

УДК 620.179

*А. П. КРЕНЬ*¹, д-р техн. наук, проф.

*О. В. МАЦУЛЕВИЧ*¹, канд. техн. наук

*Т. А. ПРОТАСЕНЯ*¹, канд. техн. наук

*Н. К. ТУРСУНОВ*², канд. техн. наук, доц.

*Т. Т. УРАЗБАЕВ*²

*А. В. НИКИФОРОВ*³

*М. Н. ДЕЛЕНДИК*⁴, канд. техн. наук, доц.

¹Институт прикладной физики НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

²Ташкентский государственный транспортный университет (Ташкент, Узбекистан)

³Белорусский государственный университет (Минск, Беларусь)

⁴Ф-л «Межотраслевой институт повышения квалификации и переподготовки кадров по менеджменту и развитию персонала» Белорусского национального технического университета (Минск, Беларусь)

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИНДЕНТОРА И ЭНЕРГИИ МИКРОУДАРНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ДОСТАТОЧНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ТОЧНОСТИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТВЕРДОСТИ ЧУГУНА

Аннотация

Рассмотрены вопросы выбора оптимальных параметров динамического индентирования для контроля твердости чугуна. Показано, что при ударном микроиндентировании для получения повторяемых и воспроизводимых результатов измерений необходимо создать пластический отпечаток диаметром не менее 450 мкм и достичь состояния полной пластичности материала под индентором, необходимого для измерения твердости. Установлено, что оптимальными являются следующие параметры индентора: масса – 5 г, диаметр – 1 мм, предударная скорость – 3 м/с.

Ключевые слова:

твердость, чугун, индентирование, удар, отпечаток.

Измерение физико-механических характеристик чугуна неразрушающими методами контроля представляет собой сложную задачу вследствие его структурной неоднородности, вызванной наличием большого количества включений графита различной формы: пластинчатой (серый чугун), шаровидной (высокопрочный), хлопьевидной (ковкий), вермикулярной. Кроме того, чугун может иметь разную основу: ферритную, ферритно-перлитную, перлитную, цементитную. Включения графита согласно ГОСТ 3443 «Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры» могут иметь размеры от 15 до 1000 мкм. При этом нужно отметить, что крупные включения графита резко понижают механические свойства, и контроль характеристик для изделий из таких чугунов, как правило, не проводится.

Для ответственных изделий основным методом экспресс-контроля остается измерение твердости. Однако применение стационарных твердомеров не

всегда возможно, а портативные приборы ударного принципа действия часто дают большой разброс показаний. При этом они должны градуироваться под каждый вид чугуна, поскольку разные чугуны могут иметь резко отличающийся модуль упругости. Это необходимое условие производители приборов часто не указывают, вводя в заблуждение потребителей.

Устранить разброс показаний, вызванный структурной неоднородностью, можно за счет создания большей деформации, увеличивая размеры индентора и величину предупредительной энергии. Создание большой деформации потребует увеличения размеров ударника твердомера, появятся сложности с его взводом, станет невозможным контроль деталей малой массы и размеров вследствие возникновения сильных вибраций при ударном контакте.

Количество включений графита обычно оценивается средним процентом площади, занятой на микрошлифе. Например, для пластинчатого графита плотность распределения обычно изменяется от 2 % до 12%. В работе [1] была исследована микроструктура реальных образцов чугуна и выполнена оценка распределения характерных размеров различных углеродных включений. Используя эти результаты, можно утверждать, что для оценки физико-механических характеристик чугуна методом индентирования минимальный достаточный линейный размер области деформирования должен составлять порядка 450 мкм. При этом, чтобы объективно охарактеризовать материал необходимо выполнить еще одно условие: он должен находиться в состоянии полной пластичности. Для сферического индентора, схема внедрения которого показана на рис. 1, это означает, что деформация ε_r должна находиться в диапазоне $0,04 < \varepsilon_r < 0,12$ [2].

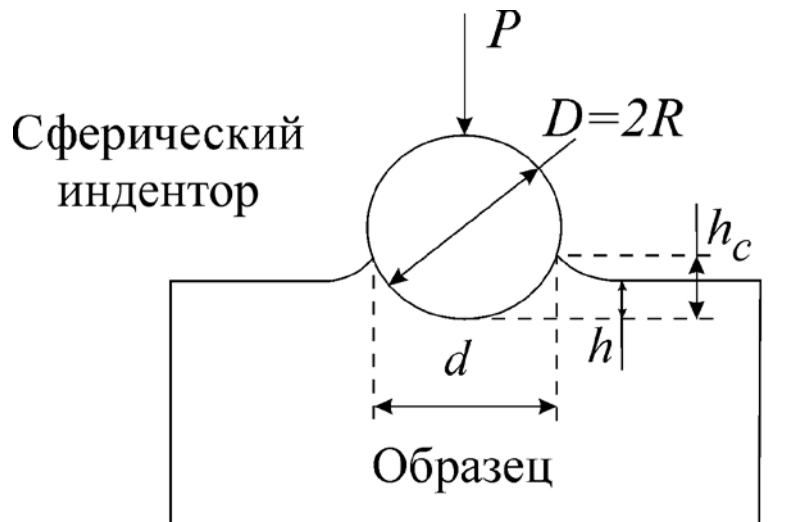


Рис. 1. Схема внедрения сферического индентора

Тэйбором [3] было показано, что при деформировании материала сферическим индентором величина эквивалентной деформации $\varepsilon_r = 0,2 \frac{d}{D}$, тогда диаметр отпечатка во всем диапазоне твердостей испытываемых чугунов должен составлять:

$$0,2D < d < 0,6D. \quad (1)$$

Выбор оптимальных параметров индентора и энергии удара для испытания чугунов с предполагаемой твердостью от 100 до 500 HBW заключается в подборе диаметра сферического индентора D и предударной скорости индентора V_{\max} , при достижении которой диаметр отпечатка d будет соответствовать минимальному достаточному размеру области деформирования (обозначим этот диаметр отпечатка как d_{\min}).

Величину предударной скорости индентора V_{\max} , необходимую для создания d_{\min} , можно определить из закона сохранения энергии, приравняв кинетическую энергию падающего индентора W_k и энергию деформирования материала индентором W_d . Кинетическую энергию индентора массой m рассчитаем по формуле

$$W_k = \frac{1}{2} m V_{\max}^2. \quad (2)$$

Энергию деформирования материала при индентировании определим путем интегрирования зависимости контактного усилия от глубины отпечатка h_c (рис. 1), которую можно в первом приближении принять линейной (рис. 2):

$$W_d = \int_0^{h_c} P dh = \frac{1}{2} P_{\max} h_c, \quad (3)$$

где P_{\max} – максимальное контактное усилие.

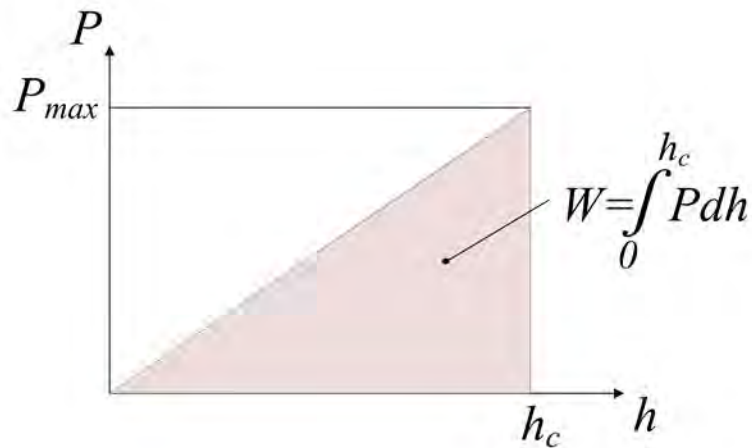


Рис. 2. Зависимость контактного усилия от глубины отпечатка

Решая совместно (2) и (3), получим:

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{P_{\max} h_c}{m}}. \quad (4)$$

Глубину отпечатка h_c можно определить через его диаметр d из уравнения, полученного исходя из схемы отпечатка (рис. 1), которое приведено в СТБ ISO 6506–1–2022:

$$h_c = \frac{D}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}} \right). \quad (5)$$

СТБ ISO 6506–1 устанавливает соотношение между твердостью испытуемого материала HBW, приложенным (контактным) усилием P и диаметром отпечатка d :

$$HBW = 0,102 \frac{2P}{\pi D^2 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}} \right)}. \quad (6)$$

Решив это уравнение относительно контактного усилия, получим значение максимального контактного усилия P , при котором диаметр отпечатка d на материалах с различной твердостью достигнет требуемой величины (d_{\min})

$$P_{\max} = \frac{HBW \cdot \pi D^2 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}} \right)}{0,102 \cdot 2}. \quad (7)$$

Как известно, с увеличением твердости испытуемого материала размер отпечатка на его поверхности уменьшается (при одной и той же энергии удара). Поэтому, в первую очередь, нужно на основании полученных уравнений определить энергию удара и предударную скорость, необходимую для создания d_{\min} на изделиях с твердостью, соответствующей верхней границе рассматриваемого диапазона (500 HBW). Затем на основании полученной для этой твердости энергии удара нужно рассчитать фактический диаметр отпечатка d на материале с твердостью, соответствующей нижней границе рассматриваемого диапазона (100 HBW) и проверить, чтобы этот диаметр соответствовал неравенству (1).

Очевидно, что для реализации в портативных приборах контроля предпочтительным является использование инденторов с наименьшими размерами из номенклатуры, предлагаемой в соответствующих ТНПА на измерение твердости (ГОСТ 9012, СТБ ISO 6506–1). Поэтому расчет и выбор предударной скорости индентора будем проводить для диаметров индентора 1 и 2 мм. Значение массы индентора примем равным 5 г, что соответствует массе инденторов, применяемых в большинстве портативных динамических твердомеров. Результаты вычисления предударной скорости индентора, а также размеров отпечатка на материалах с твердостью, соответствующей верхней и нижней границам рассматриваемого диапазона, приведены в табл. 1, 2.

Табл. 1. Результаты вычислений для диаметра индентора 1 мм

Твердость материала HBW	Диаметр отпечатка d , мкм	d/D	Глубина отпечатка h_c , мкм	Энергия удара, мДж	Предударная 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

Табл. 2. Результаты вычислений для диаметра индентора 2 мм

Твердость материала HBW	Диаметр отпечатка d , мкм	d/D	Глубина отпечатка h_c , мкм	Энергия удара, мДж	Предударная 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

Данные табл. 1, 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 до 500 мкм. Однако при этом на 40 % уменьшается глубина отпечатка (с 53,5 до 31,8 мкм при твердости материала 500 HBW и с 119,6 до 71 мкм при твердости материала 100 HBW). Поскольку уменьшение глубины отпечатка приведет к повышению влияния шероховатости испытываемой поверхности на результаты измерений и, соответственно, увеличит трудоемкость подготовки изделия к контролю, использование индентора с диаметром 2 мм является нецелесообразным.

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 мм, предударная скорость – 3 м/с.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований. Конкурс БРФФИ–МИРРУ 2023. Проект T23УЗБ-035 «Изучение процессов структурообразования и локального деформирования чугунов с целью создания их улучшенных марок, методик и средств неразрушающего контроля физико-механических характеристик».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Анисович, А. Г.** Микроструктуры черных и цветных металлов / А. Г. Анисович, А. А. Андрушкевич. – Минск: Белорусская наука, 2015. – 131 с.
2. **Johnson, K. L.** Contact Mechanics. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. – 452 p.
3. **Tabor, D.** Hardness of Metals. – Oxford: University Press, 1951. – 188 p.

Контакты:

alekspk@mail.ru (Крень Александр Петрович);
matsulevich.o.v@gmail.com (Мацулевич Олег Владимирович);
5657397@gmail.com (Протасеня Татьяна Анатольевна);
u_nadir@mail.ru (Турсунов Нодиржон Каюмжонович);
talgat_1988.26@mail.ru (Уразбаев Талгат Тилеубаевич);
physnikiforov@gmail.com (Никифоров Антон Владимирович);
delendik@mipk.by (Делендик Михаил Николаевич).