщин им. Камминс, г. Пуна, штат Махараштра, 411052, Индия^а  <https://orcid.org/0000-0002-3277-0443>,  digvijay.ndt@gmail.com; ^в  <https://orcid.org/0000-0001-9329-3807>,  anand.bewoor@cumminscollege.in

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 620.179.16:669.131.7

История статьи:

Поступила: 22 февраля 2026

Рецензирование: 27 февраля 2026

Принята к печати: 11 апреля 2026

Доступно онлайн: 15 июня 2026

Ключевые слова:

Чугун с шаровидным графитом

Неразрушающий контроль

Скорость распространения

ультразвуковых колебаний

Прогнозирование свойств

АННОТАЦИЯ

Введение. Чугун с шаровидным графитом (ЧШГ) широко применяется в инженерных конструкциях благодаря его высоким механическим свойствам, которые в значительной мере определяются степенью сфероидизации графитных включений. Традиционная металлографическая оценка сфероидизации обеспечивает высокую точность, однако является разрушающей и трудоемкой процедурой. В связи с этим существует потребность в надежном неразрушающем подходе для оперативной оценки качества отливок, особенно в условиях мелкосерийного литейного производства. **Цель настоящей работы:** разработка методологической основы прогнозирования сфероидизации и механических свойств отливок из ЧШГ на базе ультразвукового контроля. **Методы исследования.** Были изготовлены отливки из трех марок ЧШГ (ВЧ 400/12, 500/7 и 600/3) в соответствии с планом экспериментов Taguchi L27. В качестве управляемых параметров рассматривались температура заливки (1380...1420 °С), углеродный эквивалент (4,0...4,6) и толщина стенки отливки (5...15 мм). Ультразвуковой контроль выполнялся с помощью дефектоскопа с преобразователем частотой 4 МГц для измерения скорости продольных ультразвуковых волн в образцах. Сфероидизация определялась по результатам ультразвуковых измерений с использованием внутренней калибровочной базы прибора и соответствующей зависимости скорости распространения ультразвуковых колебаний. Предел прочности при растяжении и твердость определяли стандартными методами механических испытаний. Были разработаны модели множественной линейной регрессии, связывающие технологические параметры и скорость распространения ультразвуковых колебаний со сфероидизацией, пределом прочности при растяжении (σ_B) и твердостью по Бринеллю. **Результаты и обсуждение.** Разработанные модели продемонстрировали высокую прогностическую способность с коэффициентами детерминации $R^2 = 0,8955$ для сфероидизации, $R^2 = 0,9954$ для σ_B и $R^2 = 0,8135$ для твердости. Углеродный эквивалент идентифицирован как наиболее значимый параметр, влияющий на все отливки. Скорость распространения ультразвуковых колебаний демонстрирует выраженную положительную корреляцию со сфероидизацией и механическими свойствами. Валидация с привлечением металлографического анализа подтвердила хорошую сходимость с ультразвуковыми оценками при отклонениях в пределах 2...3 %. Исследование показало, что скорость распространения ультразвуковых колебаний может быть эффективно использована для прогнозирования микроструктурных характеристик и механических свойств ЧШГ. Разработанные регрессионные модели представляют собой простой и практичный инструмент для неразрушающей оценки, обеспечивающий оперативный контроль качества в литейном производстве, в особенности для малых предприятий.

Для цитирования: Мхамане Д., Бевур А. Ультразвуковая неразрушающая система прогнозирования свойств отливок из чугуна с шаровидным графитом // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2026. – Т. 28, № 2. – С. 179–195. – DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.2-179-195.

Введение

Чугун с шаровидным графитом (ЧШГ), также известный как высокопрочный чугун, широко применяется в автомобилестроении, машиностроении и для изготовления несущих конструкций благодаря удачному сочетанию

прочности, пластичности, износостойкости и литейных свойств [1–4]. Механические характеристики ЧШГ в значительной степени зависят от формы, размера и распределения шаровидных включений графита (сфероидов) в микроструктуре. Высокая сфероидизация графита, как правило, повышает предел прочности при растяжении, пластичность и сопротивление усталости, тогда как неправильная форма графитовых включений может снижать механические свойства отливок. Следовательно, надежная оценка степени сфероидизации и микроструктуры

*Адрес для переписки

Мхамане Дигвиджай, исследователь (аспирант)

Инженерно-исследовательский колледж Зил, Хархе Пуне,

Университет Савитрибай Пхуле,

411041, г. Пуна, штат Махараштра, Индия

Тел.: 0230 242 1300, e-mail: digvijay.ndt@gmail.com

имеет критическое значение в литейном производстве и при контроле качества.

Традиционно степень сфероидизации и характеристики микроструктуры оценивают с помощью металлографического анализа. Этот метод подразумевает вырезку образцов, их шлифовку и микроскопические исследования. Несмотря на точность результатов, металлография является разрушающим методом и требует значительных временных затрат, что делает ее непригодной для использования в реальном времени в процессе производства. Из-за этих ограничений исследователи изучают различные методы неразрушающего контроля (НК) для оценки микроструктуры и механических свойств чугунов [5, 6]. Ультразвуковой метод измерения скорости распространения волн предлагает неразрушающую альтернативу, позволяя проводить быструю и объективную оценку без потери материала [5, 6].

Ультразвуковой контроль как один из методов НК широко изучается в материаловедении. Границы зерен, неметаллические включения и сфероиды графита являются примерами внутренних неоднородностей, с которыми ультразвуковые волны могут взаимодействовать при распространении в твердом теле. Поскольку характер распространения ультразвуковых волн зависит от упругих свойств и внутренней структуры материала, то такие параметры, как скорость распространения ультразвуковых колебаний и затухание ультразвуковых волн, могут предоставить важную информацию о микроструктуре и механических свойствах. Благодаря способности ультразвуковых волн проходить через материалы и регистрироваться ультразвуковым оборудованием, можно оценивать физические свойства, включая упругость материала. Для оценки механических свойств и микроструктуры материалов в практических условиях разработаны различные методы и приборы ультразвуковых измерений [7]. Важно отметить, что большинство исследователей используют данные о скорости распространения ультразвуковых колебаний и их затухании для корреляции ультразвуковых измерений с микроструктурой и показателями механических свойств.

На практике ультразвуковые методы успешно применяются для решения разнообразных задач по исследованию материалов. Они включают в себя определение модуля объемного сжатия,

модуля сдвига, модуля Юнга и других упругих констант металлов [8, 9]. Ультразвуковые методы также используются для оценки микроструктурных характеристик, таких как размер зерна и его рост в процессе обработки [10]. Данные ультразвуковых исследований также могут применяться для оценки механических свойств, например твердости [11] и предела текучести [12]. Более того, исследователи пользуются ультразвуковыми методиками для контроля параметров обработки, таких как рекристаллизация при термической обработке и глубина упрочненного слоя при поверхностной обработке [13]. Эти особенности сделали ультразвуковой контроль одним из наиболее широко используемых методов НК в инженерной отрасли.

В последние годы возможности ультразвуковых методов контроля расширились благодаря ряду технологических достижений. Ультразвуковой контроль (дефектоскопия) методом фазированных решеток (Phased Array Ultrasonic Testing, PAUT), дифракционно-временной метод (Time-of-Flight Diffraction, TOFD), полный матричный сбор данных (Full Matrix Capture, FMC) и автоматизированный ультразвуковой контроль (Automated Ultrasonic Testing, AUT) являются примерами передовых методов, которые повышают эффективность обнаружения дефектов, позволяют получать изображения внутренних дефектов и проводить автоматизированный контроль сложных геометрических форм [14]. Эти разработки дают возможность характеризовать внутреннюю структуру и дефекты в конструкционных материалах с большей точностью.

Помимо ультразвукового контроля изучались и другие неразрушающие методы оценки степени сфероидизации в чугунах. Электромагнитные методы, такие как вихретоковый контроль, позволяют обнаруживать изменения магнитных и электрических свойств, вызванные микроструктурными изменениями. Аналогично резонансные методы измеряют собственную частоту колебаний компонента для оценки его упругих свойств. Несмотря на полезность этих подходов, ультразвуковые методы лучше подходят для литейного производства, поскольку их проще применять для толстостенных отливок и они часто обладают более высокой чувствительностью к внутренним микроструктурным изменениям [15, 16].

Помимо экспериментальных методов исследователи связывают ультразвуковые параметры с микроструктурой и механическими свойствами с помощью инструментов статистического моделирования. Регрессионные модели часто используются для установления взаимосвязей между скоростью ультразвука и такими характеристиками, как твердость, предел прочности при растяжении и степень сфероидизации. В последние годы для повышения точности прогнозирования применяются методы машинного обучения, позволяющие одновременно анализировать несколько переменных, включая химический состав, параметры обработки и ультразвуковые измерения [17–19]. Тем не менее многие современные исследования сосредоточены на небольших наборах данных или специализированных материалах, а комплексные модели, включающие в себя механические свойства, ультразвуковые измерения и технологические параметры, по-прежнему встречаются редко.

Таким образом, для точной оценки отливок из ЧШГ необходим методический подход, включающий в себя планирование эксперимента, ультразвуковое исследование и прогнозное моделирование. Настоящее исследование, использующее методологию экспериментального планирования Taguchi и регрессионный анализ, направлено на разработку неразрушающего метода на основе ультразвука для прогнозирования степени сфероидизации и механических свойств отливок из чугуна с шаровидным графитом [20, 21]. **Цель работы** заключается в установлении четких взаимосвязей между скоростью ультразвука, степенью сфероидизации и механическими свойствами, что позволит превратить ультразвуковой контроль в полезный инструмент

оценки качества в литейной промышленности по производству ЧШГ.

Методы

Объектом исследования стали три марки чугуна с шаровидным графитом (ЧШГ) – ВЧ 400/12, ВЧ 500/7 и ВЧ 600/3, – которые в совокупности обеспечивают практический диапазон механических свойств для инженерных применений [8, 9]. Фактический химический состав этих марок, представленный в табл. 1, показывает, что концентрации углерода (C), кремния (Si), марганца (Mn), фосфора (P), серы (S), магния (Mg) и меди (Cu, если присутствует) находятся в пределах, установленных соответствующими стандартами на ЧШГ [22]. Было установлено, что углерод, кремний и фосфор очень важны для формирования шаровидного графита и, как следствие, для регулирования степени сфероидизации и механических свойств отливок [22].

Планирование эксперимента и литейные испытания

Для исследования многофакторного влияния параметров литья на скорость распространения ультразвуковых колебаний и процент сфероидизации в ступенчатых отливках из ЧШГ использовался систематический подход планирования эксперимента (Design of Experiments, DoE) с применением ортогонального массива Taguchi L27. Исследуя три управляющих фактора на трех уровнях каждый, массив L27 эффективно охватывает экспериментальную область. Это обеспечивает ортогональную сбалансированность и независимость факторов при сокращении числа опытов с 81 (полный факторный

Таблица 1

Table 1

Химический состав исследуемых марок ЧШГ
Chemical composition of the SG iron grades

Марка ЧШГ	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Mg (%)	Cu (%)
400/12 (факт.)	3,65	2,825	0,66	0,045	0,021	0,035	–
500/7 (факт.)	3,45	2,62	0,45	0,045	0,018	0,035	0,4
600/3 (факт.)	3,25	2,36	0,66	0,045	0,020	0,035	0,4

Обозначение: 400 – предел прочности при растяжении, Н/мм², 12 – относительное удлинение, %.

эксперимент: 3^4) до 27 (полный факторный эксперимент: 3^3) [20]. На основе известных эффектов влияния на морфологию графита и характер охлаждения были выбраны три параметра литья в качестве управляющих факторов, как указано в табл. 2: (1) температура заливки ($T_{\text{зал}}$), которая варьируется от 1380 °С до 1420 °С с шагом 20 °С для модуляции жидкотекучести расплава и скорости затвердевания; (2) углеродный эквивалент (СЭ), находящийся в диапазоне от 4,0 до 4,6 для исследования влияния содержания углерода на зарождение и рост графита; (3) толщина стенки (T), которая варьируется от 5 мм до 15 мм для создания контролируемых изменений скоростей охлаждения и формирования микроструктуры [23].

Для производства отливок использовалась индукционная печь средней частоты емкостью 500 кг. Химический состав каждой номинальной марки (ВЧ 400/12, ВЧ 500/7 и ВЧ 600/3) достигался с помощью контроля шихты и легирующих

добавок; измеренные составы представлены в табл. 1. Для изготовления форм использовалась зеленая (сырая) формовочная смесь со средним размером зерен 0,25 мм, газопроницаемостью 250 и прочностью в сыром состоянии 1,8 МПа. Модификатор, состоящий из ферросилиция с добавками стронция (обычно 0,1 % Sr), вводился в количестве 0,4 масс. % от массы жидкого металла. Модифицирование проводилось при переливании металла из разливочного ковша в заливочный ковш, что обеспечивало быстрое растворение и равномерное распределение модификатора в расплаве. Для измерения и регистрации температуры заливки на трех различных уровнях (1380, 1400 и 1420 °С) использовалась термопара, установленная в ковше. Фиксировалось время охлаждения на воздухе и выбивки каждой отливки из формы; образцы извлекались после их охлаждения до комнатной температуры.

Таблица 2

Table 2

Входные параметры и их уровни для ортогонального массива L27

Input parameters and their levels for the L27 orthogonal array

Параметр	Обозначение	Уровень I	Уровень II	Уровень III
Температура заливки, °С	$T_{\text{зал}}$	1380	1400	1420
Углеродный эквивалент	СЭ	4,6	4,3	4,0
Толщина стенки, мм	T	5	10	15

Для обеспечения систематического пространственного анализа взаимодействий между технологическими параметрами и свойствами по всей области экспериментального пространства все 27 комбинаций, перечисленных в табл. 3, были изготовлены в виде ступенчатых отливок в песчаных формах, причем каждая отливка состояла из трех участков различной толщины. Благодаря такой геометрической форме можно было исследовать все три уровня толщины в пределах одной отливки, что сокращало время подготовки форм и позволяло проводить прямое сравнение влияния толщины при одинаковых условиях заливки и состава.

Ультразвуковой контроль

Измерение скорости распространения ультразвуковых колебаний в отливках из ЧШГ про-

водилось с помощью ультразвукового дефектоскопа ADVANSCAN AS-414 (производства ЕЭС) со встроенным программным обеспечением для анализа (рис. 1). Для генерации и приема ультразвуковых волн использовался пьезоэлектрический преобразователь диаметром 10 мм с частотой 4 МГц. Скорость распространения ультразвуковых колебаний (V) рассчитывалась как отношение толщины образца (d) ко времени прохождения волны (t) через материал:

$$V = \frac{d}{t}, \quad (1)$$

где скорость ультразвука зависит от плотности, упругости и внутренних микроструктурных особенностей материала [24, 25].

После калибровки образцы марок ВЧ 400/12, ВЧ 500/7 и ВЧ 600/3 были испытаны в соответствии со стандартной процедурой для обеспе-

Таблица 3

Table 3

Ортогональный массив L27
L27 orthogonal array

№ опыта	$T_{\text{зал}}, ^\circ\text{C}$	СЭ	$T, \text{мм}$
1	1380	4,6	5
2	1380	4,6	10
3	1380	4,6	15
4	1380	4,3	10
5	1380	4,3	15
6	1380	4,3	5
7	1380	4,0	15
8	1380	4,0	5
9	1380	4,0	10
10	1400	4,6	5
11	1400	4,6	10
12	1400	4,6	15
13	1400	4,3	10
14	1400	4,3	15
15	1400	4,3	5
16	1400	4,0	15
17	1400	4,0	5
18	1400	4,0	10
19	1420	4,6	5
20	1420	4,6	10
21	1420	4,6	15
22	1420	4,3	10
23	1420	4,3	15
24	1420	4,3	5
25	1420	4,0	15
26	1420	4,0	5
27	1420	4,0	10



Рис. 1. Измерение скорости распространения ультразвуковых колебаний и сфероидизации ступенчатой отливки

Fig. 1. Measurement of ultrasonic velocity and nodularity of the step casting

чения воспроизводимости результатов [13–15]. Образцы из ступенчатых отливок с толщиной сечения 5, 10 и 15 мм были оценены, как показано на рис. 1, в заранее определенных местах для определения влияния геометрии на скорость распространения ультразвуковых колебаний и степень сфероидизации [26, 27].

Процент сфероидизации образцов высокопрочного чугуна оценивался с использованием ультразвукового дефектоскопа ADVANSCAN AS-414. Путем измерения скорости продольной ультразвуковой волны в материале с известной толщиной устройство косвенно оценивало степень сфероидизации. Скорость рассчитывали по времени прохождения ультразвукового импульса, а затем сравнивали с внутренней калибровочной базой данных прибора. Эта база данных основана на ранее установленных зависимостях между микроструктурными характеристиками чугуна и скоростью распространения ультразвуковых колебаний.

Хорошо известно, что форма графита, особенно степень его сфероидизации, оказывает значительное влияние на скорость ультразвука в чугуне. Более высокая сфероидизация (шаровидный графит) обеспечивает более гладкое распространение волны и более высокие скорости, в то время как более низкая сфероидизация приводит к большему рассеянию и более низким скоростям. Следовательно, дефектоскоп использует ранее установленные эмпирические зависимости для преобразования зарегистрированной скорости в значения сфероидизации, чтобы определить последнюю. Аналогичные тенденции были обнаружены в предыдущих исследованиях – это подтверждает, что форма графита является наиболее важным структурным компонентом, влияющим на скорость ультразвуковых волн в чугуне [28].

Испытания на растяжение и твердость

Испытания на растяжение и твердость были проведены на образцах, взятых из участков толщиной 5, 10 и 15 мм ступенчатых отливок, которые соответствуют каждому эксперименту по плану L27, для оценки механических свойств, как показано в табл. 4. Испытания на растяжение по стандарту ASTM E8/E8M позволили определить предел прочности при растяжении (временное сопротивление разрушению) [29].

Таблица 4

Table 4

Результаты определения предела прочности при растяжении и твердости ступенчатых отливок
Tensile strength and hardness data of the step castings

№ опыта	$T_{\text{зал}}, ^\circ\text{C}$	СЭ	Толщина стенки, мм	Скорость распространения ультразвуковых колебаний (дефектоскоп, м/с)	%N	$\sigma_b, \text{Н/мм}^2$	Твердость
1	1380	4,6	5	5368	76	415	168
2	1380	4,6	10	5472	77	419	167
3	1380	4,6	15	5466	77	406	164
4	1380	4,3	10	5646	87	511	225
5	1380	4,3	15	6019	88	522	225
6	1380	4,3	5	5646	90	514	224
7	1380	4,0	15	6120	91	612	228
8	1380	4,0	5	6315	92	604	227
9	1380	4,0	10	6117	93,7	620	229
10	1400	4,6	5	5366	75	415	167
11	1400	4,6	10	5472	77	420	166
12	1400	4,6	15	5466	77	410	164
13	1400	4,3	10	5646	89	511	225
14	1400	4,3	15	6019	88	517	222
15	1400	4,3	5	5646	90	527	226
16	1400	4,0	15	6120	92	621	232
17	1400	4,0	5	6315	93	613	231
18	1400	4,0	10	6117	93,7	623	230
19	1420	4,6	5	5366	75	416	169
20	1420	4,6	10	5472	77	422	168
21	1420	4,6	15	5466	77	409	165
22	1420	4,3	10	6019	88	516	226
23	1420	4,3	15	6019	89	522	227
24	1420	4,3	5	5646	91	526	226
25	1420	4,0	15	6120	92	619	233
26	1420	4,0	5	6315	93	612	230
27	1420	4,0	10	6117	93,7	628	231

Измерения твердости по Бринеллю выполняли в соответствии со стандартом ASTM E10 [30]. Для испытаний использовали стальной шарик-индентор диаметром 10 мм с прилагаемой нагрузкой 3000 кгс и временем выдержки 10...15 с. Для каждого образца выполняли три последовательных вдавливания в разных местах, и значение твердости, приводимое в настоящей работе, представляет собой среднеарифметическое этих измерений с целью корреляции механических свойств с технологическими параметрами и скоростью ультразвука [31, 32].

Регрессионное моделирование

Для создания эмпирических прогнозных моделей, количественно описывающих взаимосвязи между технологическими параметрами (температурой заливки ($T_{\text{зал}}$), углеродным эквивалентом (СЭ), толщиной сечения (T), скоростью распространения ультразвуковых колебаний и выходными переменными (процентом сфероидизации, пределом прочности при растяжении (σ_b) и твердостью по Бринеллю (НВ)), применялся множественный линейный

регрессионный анализ. Модели были подобраны с использованием средних экспериментальных значений по всем 27 опытам; никакой предварительной обработки данных не проводилось, что позволило непосредственно интерпретировать коэффициенты в терминах технологических переменных.

Модель сфероидизации

Линейная регрессионная модель для сфероидизации была разработана на основе средних измерений скорости распространения ультразвуковых колебаний V_f , полученных с помощью дефектоскопа, и соответствующих данных по сфероидизации:

$$\%N = 230,2 + 0,0028T_{\text{зал}} - 30,23\text{СЭ} + 0,029T - 0,00316V_f, \quad (2)$$

где $\%N$ – процент сфероидизации; $T_{\text{зал}}$ – температура заливки, °С; СЭ – углеродный эквивалент; T – толщина сечения, мм; V_f – скорость распространения ультразвуковых колебаний, м/с.

Эта модель имеет коэффициент детерминации $R^2 = 0,8955$ и скорректированный $R^2 = 0,8765$, что указывает на сильную линейную аппроксимацию в пределах испытанного диапазона параметров.

Модели для предела прочности при растяжении и твердости

Аналогичным образом были использованы данные по пределу прочности при растяжении (σ_b) и твердости из табл. 4 для разработки прогнозных моделей для предела прочности при растяжении и твердости по Бринеллю (НВ) как функций от $T_{\text{зал}}$, СЭ, T и V_f [1]. Полученные уравнения имеют следующий вид:

$$(\sigma_b) = 1874 + 0,1306T_{\text{зал}} - 347,2\text{СЭ} + 0,032T - 0,0082V_f, \quad (3)$$

$$\text{НВ} = 823 + 0,050T_{\text{зал}} - 131,8\text{СЭ} + 0,103T - 0,0206V_f, \quad (4)$$

где НВ – твердость по Бринеллю, а σ_b выражено в Н/мм².

Модель для предела прочности при растяжении оказалась весьма точной ($R^2 = 0,9954$, скорректированный $R^2 = 0,9946$), в то время как модель для твердости достигла $R^2 = 0,8135$ и скорректированного $R^2 = 0,7796$, что свиде-

тельствует о приемлемой прогностической способности для твердости в пределах экспериментального диапазона [1].

Результаты и их обсуждение

С использованием количественных технологических и неразрушающих параметров, таких как температура заливки ($T_{\text{зал}}$), углеродный эквивалент (СЭ), толщина сечения (T) и скорость ультразвука (V_f), в настоящем исследовании разработаны три регрессионные модели для прогнозирования важных характеристик качества отливок из высокопрочного чугуна, включая процент сфероидизации ($\%N$), предел прочности при растяжении (σ_b) и твердость по Бринеллю (НВ). Эти модели обеспечивают согласованную и практическую основу для прогнозирования механических свойств и микроструктурных особенностей без необходимости полагаться исключительно на разрушающие испытания.

Эффективность моделей и статистическая значимость

Согласно статистическому анализу, все три модели являются значимыми и обладают высоким прогностическим потенциалом. В то время как модель для НВ имеет значительно более низкий, но все еще отличный $R^2 = 81,35\%$, модели для $\%N$ и σ_b демонстрируют высокие коэффициенты детерминации (R^2 равно 89,55 и 99,54 % соответственно). Хорошее обобщение моделей и минимальное переобучение подтверждаются тем, что прогнозируемые значения R^2 близко соответствуют соответствующим скорректированным значениям R^2 [33]. Статистически значимые регрессионные модели со значениями P -критерия менее 0,001 представлены в табл. 5–7. Высокие значения F -критерия, особенно для модели σ_b , указывают на сильные корреляции между входными переменными и откликами, которые не могут быть объяснены случайными вариациями.

Влияние технологических параметров

Наиболее важный фактор во всех трех моделях – углеродный эквивалент (СЭ). С чрезвычайно низкими значениями P -критерия и высокими значениями F -критерия он является статистически высокозначимым. Регрессионные

Таблица 5

Table 5

Дисперсионный анализ (ANOVA) для модели сфероидизации (%N)

Analysis of variance (ANOVA) for the nodularity (%N) model

Источник	DF	Скорр. SS	Скорр. MS	F-критерий	P-критерий	Вклад (%)
$T_{\text{зал}}, ^\circ\text{C}$	2	14	7	7,78	0,003	1,12
СЭ	2	1185	592,5	658,33	0	94,46
T	2	16	8	8,89	0,002	1,28
V_f	2	8	4	4,44	0,027	0,64
Ошибка	18	16,96	0,94	—	—	1,35
Итого	26	1254,96	—	—	—	100

Таблица 6

Table 6

Дисперсионный анализ (ANOVA) для модели предела прочности при растяжении (σ_b)

Analysis of variance (ANOVA) for the UTS (σ_u) model

Источник	DF	Скорр. SS	Скорр. MS	F-критерий	P-критерий	Вклад (%)
$T_{\text{зал}}, ^\circ\text{C}$	2	1100	550	1,22	0,317	0,59
СЭ	2	175 800	87 900	195,33	0	95,02
T	2	120	60	0,13	0,878	0,06
V_f	2	70	35	0,08	0,925	0,04
Ошибка	18	7922	440,1	—	—	4,28
Итого	26	185 012	—	—	—	100

Таблица 7

Table 7

Дисперсионный анализ (ANOVA) для модели твердости по Бринеллю (HB)

Analysis of variance (ANOVA) for the for the Brinell hardness (BHN) model

Источник	DF	Скорр. SS	Скорр. MS	F-критерий	P-критерий	Вклад (%)
$T_{\text{зал}}, ^\circ\text{C}$	2	55	27,5	1,1	0,354	0,24
СЭ	2	21 450	10 725	429	0	94,79
T	2	45	22,5	0,9	0,423	0,20
V_f	2	25	12,5	0,5	0,614	0,11
Ошибка	18	1057,7	58,76	—	—	4,67
Итого	26	22 632,7	—	—	—	100

коэффициенты указывают на отрицательную корреляцию между СЭ и всеми откликами ($\%N$, σ_b и НВ), это позволяет предположить, что с увеличением СЭ сфероидизация, предел прочности при растяжении и твердость снижаются. Такое поведение согласуется с принципами физического металловедения. Более высокий СЭ способствует увеличению выделения графита, влияет на поведение при затвердевании, снижает твердость и прочность металлической матрицы, а также изменяет морфологию графита [35]. Другие переменные – температура заливки ($T_{зал}$), толщина сечения (T) и скорость ультразвука (V_{ul}) – имеют сравнительно низкую индивидуальную статистическую значимость. Тем не менее их включение повышает общую точность моделей, демонстрируя, что их совместное влияние значительно улучшает прогнозирование свойств.

Взаимодействие между параметрами

Для лучшего понимания совместного влияния переменных были исследованы графики взаимодействий. Эти графики дают более глубокое понимание того, как взаимодействие двух параметров влияет на отклик.

Взаимосвязь между скоростью распространения ультразвуковых колебаний и углеродным эквивалентом

На рис. 2 представлен график взаимодействия между скоростью распространения ультразвуковых колебаний и СЭ, который обнаруживает четкую тенденцию снижения скорости распространения ультразвуковых колебаний по мере увеличения СЭ для всех толщин сечения. Это говорит о том, что более высокий углеродный эквивалент приводит к ухудшению распространения ультразвуковых колебаний. Такое явление можно объяснить микроструктурными различиями. Более высокий СЭ способствует увеличению содержания графита и его огрублению, что приводит к рассеянию ультразвуковых колебаний и снижению скорости их распространения.

Кроме того, отмеченная тенденция незначительно модулируется изменением толщины сечения, это указывает на то, что скорость охлаждения влияет на ультразвуковой отклик. Более тонкие сечения (которые охлаждаются быстрее) демонстрируют сравнительно более высокие

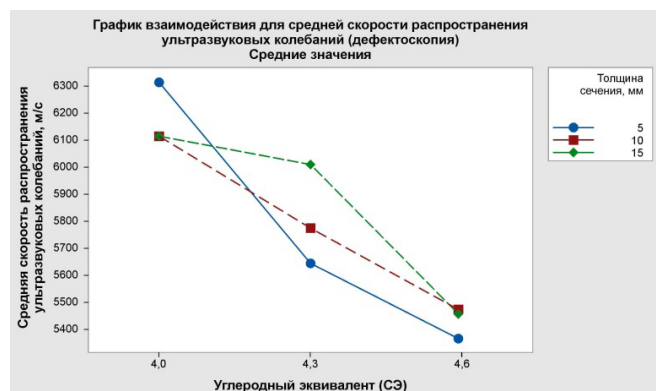


Рис. 2. Зависимость скорости распространения ультразвуковых колебаний от углеродного эквивалента

Fig. 2. Relation between ultrasonic velocity and CEV

скорости, чем более толстые сечения. Такой результат согласуется с предыдущими исследованиями, показывающими, что изменения внутренней структуры и формы графита в чугунах влияют на скорость ультразвука [28, 34].

Взаимосвязь между процентом сфероидизации и углеродным эквивалентом

Согласно графику взаимодействия (рис. 3) между $\%N$ и СЭ, сфероидизация явно снижается по мере увеличения СЭ. Эта тенденция сохраняется для всех толщин сечения с лишь незначительными вариациями. Высокая сфероидизация ($> 90\%$) при более низких значениях СЭ ($\sim 4,0$) указывает на благоприятную сфероидизацию графита. Однако сфероидизация резко снижается (примерно до $75\ldots 78\%$) по мере увеличения СЭ ($\sim 4,6$). Это демонстрирует, что избыток углерода отрицательно влияет на формирование шаровидного графита. Толщина сечения также

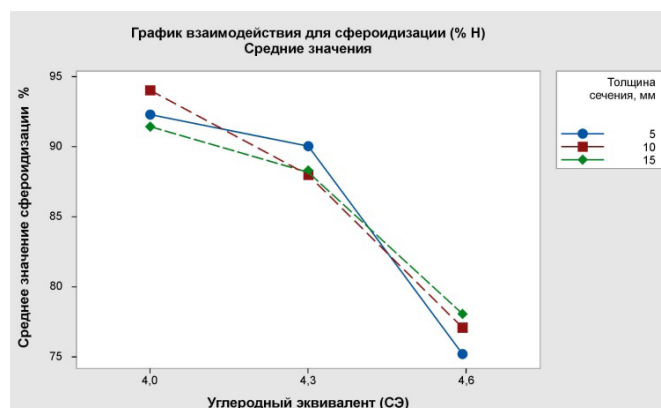


Рис. 3. Зависимость процента сфероидизации от углеродного эквивалента

Fig. 3. Relation between % nodularity and CEV

влияет на указанный эффект. При более высоких значениях СЭ более толстые сечения сохраняют несколько более высокую сфероидизацию – вероятно, из-за более медленных скоростей охлаждения, которые допускают более стабильный рост графита. Тем не менее СЭ по-прежнему оказывает сильное негативное влияние. Более высокий углеродный эквивалент связан с деградацией формы графита и снижением сфероидизации в результате изменения динамики затвердевания, что является веским доказательством такого поведения [35].

Взаимосвязь между процентом сфероидизации и температурой заливки

Согласно графику взаимодействия (рис. 4) между процентом сфероидизации и температурой заливки, температура заливки оказывает умеренное, но заметное влияние на сфероидизацию. При промежуточных температурах заливки (~1400 °С) сфероидизация незначительно увеличивается, особенно для средней толщины сечения. При более низких (1380 °С) и более высоких (1420 °С) температурах сфероидизация имеет тенденцию к снижению или стабилизации. Это демонстрирует, что оптимальная сфероидизация графита происходит в определенном диапазоне температур заливки. Как чрезмерно низкие, так и чрезмерно высокие температуры отрицательно влияют на формирование шаровидного графита – низкие температуры могут вызывать преждевременное затвердевание, в то время как высокие температуры могут приводить к угасанию эффекта магниевой обработки.

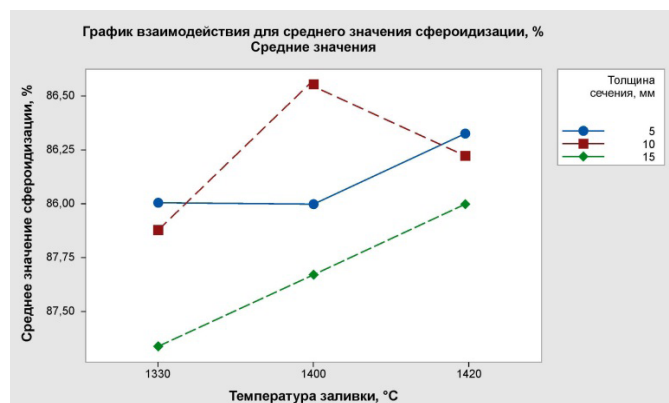


Рис. 4. Зависимость процента сфероидизации от температуры заливки

Fig. 4. Relation between % nodularity and pouring temperature

Взаимосвязь с толщиной сечения указывает на то, что более толстые сечения более чувствительны к изменениям температуры, в то время как более тонкие сечения демонстрируют более стабильную сфероидизацию в диапазоне температур. Эти результаты обусловлены различиями во времени затвердевания и скоростях охлаждения и согласуются с металлургическим пониманием того, что температура заливки существенно влияет на условия зарождения и роста графита [36].

Микроструктурная валидация и анализ соответствия

Микроструктурная валидация репрезентативных образцов ЧШГ была выполнена с использованием инвертированного металлографического микроскопа при увеличении 100 крат. Микроструктурный анализ был проведен на девяти репрезентативных образцах, которые включали в себя все комбинации трех марок ЧШГ (ВЧ 400/12, ВЧ 500/7 и ВЧ 600/3) и трех толщин сечения (5 мм, 10 мм и 15 мм). Для металлографического анализа образцы каждой марки были вырезаны из литых заготовок, запрессованы, отшлифованы и протравлены в соответствии со стандартом ASTM A247. Микроструктура исследовалась с помощью оптического микроскопа, и были сделаны цифровые микрофотографии. Затем микрофотографии были обработаны с помощью программного обеспечения для анализа изображений с целью расчета процентной доли сферических графитовых частиц относительно общей площади графита, что соответствует проценту сфероидизации, определенному в стандарте ASTM A247 [37].

Набор данных для валидации, представленный в табл. 8, показывает высокую корреляцию между ультразвуковыми оценками сфероидизации, полученными с помощью дефектоскопа ADVANSCAN AS-414, и оптической микроскопией при увеличении 100 крат. Ультразвуковые значения сфероидизации для марки ВЧ 400/12 при СЭ 4,6 (76...77 %) были очень близки к металлографическим значениям (75,33...78 %) с максимальным расхождением 2 %. При умеренном СЭ 4,3 (ВЧ 500/7) ультразвуковая оценка сфероидизации 89...90 % соответствовала микроскопической оценке 87,34...89 % также с максимальным расхождением 2...3 %. При

**Валидация сфероидизации: сопоставление результатов ультразвукового контроля
и оптической микроскопии**

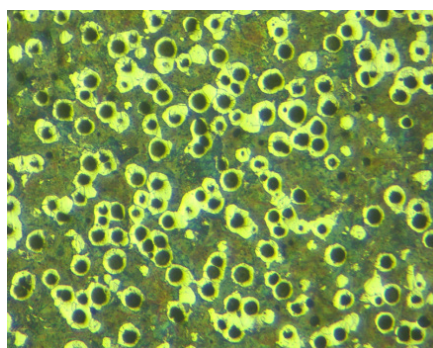
Validation of nodularity: ultrasonic testing and optical microscopy

Марка ЧШГ	СЭ	Толщина, мм	Скорость распространения ультразвуковых колебаний, м/с	%N (УЗК)	%N (микроскопия)
400/12	4,6	5	5363	76	75,33
400/12	4,6	10	5470	77	77
400/12	4,6	15	5470	77	78
500/7	4,3	5	5645	90	87,34
500/7	4,3	10	5645	89	88,33
500/7	4,3	15	6018	89	89
600/3	4,0	5	6315	93	91,33
600/3	4,0	10	6114	94	92,33
600/3	4,0	15	6114	92	94

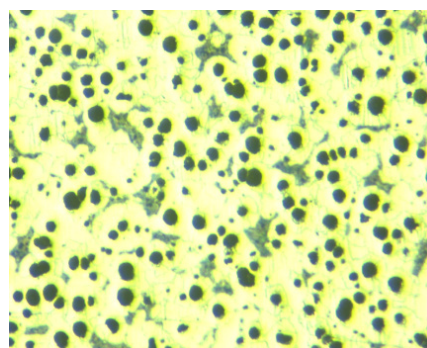
наименьшем СЭ 4,0 (ВЧ 600/3) ультразвуковая оценка сфероидизации 92...94 % совпала с металлографическими значениями 91,33...94 % лишь с незначительным расхождением.

Микроструктурное исследование (рис. 5, увеличение 100 крат, травление 2%-м раствором азотной кислоты в спирте) показывает, что более низкий СЭ (ВЧ 600/3) приводит к формированию четко очерченных, равномерно распределенных шаровидных графитовых частиц в непрерывной металлической матрице, тогда как более высокий СЭ (ВЧ 400/12) приводит к неправильной, нешаровидной морфологии графита с разрывами матрицы. Эти оптические

исследования подтверждают количественные взаимосвязи, выявленные с помощью ультразвукового метода и регрессионного анализа, причем изменения сфероидизации (ВЧ 600/3: 92...94 %, ВЧ 400/12: 74...78 %) напрямую отражаются как в микроскопической морфологии, так и в характере распространения акустических волн. Несмотря на незначительные различия в принципах измерений, статистический анализ подтверждает линейную зависимость между сфероидизацией и скоростью распространения ультразвуковых колебаний, причем более высокие скорости стабильно ассоциируются с более высокими процентами сфероидизации, что под-



а



б

Рис. 5. Микроструктура марок 600/3 (а) и 400/12 (б) после травления 2%-м раствором азотной кислоты в спирте (съемка на инвертированном микроскопе при увеличении $\times 100$)

Fig. 5. Microstructures of 600/3 (a) and 400/12 (b) etched with 2 % nital solution (captured using inverted microscope at 100 $\times$ magnification)

крепляет полезность скорости распространения ультразвуковых колебаний как количественного индикатора микроструктурного качества.

Заключение

1. В настоящем исследовании обнаружена существенная взаимосвязь между сфероидизацией графита и скоростью распространения ультразвуковых колебаний в отливках из ЧШГ, изготовленных в контролируемых условиях. Исследование охватило широкий диапазон параметров ($T_{\text{зал}} = 1380 \dots 1420$ °С, СЭ = 4,0...4,6, $T = 5 \dots 15$ мм) и три коммерчески значимые марки чугуна (ВЧ 400/12, ВЧ 500/7 и ВЧ 600/3).

2. На основе технологических параметров и скорости распространения ультразвуковых колебаний в исследовании были разработаны регрессионные модели для прогнозирования сфероидизации, предела прочности при растяжении (σ_b) и твердости по Бринеллю (НВ). Модели отлично согласуются с экспериментальными результатами и демонстрируют высокую точность прогнозирования.

3. Установлено, что углеродный эквивалент (СЭ) является наиболее значимым фактором. СЭ играет решающую роль в регулировании микроструктуры, поскольку графики взаимодействия показали, что он оказывает существенное влияние как на сфероидизацию, так и на скорость распространения ультразвуковых колебаний.

4. Использование скорости распространения ультразвуковых колебаний представляет собой эффективный метод неразрушающего контроля качества в реальном времени. Поскольку прогностические модели просты и эффективны, они весьма полезны для небольших литейных предприятий.

Ключевым вкладом является включение скорости распространения ультразвуковых колебаний (V_f) во все модели. Внутренние характеристики, включая микроструктуру, плотность и упругие свойства, могут быть обнаружены с помощью ультразвукового контроля. Объединяя V_f с технологическими параметрами, модели могут прогнозировать сфероидизацию, твердость и предел прочности при растяжении без разрушения. Это улучшает оценку качества в реальном времени, устраняя необходимость в разрушающих испытаниях. Значительные вза-

имосвязи между ультразвуковыми параметрами и свойствами материалов (чугунов) также были обнаружены в предыдущих исследованиях [28, 34]. Поскольку небольшие литейные предприятия имеют ограниченный доступ к современным испытательным лабораториям, то предлагаемые модели особенно полезны. Толщина сечения, химический состав (для СЭ), температура заливки и скорость ультразвука – все это либо регулярно регистрируется, либо легко измеряется. Операторы могут с легкостью прогнозировать важные свойства материала, интегрируя эти модели в простые инструменты, такие как электронные таблицы или мобильные устройства. Это обеспечивает контроль процесса в реальном времени, быструю оценку качества, снижение затрат на испытания и возможность быстрой коррекции. Подобная прогностическая способность повышает стабильность качества отливок и эффективность производства.

Ограничения и будущие исследования

Линейные регрессионные модели строго откалиброваны для исследованного пространства параметров (СЭ = 4,0...4,6, $T_{\text{зал}} = 1380 \dots 1420$ °С, $T = 5 \dots 15$ мм) и не должны экстраполироваться за пределы этих границ без дополнительной валидации. Такие факторы, как микроструктурная неоднородность, изменения в практике модифицирования (инокулирования) и различия в материале форм (которые не варьировались в настоящем исследовании), могут влиять на производственные показатели и требуют дальнейшего изучения. Тем не менее продемонстрированная методология обеспечивает строгую и масштабируемую основу для развития неразрушающего контроля качества в производстве ЧШГ и поддержки основанной на фактических данных оптимизации технологических процессов.

Список литературы

1. Sangame B.B., Reddy Y.P. Investigation on effect of different types of inoculants on the solidification of ductile cast iron using thermal analysis // Multidiscipline Modeling in Materials and Structures. – 2024. – Vol. 20 (6). – P. 995–1012. – DOI: 10.1108/MMMS-03-2024-0084.
2. Evaluation of austempered ductile iron end milling by magnetic Barkhausen noise and x-ray diffraction methods / L. Benini, P.P.R. de Paula, S.S.M. Tavares,



F. de Sá Carnerio, L.F. Noris, B.M. da Conceição, J.M.M. Júnior // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2025. – Vol. 34. – P. 9026–9036. – DOI: 10.1007/s11665-025-10794-6.

3. Microstructure and tribological property correlations of die cast and spray formed Al-30 wt.% Si alloy / H.K.C. Mohan, S. Devaraj, K.S.N. Swamy, B.K. Venkatesh // *Journal of Mines, Metals and Fuels*. – 2022. – Vol. 70 (10A). – P. 307–313. – DOI: 10.18311/jmmf/2022/32772.

4. Kadam S., Kabnure B., Mhamane D. Computer-aided simulation of railway insert for defect analysis and yield improvement // *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*. – 2021. – Vol. 102. – P. 651–656. – DOI: 10.1007/s40032-021-00680-0.

5. Nondestructive characterization of microstructures and determination of elastic properties in plain carbon steel using ultrasonic measurements / V.L. de A. Freitas, V.H.C. de Albuquerque, E. de M. Silva, A.A. Silva, J.M.R.S. Tavares // *Materials Science and Engineering: A*. – 2010. – Vol. 527 (16–17). – P. 4431–4437. – DOI: 10.1016/j.msea.2010.03.090.

6. Nanekar P.P., Shah B.K. Characterization of material properties by ultrasonic // *BARC Newsletter*. – 2003. – N 249. – P. 25–38.

7. On the correlation between microstructural evolution and ultrasonic properties: A review / M. Toozandehjani, K.A. Matori, F. Ostovan, F. Mustapha, N.I. Zahari, A. Oskoueian // *Journal of Materials Science*. – 2015. – Vol. 50 (7). – P. 2643–2665. – DOI: 10.1007/s10853-015-8855-x.

8. Kim S.A., Johnson W.L. Elastic constants and internal friction of martensitic steel, ferritic-pearlitic steel, and α -iron // *Materials Science and Engineering: A*. – 2007. – Vol. 452–453. – P. 633–639. – DOI: 10.1016/j.msea.2006.11.147.

9. Kumar A., Jayakumar T., Raj B. Influence of precipitation of intermetallics on Young's modulus in nickel and zirconium base alloys // *Philosophical Magazine Letters*. – 2006. – Vol. 86 (9). – P. 579–587. – DOI: 10.1080/09500830600936401.

10. Thickness and grain size monitoring in seamless tube making process using laser ultrasonics / D. Lévesque, S.E. Kruger, G. Lamouche, R. Kolarik, G. Jeskey, M. Choquet, J.-P. Monchalain // *NDT & E International*. – 2006. – Vol. 39 (8). – P. 622–626. – DOI: 10.1016/j.ndteint.2006.04.009.

11. Badidi Bouda A., Benchaala A., Alem K. Ultrasonic characterization of materials hardness // *Ultrasonics*. – 2000. – Vol. 38 (1–8). – P. 224–227. – DOI: 10.1016/S0041-624X(99)00081-5.

12. Aghaie-Khafri M., Honarvar F., Zanganeh S. Characterization of grain size and yield strength in AISI 301 stainless steel using ultrasonic attenuation

measurements // *Journal of Nondestructive Evaluation*. – 2012. – Vol. 31 (3). – P. 191–196. – DOI: 10.1007/s10921-012-0134-z.

13. Vasudevan M., Palanichami P. Characterization of microstructural changes during annealing of cold worked austenitic stainless steel using ultrasonic velocity measurements and correlation with mechanical properties // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2002. – Vol. 11 (2). – P. 169–179. – DOI: 10.1361/105994902770344231.

14. Ultrasonic non-destructive evaluation of composites: A review / J. Jodhani, A. Handa, A. Gautam, R. Rana // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. – Vol. 78. – P. 627–632. – DOI: 10.1016/j.matpr.2022.12.055.

15. Influence of structural parameters – the shape of graphite and matrix on change of ultrasonic wave propagation rate and value of attenuation in graphitic cast irons / J. Belan, E. Tillová, M. Uhrčík, L. Pastierovičová // *Production Engineering Archives*. – 2023. – Vol. 29 (1). – P. 23–27. – DOI: 10.30657/pea.2023.29.4.

16. Determination of microstructure changes by eddy-current methods for cold and warm forming applications / S. Hütter, R. Lafarge, J. Simonin, G. Mook, A. Brosius, T. Halle // *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. – 2021. – Vol. 2. – P. 100042. – DOI: 10.1016/j.aime.2021.100042.

17. Hatate M., Nobuki T., Komatsu S. Accuracy improving methods in estimation of graphite nodularity of ductile cast iron by measurement of ultrasonic velocity // *Science and Technology of Casting Processes*. – InTech, 2012. – DOI: 10.5772/50596.

18. Methodology for determination of degree of nodularity in a ductile cast iron GGG 40 by ultrasonic velocity test / D. Agnoletto, G.V.B. Lemos, A.B. Beskow, C.R. de L. Lessa, A. Reguly // *Southern Brazilian Journal of Chemistry*. – 2018. – Vol. 26. – P. 10–16. – DOI: 10.37633/SBJC.26(26)2018.10-16.

19. Yadav A., Prajapati K.K., Mitra M. Deep learning-assisted prediction of mean grain size of polycrystalline materials from ultrasonic wave response // *Mechanics of Materials*. – 2025. – Vol. 207. – P. 105367. – DOI: 10.1016/j.mechmat.2025.105367.

20. Yusubov F. Wear studies on phenolic brake-pads using Taguchi technique // *Tribology in Industry*. – 2021. – Vol. 43. – P. 489–499. – DOI: 10.24874/ti.1024.12.20.03.

21. Kabnure B.B., Shinde V.D., Kolhapure R.R. Optimization to develop multiple response microstructure and hardness of ductile iron casting by using GRA // *Journal of the Institution of Engineers (India): Series D*. – 2018. – Vol. 99. – P. 235–243. – DOI: 10.1007/s40033-018-0161-8.

22. Evolution of shrinkage with carbon equivalent and inoculation in ductile cast irons / A. Regordosa, N. Llorca-Isern, J. Sertucha, J. Lacaze // Materials Science Forum. – 2018. – Vol. 925. – P. 28–35. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.925.28.
23. *Brown J.R.* Foseco ferrous foundryman's handbook. – 10th ed. – Butterworth-Heinemann, 2000.
24. *McDonald M., Gaines S., Diederichs M.* Interpreting ultrasonic pulse velocities and elastic properties of lac du bonnet granite under compression // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2023. – Vol. 1124. – P. 012035. – DOI: 10.1088/1755-1315/1124/1/012035.
25. *Muthmari S., Singh A.* Review of various ultrasonic techniques employed in modern industries // International Journal of Engineering Science and Technology. – 2011. – Vol. 3. – P. 3078–3085.
26. Ultrasonic calibration and certification of V1 and V2 type reference standard blocks for use in non-destructive testing / L.E. Maggi, C.E.R. Silva, A.V. Alvarenga, R.P.B. Costa-Felix // Journal of Physics Conference Series. – 2011. – Vol. 279 (1). – P. 012029. – DOI: 10.1088/1742-6596/279/1/012029.
27. *Pitkänen J., Sarkimo M., Lonne S.* Modeling of ultrasonic testing for inspection of nodular cast iron insert // 6th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components. – Budapest, Hungary, 2007. – URL: <https://www.ndt.net/search/docs.php?id=7016> (accessed: 09.04.2026).
28. *Lee S.-C., Suen J.-M.* Ultrasonic nondestructive evaluation of matrix structures and nodularity in cast irons // Metallurgical Transactions A. – 1989. – Vol. 20A. – P. 2399–2407. – DOI: 10.1007/BF02666675.
29. ASTM E8/E8M-16a: Standard test methods for tension testing of metallic materials. – ASTM International, 2020. – DOI: 10.1520/E0008_E0008M-16A.
30. ASTM E10-18: Standard test method for Brinell hardness of metallic materials. – ASTM International, 2023. – DOI: 10.1520/E0010-18.
31. *Mhamane D., Bewoor A.* A non-destructive approach to characterize nodularity in SG iron castings using ultrasonic testing // Journal of Mines, Metals and Fuels. – 2025. – Vol. 73 (11). – P. 3589–3598. – DOI: 10.18311/jmmf/2025/50001.
32. Process for predicting nodularity, material properties in SG iron castings using simulation and ultrasonic testing: Patent No. 202521031317 / Mhamane D.A., Bewoor A.K., Mhamane R.D., Bewoor L.A. – 2025.
33. *Montgomery D., Cahyono St.* Design and analysis of experiments. – 9th ed. – John Wiley & Sons, 2022.
34. *Gür C.H., Aydinmakina B.* Ultrasonic investigation of graphite nodularity in ductile cast irons // DGZfP Jahrestagungen 2001. ZfP in Anwendung, Entwicklung und Forschung, Berlin, 21–23 Mai, 2001. – URL: <https://www.ndt.net/article/dgzfp01/papers/p33/p33.htm> (accessed: 07.04.2026).
35. *Stefanescu D.M.* Science and engineering of casting solidification. – 2nd ed. – Springer, 2015. – DOI: 10.1007/978-3-319-15693-4.
36. *Campbell J.* Complete casting handbook. – 2nd ed. – Butterworth-Heinemann, 2015. – DOI: 10.1016/C2014-0-01548-1.
37. ASTM A247-19: Standard test method for evaluating the microstructure of graphite in iron castings. – ASTM International, 2024. – DOI: 10.1520/A0247-19. – URL: <https://store.astm.org/a0247-19.html> (accessed: 09.04.2026).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2026 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Ultrasonic non-destructive property prediction framework for spheroidal graphite iron castings

Digvijay Mhamane^{1, a, *}, Anand Bewoor^{2, b}

¹ Department of Mechanical Engineering, Zeal College of Engineering and Research, Narhe Pune, Savitribai Phule Pune University, Pune – 411041, Maharashtra, India

² Cummins College of Engineering for Women, Pune – 411052, Maharashtra, India

^a  <https://orcid.org/0000-0002-3277-0443>,  digvijay.ndt@gmail.com; ^b  <https://orcid.org/0000-0001-9329-3807>,  anand.bewoor@cumminscollege.in

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 22 February 2026

Revised: 27 February 2026

Accepted: 11 April 2026

Available online: 15 June 2026

Keywords:

Spheroidal graphite iron

Non-destructive testing

Ultrasonic velocity

Property prediction

ABSTRACT

Introduction. Spheroidal graphite (SG) iron is widely used in engineering structures due to its high mechanical properties, which are largely determined by the degree of spheroidization (nodularity) of the graphite inclusions. Conventional metallographic evaluation of nodularity provides high accuracy but is a destructive and time-consuming procedure. Therefore, there is a need for a reliable non-destructive approach for rapid quality assessment of castings, especially in small-batch foundry production. **The purpose of this work** is to develop a methodological framework for predicting nodularity and mechanical properties of SG iron castings based on ultrasonic testing. **Methods.** Castings of three SG iron grades (SGI 400/12, 500/7, and 600/3) were manufactured according to a Taguchi L27 experimental design. The controlled process parameters were: pouring temperature (1,380–1,420 °C), carbon equivalent (4.0–4.6), and section thickness (5–15 mm). Ultrasonic testing was performed using a flaw detector with a 4 MHz transducer to measure the longitudinal ultrasonic wave velocity in the samples. Nodularity was determined from the ultrasonic measurements using the instrument's internal calibration and the corresponding velocity relationship. Ultimate tensile strength (UTS, σ_u) and Brinell hardness were determined by standard mechanical testing methods. Multiple linear regression models were developed relating the process parameters and ultrasonic velocity to nodularity, UTS (σ_u), and hardness. **Results and Discussion.** The developed models demonstrated high predictive capability, with coefficients of determination of $R^2 = 0.8955$ for nodularity, $R^2 = 0.9954$ for UTS (σ_u), and $R^2 = 0.8135$ for hardness. Carbon equivalent was identified as the most significant parameter affecting all responses. Ultrasonic velocity showed a clear positive correlation with nodularity and mechanical properties. Validation using metallographic analysis confirmed good agreement with ultrasonic predictions, with deviations within 2–3%. The study demonstrates that ultrasonic velocity can be effectively used to predict the microstructural and mechanical characteristics of SG iron. The developed regression models provide a simple and practical tool for non-destructive evaluation, ensuring rapid quality control in foundry production, especially for small-scale enterprises.

For citation: Mhamane D., Bewoor A. Ultrasonic non-destructive property prediction framework for spheroidal graphite iron castings. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2026, vol. 28, no. 2, pp. 179–195. DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.2-179-195. (In Russian).

References

1. Sangame B.B., Reddy Y.P. Investigation on effect of different types of inoculants on the solidification of ductile cast iron using thermal analysis. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 2024, vol. 20 (6), pp. 995–1012. DOI: 10.1108/MMMS-03-2024-0084.
2. Benini L., de Paula P.P.R., Tavares S.S.M., de Sá Carnerio F., Noris L.F., da Conceição B.M., Júnior J.M.M. Evaluation of austempered ductile iron end milling by magnetic Barkhausen noise and x-ray diffraction methods.

* Corresponding author

Mhamane Digvijay, Research Scholar

Department of Mechanical Engineering,

Zeal College of Engineering and Research, Narhe Pune,

Savitribai Phule Pune University,

411041, Pune, Maharashtra, India

Tel.: 0230 242 1300, e-mail: digvijay.ndt@gmail.com

Journal of Materials Engineering and Performance, 2025, vol. 34, pp. 9026–9036. DOI: 10.1007/s11665-025-10794-6.

3. Mohan H.K.C., Devaraj S., Swamy K.S.N., Venkatesh B.K. Microstructure and tribological property correlations of die cast and spray formed Al-30 wt.% Si alloy. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 2022, vol. 70 (10A), pp. 307–313. DOI: 10.18311/jmmf/2022/32772.

4. Kadam S., Kabnure B., Mhamane D. Computer-aided simulation of railway insert for defect analysis and yield improvement. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*, 2021, vol. 102, pp. 651–656. DOI: 10.1007/s40032-021-00680-0.

5. Freitas V.L. de A., De Albuquerque V.H.C., Silva E. de M., Silva A.A., Tavares J.M.R.S. Nondestructive characterization of microstructures and determination of elastic properties in plain carbon steel using ultrasonic measurements. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, vol. 527 (16–17), pp. 4431–4437. DOI: 10.1016/j.msea.2010.03.090.

6. Nanekar P.P., Shah B.K. Characterization of material properties by ultrasonic. *BARC Newsletter*, 2003, no. 249, pp. 25–38.

7. Toozandehjani M., Matori K.A., Ostovan F., Mustapha F., Oskoueian A. On the correlation between microstructural evolution and ultrasonic properties: A review. *Journal of Materials Science*, 2015, vol. 50 (7), pp. 2643–2665. DOI: 10.1007/s10853-015-8855-x.

8. Kim S.A., Johnson W.L. Elastic constants and internal friction of martensitic steel, ferritic-pearlitic steel, and α -iron. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, vol. 452–453, pp. 633–639. DOI: 10.1016/j.msea.2006.11.147.

9. Kumar A., Jayakumar T., Raj B. Influence of precipitation of intermetallics on Young's modulus in nickel and zirconium base alloys. *Philosophical Magazine Letters*, 2006, vol. 86 (9), pp. 579–587. DOI: 10.1080/09500830600936401.

10. Lévesque D., Kruger S.E., Lamouche G., Kolarik R., Jeskey G., Choquet M., Monchalain J.-P. Thickness and grain size monitoring in seamless tube making process using laser ultrasonics. *NDT & E International*, 2006, vol. 39 (8), pp. 622–626. DOI: 10.1016/j.ndteint.2006.04.009.

11. Badidi Bouda A., Benchaala A., Alem K. Ultrasonic characterization of materials hardness. *Ultrasonics*, 2000, vol. 38 (1–8), pp. 224–227. DOI: 10.1016/S0041-624X(99)00081-5.

12. Aghaie-Khafri M., Honarvar F., Zanganeh S. Characterization of grain size and yield strength in AISI 301 stainless steel using ultrasonic attenuation measurements. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2012, vol. 31 (3), pp. 191–196. DOI: 10.1007/s10921-012-0134-z.

13. Vasudevan M., Palanichami P. Characterization of microstructural changes during annealing of cold worked austenitic stainless steel using ultrasonic velocity measurements and correlation with mechanical properties. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2002, vol. 11 (2), pp. 169–179. DOI: 10.1361/105994902770344231.

14. Jodhani J., Handa A., Gautam A., Rana R. Ultrasonic non-destructive evaluation of composites: A review. *Materials Today: Proceedings*, 2023, vol. 78, pp. 627–632. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.12.055.

15. Belan J., Tillová E., Uhříčik M., Pastierovičová L. Influence of structural parameters – the shape of graphite and matrix on change of ultrasonic wave propagation rate and value of attenuation in graphitic cast irons. *Production Engineering Archives*, 2023, vol. 29 (1), pp. 23–27. DOI: 10.30657/pea.2023.29.4.

16. Hütter S., Lafarge R., Simonin J., Mook G., Brosius A., Halle T. Determination of microstructure changes by eddy-current methods for cold and warm forming applications. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 2021, vol. 2, p. 100042. DOI: 10.1016/j.aime.2021.100042.

17. Hatate M., Nobuki T., Komatsu S. Accuracy improving methods in estimation of graphite nodularity of ductile cast iron by measurement of ultrasonic velocity. *Science and Technology of Casting Processes*. InTech, 2012. DOI: 10.5772/50596.

18. Agnoletto D., Lemos G.V., Beskow A.B., Lessa C.R., Reguly A. Methodology for determination of degree of nodularity in a ductile cast iron GGG 40 by ultrasonic velocity test. *Southern Brazilian Journal of Chemistry*, 2018, vol. 26, pp. 10–16. DOI: 10.37633/SBJC.26(26)2018.10-16.

19. Yadav A., Prajapati K.K., Mitra M. Deep learning-assisted prediction of mean grain size of polycrystalline materials from ultrasonic wave response. *Mechanics of Materials*, 2025, vol. 207, p. 105367. DOI: 10.1016/j.mechmat.2025.105367.

20. Yusubov F. Wear studies on phenolic brake-pads using Taguchi technique. *Tribology in Industry*, 2021, vol. 43, pp. 489–499. DOI: 10.24874/ti.1024.12.20.03.

21. Kabnure B.B., Shinde V.D., Kolhapure R.R. Optimization to develop multiple response microstructure and hardness of ductile iron casting by using GRA. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series D*, 2018, vol. 99, pp. 235–243. DOI: 10.1007/s40033-018-0161-8.

22. Regordosa A., Llorca-Isern N., Sertucha J., Lacaze J. Evolution of shrinkage with carbon equivalent and inoculation in ductile cast irons. *Materials Science Forum*, 2018, vol. 925, pp. 28–35. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.925.28.
23. Brown J.R. *Foseco ferrous foundryman's handbook*. 10th ed. Butterworth-Heinemann, 2000.
24. McDonald M., Gaines S., Diederichs M. Interpreting ultrasonic pulse velocities and elastic properties of lac du bonnet granite under compression. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2023, vol. 1124, p. 012035. DOI: 10.1088/1755-1315/1124/1/012035.
25. Muthmari S., Singh A. Review of various ultrasonic techniques employed in modern industries. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2011, vol. 3, pp. 3078–3085.
26. Maggi L.E., Silva C.E.R., Alvarenga A.V., Costa-Felix R.P.B. Ultrasonic calibration and certification of V1 and V2 type reference standard blocks for use in non-destructive testing. *Journal of Physics Conference Series*, 2011, vol. 279 (1), p. 012029. DOI: 10.1088/1742-6596/279/1/012029.
27. Pitkänen J., Sarkimo M., Lonne S. Modeling of ultrasonic testing for inspection of nodular cast iron insert. *6th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components*, Budapest, Hungary, 2007. Available at: <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=7016> (accessed 09.04.2026).
28. Lee S.-C., Suen J.-M. Ultrasonic nondestructive evaluation of matrix structures and nodularity in cast irons. *Metallurgical Transactions A*, 1989, vol. 20A, pp. 2399–2407. DOI: 10.1007/BF02666675.
29. ASTM E8/E8M-16a: *Standard test methods for tension testing of metallic materials*. ASTM International, 2020. DOI: 10.1520/E0008_E0008M-16A.
30. ASTM E10-18: *Standard test method for Brinell hardness of metallic materials*. ASTM International, 2023. DOI: 10.1520/E0010-18.
31. Mhamane D., Bewoor A. A non-destructive approach to characterize nodularity in SG iron castings using ultrasonic testing. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 2025, vol. 73 (11), pp. 3589–3598. DOI: 10.18311/jmmf/2025/50001.
32. Mhamane D.A., Bewoor A.K., Mhamane R.D., Bewoor L.A. *Process for predicting nodularity, material properties in SG iron castings using simulation and ultrasonic testing*. Patent No. 202521031317, 2025.
33. Montgomery D., Cahyono St. *Design and analysis of experiments*. 9th ed. John Wiley & Sons, 2022.
34. Gür C.H., Aydinmakina B. Ultrasonic investigation of graphite nodularity in ductile cast irons. *DGZfp Jahrestagungen 2001. Zfp in Anwendung, Entwicklung und Forschung*, Berlin, 21–23 Mai, 2001. Available at: <https://www.ndt.net/article/dgzfp01/papers/p33/p33.htm> (accessed 07.04.2026).
35. Stefanescu D.M. *Science and engineering of casting solidification*. 2nd ed. Springer, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-15693-4.
36. Campbell J. *Complete casting handbook*. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, 2015. DOI: 10.1016/C2014-0-01548-1.
37. ASTM A247-19: *Standard test method for evaluating the microstructure of graphite in iron castings*. ASTM International, 2024. DOI: 10.1520/A0247-19. Available at: <https://store.astm.org/a0247-19.html> (accessed 09.04.2026).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2026 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).