

Development of a methodology and means of non-destructive testing of physical and mechanical characteristics of cast irons to create grades with improved properties

N.K. Tursunov¹^a, A.P. Kren²^b, T.T. Urazbaev¹^c, U.T. Rakhimov¹^d,
M.R. Turakulov¹^e

¹Tashkent state transport university, Tashkent, Uzbekistan

²Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract: The article is devoted to the development of methods and means of non-destructive testing of physical and mechanical properties of cast irons in order to create new grades with improved characteristics. The choice of geometric parameters of indenters is considered, which provide high sensitivity to changes in characteristics in the volume of the material, and also allow achieving various levels of deformation and deformation rates during testing, which is necessary for analyzing the behavior of the material under dynamic loads. The results of the study will help to accurately determine the value of the plastic imprint necessary for an objective assessment of the physical and mechanical characteristics of cast iron.

Keywords: high-strength cast iron, hardness, induction crucible furnace, mechanical properties, indentation, impact, imprint

Разработка методики и средств неразрушающего контроля физико-механических характеристик чугунов для создания марок с улучшенными свойствами

Турсунов Н.К.¹^a, Крень А.П.²^b, Уразбаев Т.Т.¹^c, Рахимов У.Т.¹^d,
Туракулов М.Р.¹^e

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

²Институт прикладной физики НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

Аннотация: Статья посвящена разработке методики и средств неразрушающего контроля физико-механических свойств чугунов с целью создания новых марок с улучшенными характеристиками. Рассматривается выбор геометрических параметров инденторов, которые обеспечивают высокую чувствительность к изменениям характеристик в объеме материала, а также позволяют достигать различных уровней деформации и скоростей деформирования при испытаниях, что необходимо для анализа поведения материала при динамических нагрузках. Результаты исследования помогут точно определить величину пластического отпечатка, необходимую для объективной оценки физико-механических характеристик чугуна.


Ключевые слова: высокопрочное чугун, твердость, индукционная тигельная печь, механические свойства, индентирование, удар, отпечаток


1. Введение


Существует ряд особенностей деформирования чугуна, присущих только данному материалу. Так, в частности коэффициент Пуассона данного материала может изменяться по мере увеличения деформации. Кроме этого, имея одну и ту же твердость в рамках одной марки чугуна, он может обладать различным


модулем упругости. Также чугун может иметь одну и ту же прочность обладая при этом различной формой графитовых включений. В тоже время для таких чугунов будет существенно изменяться его относительное удлинение и предел текучести. Все это будет определенным образом влиять на кривую динамического микроударного деформирования. Чугун относится к структурно неоднородным материалам, вследствие наличия большого количества включений графита, который может принимать различные формы:

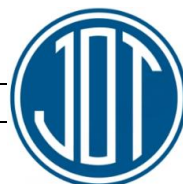
^a <https://orcid.org/0009-0008-7910-3980>

^b <https://orcid.org/0000-0001-9658-1003>

^c <https://orcid.org/0009-0006-1808-489X>

^d <https://orcid.org/0009-0001-9819-5314>

^e <https://orcid.org/0009-0008-7448-5916>



пластинчатую (серый чугун), шаровидную (высокопрочный), хлопьевидную (ковкий), различают также вермикулярную форму графита (рисунок 1).

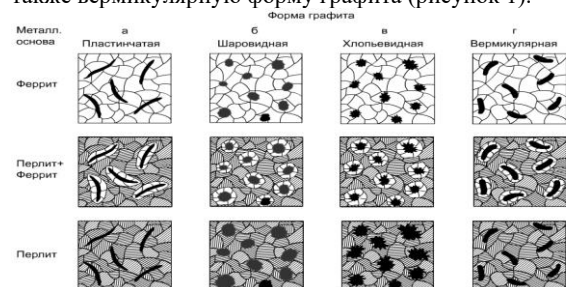


Рис. 1. Характерные структуры чугуна

Помимо различных форм графита, чугун может иметь разную структуру: ферритную, ферритно-перлитную или перлитную. Белый чугун характеризуется цементитной структурой. Согласно ГОСТ 3443 «Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры», размер включений графита может варьироваться от 15 до 1000 мкм. Стоит отметить, что крупные графитовые включения значительно ухудшают механические свойства, и контроль характеристик таких изделий обычно не проводится. Распределение графита в структуре чугуна может быть как равномерным, так и неравномерным, а также иметь колониальную, сетчатую или иную форму. Количество включений графита оценивается по средней площади на микрошлифе. Например, для пластинчатого графита плотность распределения может изменяться от 2 до 12%. На рисунках 2 и 3 показана микроструктура реальных образцов чугуна, с проведенной оценкой распределения и характерных размеров углеродных включений. Если задача разделения чугуна может быть решена ультразвуковыми методами, то установление механических характеристик - это проблема, требующая решения.

В настоящее время на предприятиях для измерения предела прочности, модуля упругости и относительного удлинения при разрыве в 100 % случаев применяются разрушающие методы контроля, такие как испытания на разрывных машинах. Этот процесс является длительным, неудобным и дорогостоящим, поскольку требует изготовления и тестирования специальных образцов-свидетелей, чьи свойства могут не полностью соответствовать характеристикам самого изделия. Кроме того, вырезка образцов из готового изделия делает его дальнейшее использование невозможным.

В рамках проекта предлагается внедрить метод динамического индентирования для контроля, при котором регистрируется весь процесс деформирования, продолжающийся всего несколько микросекунд. После обработки сигнала, который описывает внедрение жесткого индентора определенной формы в чугун, будут получены зависимости изменения контактного усилия, глубины и скорости внедрения. Это позволит использовать модели упругопластического деформирования и на их основе рассчитывать физико-механические характеристики чугуна.

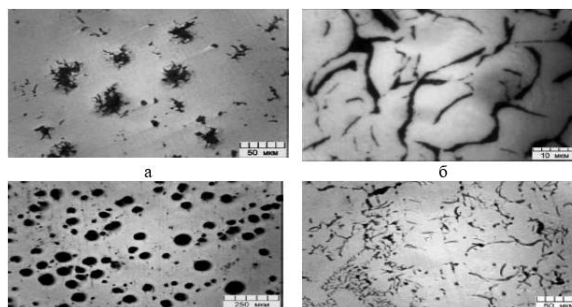


Рис. 2. Форма графита (темные включения) в серых чугунах: а – хлопьевидная, б – пластинчатая, в – шаровидная, г – вермикулярная

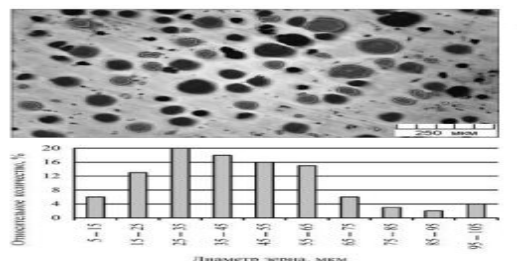


Рис. 3. Микроструктура чугуна с шаровидным графитом (а); распределение включений графита по размерам (б) по данным

2. Методология исследования

Результаты вычисления предударной скорости индентора, а также размеров отпечатка на материалах с твердостью, соответствующей верхней и нижней границам рассматриваемого диапазона, приведены в таблицах 1 и 2.

Данные таблиц 1 и 2 показывают, что для оценки физико-механических свойств чугуна подходят инденторы с диаметром как 1 мм, так и 2 мм. Для обоих вариантов диаметра индентора можно подобрать энергию удара, обеспечивающую достижение необходимого диаметра отпечатка d_{min} . Следует отметить, что для индентора с диаметром 1 мм требуемое значение $d = 450$ мкм на твердости 500 HBW обеспечивается при энергии удара 22 мДж. При этом на твердости 100 HBW при этой же энергии отношение d/D составляет 0,649. Это значение незначительно выходит за границы неравенства (1), однако такое превышение является приемлемым. Поэтому можно считать, что для индентора с диаметром 1 мм максимальный диаметр отпечатка на твердости 500 HBW составляет 450 мкм.

Использование индентора с диаметром 2 мм позволяет увеличить диаметр отпечатка на твердых материалах с 450 мкм до 500 мкм. Однако при этом на 40 % уменьшается глубина отпечатка (с 53,5 мкм до 31,8 мкм при твердости материала 500 HBW и с 119,6 мкм до 71 мкм при твердости материала 100 HBW). Поскольку уменьшение глубины отпечатка приведет к повышению влияния качества испытуемой поверхности на результаты измерений и, соответственно, увеличит трудоемкость подготовки изделия к контролю, использование индентора с диаметром 2 мм является нецелесообразным.

Таблица 1
Результаты вычислений для диаметра индентора 1 мм

Твердость материала HBW	Диаметр отпечатка d_i , мкм	d/D	Глубина отпечатка h_c , мкм	Энергия удара, мДж	Предварная скорость V_{max} , м/с
500	500	0,5	67,0	34,6	3,7
	450	0,45	53,5	22,0	3,0
	400	0,4	41,7	13,4	2,3
100	714	0,71	150,0	34,6	3,7
	649	0,65	119,6	22,0	3,0
	582	0,58	93,3	13,4	2,3

Таблица 2
Результаты вычислений для диаметра индентора 2 мм

Твердость материала HBW	Диаметр отпечатка d_i , мкм	d/D	Глубина отпечатка h_c , мкм	Энергия удара, мДж	Предварная скорость V_{max} , м/с
500	500	0,25	31,8	15,5	2,5
	450	0,225	25,6	10,1	2,0
	400	0,2	20,2	6,3	1,6
100	740	0,37	71,0	15,5	2,5
	667	0,33	57,3	10,1	2,0
	594	0,3	45,2	6,3	1,6

В то же время значительный интерес представляет применение инденторов, имеющих диаметр в диапазоне от 1 до 2 мм. Такую возможность в отличие от статических твердомеров предоставляют портативные приборы, реализующие метод динамического индентирования: не привязываясь к стандартным диаметрам, можно изготовить индентор с любыми размерами. Вычисление предварительной скорости индентора, а также размеров отпечатка для девяти вариантов диаметра индентора (1,1; 1,2; ... 1,9 мм) показало, что оптимальным является использование индентора с диаметром 1,2 мм и предварительной скоростью 3 м/с. Результаты соответствующих вычислений приведены в таблице 3.

Таблица 3
Результаты вычислений для диаметра индентора 1,2 мм

Твердость материала HBW	Диаметр отпечатка d_i , мкм	d/D	Глубина отпечатка h_c , мкм	Энергия удара, мДж	Предварная скорость V_{max} , м/с
500	480	0,4	50,1	23,2	3,0
100	698	0,58	112,0		

Сравнивая таблицы 1 и 3, можно сделать следующие выводы. Увеличение диаметра индентора с 1 мм до 1,2 мм позволяет при одном и том же значении предварительной скорости увеличить диаметр отпечатка на твердых материалах с 450 мкм до 480 мкм. При этом отношение d/D не выходит за границы неравенства (1), а глубина отпечатка уменьшается всего на 6 % (с 53,5 мкм до 50,1 мкм при твердости материала 500 HBW и с 119,6 мкм до 112 мкм при твердости материала 100 HBW).

Таким образом, в результате проведенного анализа установлено, что для оценки физико-механических характеристик чугуна методом динамического индентирования оптимальными являются следующие параметры индентора: масса – 5 г, диаметр – 1,2 мм, предварительная скорость – 3 м/с.

Данная методика не требует изготовления специальных образцов для испытаний, как это необходимо при использовании разрывных машин. С учетом того, что современные технологии производства чугуна не всегда гарантируют необходимые характеристики, предложенный метод имеет важное практическое значение для сортировки чугуна. Практика показывает, что отдельные чугунные изделия (например, блоки цилиндров двигателей) могут

содержать серый чугун в одной части, а высокопрочный — в другой. Кроме того, в изделии могут присутствовать участки с белым чугуном, обработка которых может приводить к поломке режущего инструмента.

Поэтому очень важно перед проведением механической обработки чугуна предварительно оценить его качество. Предполагаемый вид создаваемого прибора показан в рисунке 4.



Рис. 4. Измеритель физико-механических характеристик чугуна ИФМХ-Ч

Прибор ИФМХ-Ч предназначен для неразрушающего контроля физико-механических характеристик чугуна различных марок. Прибор состоит из двух частей: датчика и дополнительного электронного блока.

Основные характеристики прибора ИФМХ-Ч:

- определение марки чугуна СЧ10-СЧ35, ВЧ35-ВЧ70
- измерение твердости по Бринеллю от 90 до 450 HB;
- измерение предела прочности от 100 до 900 МПа;
- измерение модуля упругости от 40 до 220 ГПа;
- время одного измерения не более 3 с.

Требования к контролируемым изделиям:

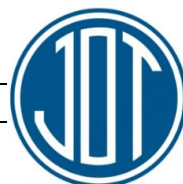
- шероховатость контролируемой поверхности не более 2,5 Ra;
- масса изделия не менее 2,0 кг;
- толщина стенки изделия не менее 5 мм.

Измеритель физико-механических характеристик чугуна позволяют проводить оперативную оценку качества чугуна без необходимости разрушения образцов. На рисунке 3 представлена информация о чугуне марки СЧ30, который имеет твердость 207 HB, модуль упругости 136 ГПа и предел прочности 308 МПа.

3. Заключение

1. В результате проведенного анализа установлено, что для оценки физико-механических характеристик чугуна методом динамического индентирования оптимальными являются следующие параметры индентора: масса – 5 г, диаметр – 1,2 мм, предварительная скорость – 3 м/с.

2. Измеритель физико-механических характеристик чугуна позволяют проводить оперативную оценку качества чугуна без необходимости разрушения образцов. Измерения показывает марки чугуна СЧ30, который имеет твердость 207 HB, модуль упругости 136 ГПа и предел прочности 308 МПа.



Использованная литература / References

[1] Турсунов, Н.К.; Алимухамедов, Ш.П.; Тоиров, О.Т. Разработка эффективной технологии получения синтетического чугуна в индукционной тигельной печи. Universum: технические науки: электрон. научн. журн. - 2022. 6(99), июнь, 2022 г.

[2] Kren, A.P. Determination of the Strain-Hardening Exponent of a Metallic Material by Low-Speed Impact Indentation / A.P. Kren, V. A. Rudnitskii // Russian Metallurgy (Metally). – 2019. – №. 4. – P. 478–483. DOI: 10.1134/S0036029519040220.

[3] Murot Turakulov, Nodirjon Tursunov and Salokhiddin Yunusov, "Steeling of synthetic cast iron in induction crucible furnace taking into account consumption rate of carburizers", E3S Web of Conferences 401, 05012 (2023).

[4] Murot Turakulov, Nodirjon Tursunov and Salokhiddin Yunusov, "New concept of cast iron melting technology in induction crucible furnace", E3S Web of Conferences 401, 01060 (2023).

[5] Murot Turakulov, Nodirjon Tursunov and Shavkat Alimukhamedov, "Development of technology for manufacturing molding and core mixtures for obtaining synthetic cast iron", E3S Web of Conferences 365, 05009 (2023).

Информация об авторах/ Information about the authors

Турсунов
Нодиржон
Каюмжонович /
Tursunov
Ташкентский государственный
транспортный университет,
д.т.н., профессор кафедры
«Материаловедение и
машиностроение»
E-mail: u_nadir@mail.ru

Nodirjon Qayumjonovich	Тел.: +998990012371 https://orcid.org/0009-0008-7910-3980
Крень Александр Петрович / Kren Aleksandr Petrovich	"Belarus FA Amaliy fizika instituti", Kontakt-dinamik nazorat usullari laboratoriyasi mudiri, t.f.d. professor E-mail: alekspk@mail.ru Tel.: +375 29 762 3300 https://orcid.org/0000-0001-9658-1003
Уразбаев Талгат Тилеубаевич / Urazbayev Talgat Tileubayevich	Toshkent davlat transport universiteti "Materialshunoslik va mashinasozlik" kafedrasida dotsenti v.b, PhD E-mail: talgat_1988.26@mail.ru Tel.: +998974301088 https://orcid.org/0009-0006-1808-489X
Рахимов Учкин Тошнӣз угли / Rahimov Uchqun Toshniyoz o'g'li	Toshkent davlat transport universiteti "Materialshunoslik va mashinasozlik" kafedrasida PhD doktoranti E-mail: uchqun.raximov.1991@mail.ru Tel.: +998939955691 https://orcid.org/0009-0001-9819-5314
Туракулов Мурот Рустамович / To'raqulov Murot Rustamovich	Toshkent davlat transport universiteti "Materialshunoslik va mashinasozlik" kafedrasida kata o'qituvchisi E-mail: m.r.turakulov1982@gmail.com Tel.: +998903567879 https://orcid.org/0009-0008-7448-5916

