



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-3-65-69>
УДК 620.179

Поступила 29.05.2019
Received 29.05.2019

КОНТРОЛЬ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧУГУНА ПРИБОРОМ ИФМХ-Ч

А. П. КРЕНЬ, В. А. РУДНИЦКИЙ, Г. А. ЛАНЦМАН, ГНУ Институт прикладной физики НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 16. E-mail: alekspk@mail.ru, М. Н. ДЕЛЕНДИК, Филиал Белорусского национального технического университета «Межотраслевой институт повышения квалификации и переподготовки кадров по менеджменту и развитию персонала», г. Минск, Беларусь. E-mail: delendik@mipk.by, Н. В. ЗИНЬКЕВИЧ, Е. В. ГНУТЕНКО, ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 16. E-mail: nickola.anelka@gmail.com

Рассмотрена возможность использования метода микроударного индентирования для оценки физико-механических характеристик чугуна с использованием прибора ИФМХ-Ч, разработанного в ИПФ НАН Беларуси. Установлено, что метод и прибор позволяют контролировать такие параметры, как твердость по Бринеллю в диапазоне 100–500 НВ, модуль упругости от 40 до 200 МПа, а также определять предел прочности и марку чугуна от СЧ10 до СЧ35 для серого чугуна и от ВЧ35 до ВЧ70 для высокопрочного. Показана возможность использования прибора для оперативного неразрушающего контроля непосредственно деталей и изделий в условиях производства.

Ключевые слова. Чугун, индентирование, твердость, модуль упругости, предел прочности, неразрушающий контроль.
Для цитирования. Крень, А. П. Контроль физико-механических характеристик чугуна прибором ИФМХ-Ч / А. П. Крень, В. А. Рудницкий, Г. А. Ланцман, М. Н. Делендик, Н. В. Зинькевич, Е. В. Гнутенко // *Литье и металлургия*. 2019. № 3. С. 65–69. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-3-65-69>.

TESTING OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CAST IRON WITH THE HELP OF IFMH-C DEVICE

A. P. KREN, V. A. RUDNITSKY, G. A. LANTSMAN, Institute of applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, 16, Akademicheskaya str., E-mail: alekspk@mail.ru, M. N. DELENDIK, Branch of the Belarusian National Technical University «Intersectoral Institute for Staff Training and Retraining on Management and Personnel Development», Minsk, Belarus. E-mail: delendik@mipk.by, N. V. ZINKEVICH, E. V. HNUITSENKA, Institute of applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, 16, Akademicheskaya str. E-mail: nickola.anelka@gmail.com

The possibility of the application of impact microindentation method for testing the physic and mechanical properties of cast iron using the IFMH-C instrument developed at the Institute of applied physics of the National Academy of Sciences of Belarus was tested. It was established that the method and the instrument allow to estimate such parameters as Brinell hardness in the range of 100–500 HB, elastic modulus from 40 to 200 MPa, as well as to determine the tensile strength of the flake and spheroidal graphite cast irons. The possibility of using the instrument for non-destructive test directly of parts and products in the manufacturing environments is shown.

Keywords. Cast iron, indentation, hardness, elastic module, ultimate strength, non-destructive test.
For citation. Kren A. P., Rudnitsky V. A., Lantsman G. A., Delendik M. N., Zinkevich N. V., Hnuitzenka E. V. Testing of the physical and mechanical properties of cast iron with the help of IFMH-C device. *Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 3, pp. 65–69. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-3-65-69>.

Чугунное литье широко применяется на отечественных и зарубежных промышленных предприятиях. Чугун является одним из основных конструкционных материалов и используется во всех отраслях промышленности: автомобилестроении (для изготовления блоков цилиндров и коленчатых валов), железнодорожном транспорте (тормозные колодки), станкостроении (станины), нефтяной промышленно-

сти (трубы). Благодаря наличию графитовых включений чугуны хорошо гасят вибрацию, могут применяться при низких температурах. В то же время при изготовлении различных изделий возникают сложности с их контролем, поскольку часто необходимо не только определить структуру сформировавшегося чугуна (как правило, разделить серый (СЧ) и высокопрочный (ВЧ)), но и четко установить физико-механические характеристики: предел прочности σ_b , твердость по Бринеллю НВ, модуль упругости E_y , а в оптимальном случае установить марку чугуна.

Механические характеристики чугуна регламентируются соответствующими стандартами. Для СЧ – это ГОСТ 1412-85 «Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки», для ВЧ – ГОСТ 7293-85 «Чугун с шаровидным графитом для отливок. Марки». Согласно данным стандартам марка определяется в первую очередь значением предела прочности при растяжении. Кроме того, для высокопрочного чугуна для каждой марки регламентируется значение условного предела текучести, твердости и относительного удлинения. Для серого чугуна лишь для справки приводятся значения модуля упругости и твердости.

В настоящее время в 100% случаев для определения σ на предприятиях используют разрушающие методы контроля – с помощью разрывных машин. Это долго, неудобно и дорогостояще: необходимо изготовить и испытать специальные образцы-свидетели, свойства которых не всегда совпадают со свойствами непосредственно изделия. При этом вырезка образцов из изделия ведет к невозможности его дальнейшей эксплуатации. Более оперативным контролем является измерение твердости по Бринеллю НВ, значение которой определяется в основном свойствами металлической основы. Однако если использовать стационарные твердомеры, то контроль непосредственно крупногабаритных изделий не всегда возможен. В то же время применение портативных динамических твердомеров является, по нашему мнению, неоправданным, поскольку может приводить к большим погрешностям измерений. Эти погрешности будут вызваны влиянием на процесс удара модуля упругости [1], что не учитывается в используемых в данных приборах градуировках.

Важной характеристикой чугуна является и модуль упругости E_y . Известно [2], что E_y чугуна практически не зависит от структуры металлической основы в отличие от твердости и определяется в основном графитной составляющей. При этом для ВЧ он находится в диапазоне 130–180 ГПа, а для СЧ – в пределах 50–130 ГПа, изменяясь даже в пределах одной марки на 20–50% (чем выше предел прочности, тем меньше это изменение).

Также важной для контроля является установленная и многократно проверенная связь между прочностью, модулем упругости и твердостью [2]:

$$\sigma = kE_y \text{НВ}, \quad (1)$$

где k – коэффициент, зависящий от вида чугуна: для серого $k \approx 1,15$, для высокопрочного $k \approx 1,62$.

Таким образом, можно утверждать, что для подтверждения качества полученного чугуна с точки зрения его соответствия требуемым физико-механическим показателям необходимо определить любые две из входящих в формулу (1) величины, а третью получить расчетом с учетом того, что модули упругости серого и высокопрочного чугуна лежат в разных диапазонах.

Разделение чугунов на серый и высокопрочный уже успешно производится с помощью ультразвуковых приборов, регистрирующих скорость ультразвуковой волны в материале, которая связана с модулем упругости посредством известных формул [3, 4]. Преимущество метода в том, что не требуется подготовка поверхности. В то же время он пока не позволяет с достаточной точностью определить твердость и предел прочности широкого круга чугунов, а значит, и их марку.

В настоящей работе была изучена возможность применения для этих целей метода динамического индентирования (МДИ) [5] и прибора ИФМХ-Ч (рис. 1), реализующего данный метод. Прибор был разработан в ИПФ НАН Беларуси и представляет собой датчик-твердомер, позволяющий контролировать твердость сталей по шкалам НВ, НРС и HV, и электронный блок, который обрабатывает дополнительную информацию для установления физико-механических характеристик чугуна. При этом датчик-твердомер внесен в Госреестр средств измерений как твердомер ТПЦ-7 под номером РБ 03 03 6414 17.

Сущность МДИ, разработанного в ИПФ НАН Беларуси, заключается в нанесении однократного микроудара с фиксированной предупредительной энергией, определяющейся массой индентора m и предупредительной скоростью V_{II} . Отличительной особенностью метода является регистрация всего процесса нагружения (рис. 2) в виде диаграмм «контактное усилие P – перемещение h », а также зависимостей $P = f(t)$, $h = f(t)$, $V = f(t)$ в широком диапазоне изменения сил и перемещений [6].



Рис. 1. Внешний вид прибора для контроля характеристик чугуна: 1 – датчик-твердомер ТПЦ-7; 2 – электронный блок; 3 – образец

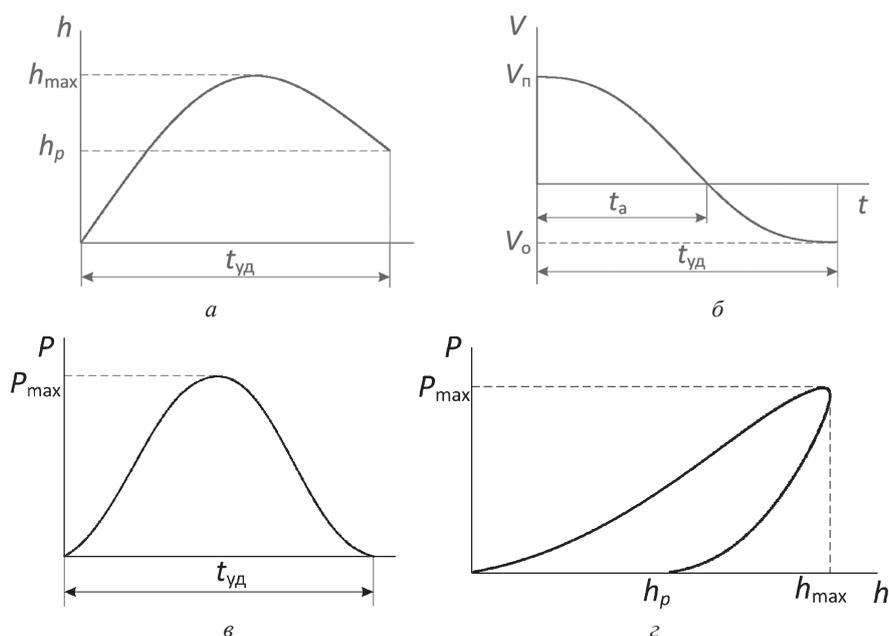


Рис. 2. Характерные зависимости ударного процесса: а, б, в – зависимости глубины внедрения индентора, скорости и контактного усилия от времени; з – диаграмма динамического индентирования

Регистрация параметров h_p , h_{max} , P_{max} , t_a , $t_{уд}$, V_0 , V_n и др. (рис. 2), позволяет использовать положения разработанного ИПФ НАН Беларуси Государственного стандарта СТБ 2495-2017 «Контроль неразрушающий. Определение физико-механических характеристик конструкционных материалов методами индентирования» для расчета модуля упругости материала E_y , а также точных значений твердости НВ по данным ударного контакта.

Это в корне отличает метод и оборудование от существующих обычных динамических твердомеров, которые регистрируют только отношение скорости отскока индентора V_0 к скорости подлета V_n . Это отношение носит название твердости по Либу HL [7] и зависит как от твердости материала, так и его модуля упругости. Если для сталей модуль упругости изменяется в узком диапазоне 190–210 ГПа, то это изменение можно не учитывать. Для чугунов, как было сказано ранее, E_y изменяется в широком диапазоне, поэтому даже когда в обычном твердомере присутствуют градуировки для чугуна, то это не является корректным и может привести к значительным погрешностям.

В качестве доказательства приведем результаты собственных исследований. На рис. 3, а показаны данные измерений НВ с помощью динамического твердомера, проградуированного исходя из значений твердости, полученных на стационарном твердомере Бринелля, и твердости по Либу на серых и высокопрочных чугунах. Градуировку проводили на образцах в виде параллелепипедов толщиной 15–35 мм и площадью 70–100 см² с измерением вначале HL, а затем в этой же точке НВ на твердомере Бринелля. Точки, по которым проводили градуировку, показаны на рис. 3, а отдельно. В дальнейшем эту градуировку использовали для контроля более широкого круга образцов, а также реальных изделий (остальные точки на графике). Всего было испытано более 200 образцов. Как видно из рис. 3, а, погрешность измерения НВ при использовании такой градуировки (что и делается большинством производителей) может

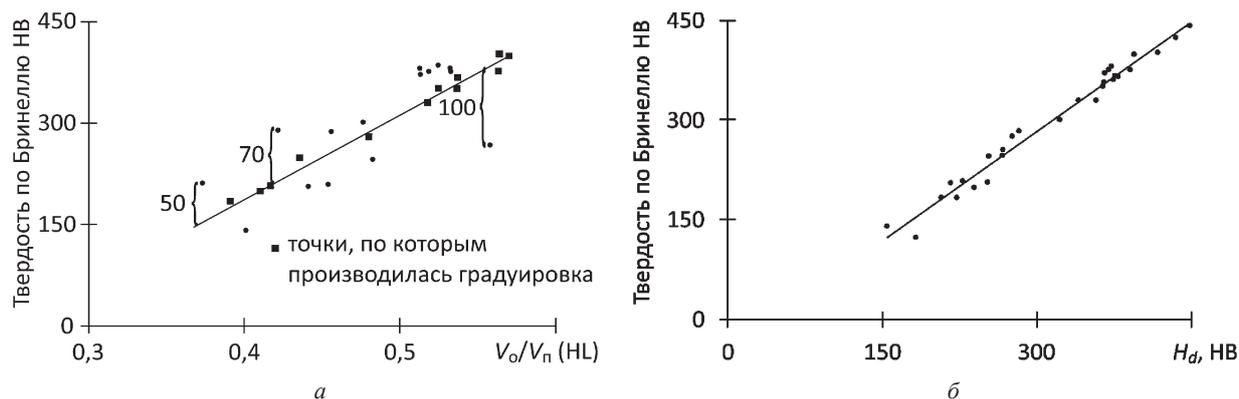


Рис. 3. Данные измерения твердости по Бринеллю: *а* – градуировка по значениям твердости по Либу; *б* – измерения с помощью прибора ИФМХ-Ч

достигать до 100 ед., что недопустимо для оценки качества. На рис. 3, *б* для сравнения приведены результаты испытаний тех же чугунов, но уже с помощью прибора ИФМХ-Ч, который учитывает влияние модуля упругости на значение динамической твердости при переводе ее в единицы НВ. В данном случае погрешность не превышает 10–15 ед., что является хорошим результатом даже при измерении твердости сталей после градуировки по меркам твердости 2-го разряда.

В таблице приведены результаты измерений физико-механических характеристик прибором ИФМХ-Ч в сравнении с полученными на стандартном оборудовании.

Таблица

Номер образца	σ , МПа (по данным производителя)	E_y , ГПа (ИФМХ-Ч)	Твердость, НВ		σ , МПа (ИФМХ-Ч)	Марка чугуна (ИФМХ-Ч)
			твёрдомер Бринелля	ИФМХ-Ч		
1	108	92	141	152	131	СЧ10
2	160	110	142	142	165	СЧ15
3	211	113	171	177	229	СЧ21
4	253	115	219	228	272	СЧ25
5	320	135	214	214	319	СЧ30
6	350	137	233	233	354	СЧ35
7	357	172	185	187	357	ВЧ35
8	430	172	198	208	422	ВЧ40
9	460	175	206	214	451	ВЧ45
10		180	350	359	674	ВЧ60
11		177	356	366	780	ВЧ70
12		123	441	421	576	Отбел
13		163	423	430	802	Отбел
14		163	375	382	716	Отбел
15		181	401	407	797	Отбел

Данные испытаний прибора (см. таблицу) говорят о возможности не просто измерить с достаточной точностью основные физико-механические характеристики и не просто разграничить чугун по виду (СЧ или ВЧ), но и установить марку чугуна, а также выделить образцы, на поверхности которых образовался «отбеленный» слой. Следует отметить, что коэффициент пропорциональности между произведением $E_y \cdot НВ$ и σ_B для всех чугунов составляет примерно 1,08 в отличие от указанных в формуле (1) значений. В данном случае необходимо учитывать, что модуль упругости, определенный по МДИ, может несколько отличаться от статического модуля, однако в данном случае это не играет какой-либо роли.

Из таблицы видно, что для проведенных испытаний погрешность измерения НВ не превысила 15 ед., а предела прочности (для образцов, по которым имелись сведения) составила не более 5%.

Таким образом, прибор ИФМХ-Ч успешно зарекомендовал себя при контроле физико-механических характеристик чугуна. Он позволяет достоверно измерить твердость в диапазоне 90–450 НВ, модуль упругости в диапазоне 70–220 ГПа, предел прочности в диапазоне 100–900 МПа. Датчик и электронный блок прибора связаны между собой беспроводной связью, что дает возможность проводить дистанционный контроль. При промышленном применении контроль может осуществляться в отдельных важных точках изделия. Также прибор может помочь значительно сократить объем разрушающих испытаний на производстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Maki S.** Computer Simulation of Micro Rebound Hardness Test / S. Maki, T. Yamamoto // *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 81. P. 1396–1401.
2. **Шерман А. Д.** Чугун: Справ. /А. Д. Шерман. М.: Metallurgiya, 1991. 576 с.
3. **Orłowicz W.** Evaluation of ductile iron casting material quality using ultrasonic testing / W. Orłowicz, M. Tupaj, M. Mróz, E. Guzik // *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. Vol. 210, No 11. P. 1493–1500.
4. **Майоров А. Л.** Результаты использования индикаторов структуры высокопрочного чугуна типа ИЧ в условиях производства / А. Л. Майоров, А. Р. Баев, Г. Е. Коновалов, Н. Н. Гиль // *Литье и металлургия*. 2006. № 2. Ч. 1. С. 102–105.
5. **Рудницкий В. А.** Оценка пластичности металлических материалов методом динамического индентирования / В. А. Рудницкий, А. П. Крень, Г. А. Ланцман // *Литье и металлургия*. 2017. № 2. С. 81–87.
6. **Abetkovskaia S. O.** Evaluation of viscoelastic properties of materials by nanoindentation. / S. O. Abetkovskaia, S. A. Chizhik, V. A. Rudnitsky, A. P. Kren // *Journal of Friction and Wear*. 2010. Vol. 31. No 3. P. 180–183.
7. **Leeb D.** Dynamic hardness testing of metallic materials / D. Leeb // *NDT International*. 1979. Vol. 12, No 6. P. 274–278.

REFERENCES

1. **Maki S., Yamamoto T.** Computer Simulation of Micro Rebound Hardness Test // *Procedia Engineering*, 2014, vol. 81, pp. 1396–1401.
2. **Sherman A. D.** *Chugun: Spravochnik* [Cast iron: Handbook]. Moscow, Metallurgija Publ, 1991. 576 p.
3. **Orłowicz W., Tupaj M., Mróz M., Guzik E.** Evaluation of ductile iron casting material quality using ultrasonic testing. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, vol. 210, no 11, pp. 1493–1500.
4. **Majorov A. L., Bajev A. R., Kononov G. E., Gil N. N.** The results of using of indicators of the high-test cast iron of type ICH structure in conditions of production. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2006, no. 2, vol. 1, pp. 102–105 (in Russian).
5. **Rudnitsky V. A., Kren A. P., Lantsman G. A.** Evaluation of metallic materials plasticity by dynamic indentation method. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2017, no. 2, pp. 81–87 (in Russian).
6. **Abetkovskaia S. O., Chizhik S. A., Rudnitsky V. A., Kren A. P.** Evaluation of viscoelastic properties of materials by nanoindentation. *Journal of Friction and Wear*, 2010, vol. 31, no. 3, pp. 180–183.
7. **Leeb D.** Dynamic hardness testing of metallic materials. *NDT International*, 1979, vol. 12, no. 6, pp. 274–278.