

# К ОСНОВНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ – ЧЕРЕЗ ДИНАМИЧЕСКОЕ ИНДЕНТИРОВАНИЕ

*Для оценки работоспособности и прогнозирования остаточного ресурса изделий ответственного назначения (трубопроводов, сосудов высокого давления, элементов энергетического оборудования и т.д.) необходимо знать основные физико-механические характеристики материала, а также их изменение в процессе эксплуатации. Измерение этих характеристик обычно проводят с помощью изготовления специальных образцов-свидетелей, вырезаемых из контролируемых изделий с последующим испытанием на разрывных машинах. Однако это весьма дорогостоящая операция, трудновыполнимая на практике. Поэтому перспективными являются неразрушающие методы испытаний.*

Применение традиционных косвенных методов неразрушающего контроля, заключающихся в использовании корреляционных зависимостей физических параметров (например, коэрцитивной силы, остаточной индукции и др.) от механических свойств материала, как правило, ограничено одной какой-либо маркой стали. Кроме того, на показания приборов, использующих эти методы, оказывают сильное влияние мешающие факторы (форма контролируемой поверхности, зазор, структура и т.д.).

В настоящее время достаточно широко используется метод определения механических свойств, основанный на непрерывной записи внедрения жесткого индентора в испытуемый материал и расчете комплекса основных физико-механических характеристик (предела прочности, предела текучести, относительного удлинения, твердости и др.) по данным диаграммы внедрения. Этот метод получил название метода непрерывного индентирования. Он во многом сходен с известными методами измерения твердости материала, например, Роквелла, Бринелля и Виккерса. Несмотря на то, что многие исследователи [1-5] определяли связь различных видов твердости с различными механическими характеристиками, этот вопрос до конца решить не представлялось возможным вследствие недостаточности информации, получаемой при определении твердости при одном значении деформации. Тенденция последних исследований в этом направлении заключается в установлении связи между механическими характеристиками и кинетической диаграммой вдавливания индентора [6-8]. При этом производится квазистатическое вдавливание жесткого сферического индентора в испытуемый материал, задающим параметром является величина переменной нагрузки, а регистрируемым – глубина внедрения.

Глубина внедрения индентора характеризуется упругой и пластической составляющими, которые, в

свою очередь, определяются путем совместного решения известных уравнений Герца [8] и Тэйбора [9]. Существенный вклад в развитие этого метода внес М.В. Бакиров [10], использовав метод конечных элементов для оценки изменяющегося напряженно-деформированного состояния металла при непрерывном индентировании. Однако на практике метод статического индентирования имеет существенный недостаток, заключающийся, прежде всего, в громоздкости испытательного оборудования. Для создания значительных нагрузок (в некоторых установках они составляют до 1 тонны) необходимо создавать замкнутую силовую конструкцию, состоящую из специальных элементов, обеспечивающих передачу нагрузок на испытуемое изделие. Масса установок, использующих этот метод, достигает нескольких сот килограммов.

Целью настоящих исследований является развитие метода динамического индентирования, заключающегося в измерении параметров движения индентора непосредственно в процессе его ударного взаимодействия с испытуемым изделием. Динамический метод позволяет создать большие силы контактного взаимодействия при малых габаритах и массе нагружающих устройств, что позволяет значительно повысить производительность измерений, удобство в эксплуатации, дает возможность контроля работающего оборудования, а также производить контроль в полевых условиях. Поверхность контролируемого изделия практически не повреждается (отпечаток имеет диаметр несколько десятых долей миллиметра и глубину несколько сотых долей миллиметра), что позволяет классифицировать метод как неразрушающий. При этом величины контактного давления и деформаций достаточны для построения диаграмм вдавливания в диапазоне деформаций 2-8%, а с помощью современной вычислительной техники с использованием специально разработанных алгоритмов можно надежно определять основные механические характеристики материала практически в реальном масштабе времени. Основная методическая трудность при использовании метода состоит в необходимости учета влияния скорости деформирования на результат измерений.

При решении задач о соударениях твердых тел обычно полагают, что волновым характером ударных процессов можно пренебречь, если полная длительность удара намного превышает время прохождения упругой волны вдоль соударяющихся тел [11]. Такой удар называется квазистатическим. В условиях нашего эксперимента данное требование выполняется.

Среднее контактное давление (или твердость по Мейеру) определяется по формуле:

$$\bar{\sigma}(t) = \text{HM}(t) = \frac{F(t)}{\pi a^2(t)} = \frac{F(t)}{\pi D \alpha_t} \quad (1)$$

где  $F(t)$  – контактная сила, соответствующая текущему времени  $t$ ,  $D/2$  – радиус наконечника индентора,  $\alpha_0(t)$  – глубина невосстановленного отпечатка и  $a(t)$  – радиус проекции отпечатка.

В соответствии с (1), чтобы определить  $HM(t)$ , мы должны знать два параметра:  $F(t)$  и  $a(t)$ , либо  $\alpha_0(t)$ . Они могут быть получены из диаграммы движения индентора в процессе удара. Для этой цели мы использовали специально разработанную установку, основными блоками которой являются: блок нагружения, позволяющий производить ударное внедрение индентора с различной начальной энергией удара за счет изменения высоты подъема индентора; блок измерений, позволяющий фиксировать положение и скорость индентора в каждый момент времени; блок обработки информации с использованием персонального компьютера.

Контактное усилие определялось по формуле:

$$P(t) = -\frac{K_v \partial U(t)}{\partial t} M \quad (2)$$

где  $K_v$  – коэффициент,  $U(t)$  – сигнал, соответствующий скорости индентора в момент времени  $t$ ,  $M$  – масса индентора.

Интегрирование скорости  $K_v U(t)$  дает глубину внедрения индентора в испытуемый материал.

$$\alpha(t) = \int_0^t K_v U(t) dt \quad (3)$$

где  $\tau$  – переменная интегрирования.

Данные  $P(t)$  и  $\alpha(t)$  позволяют описать процесс индентирования, исключая параметр  $t$ , в виде двухкоординатной диаграммы: нагрузка на индентор – его перемещение.

Чтобы получить изменение глубины невосстановленного отпечатка как функцию нагрузки, необходимо более детально рассмотреть схему отпечатка, образованного при динамическом индентировании. Принимаемая нами схема контакта сферического индентора с упругопластическим полупространством (рис. 1) описана в [12].

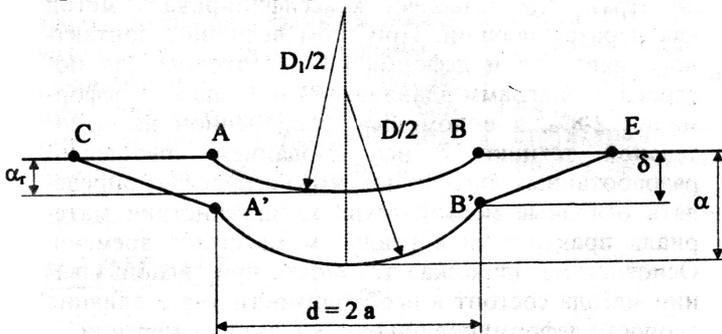


Рис. 1. Схема упругопластического деформирования

Согласно рисунку, поперечное сечение полупространства в контактной зоне определяется ломаной линией  $CA'B'E$ , а поверхность непосредственного контакта индентора – дугой  $A'B'$  с радиусом  $D/2$ . На рис. 1  $\alpha_0$  означает полное перемещение индентора,  $l$  – упругая, а  $\alpha$  – пластическая составляющие,  $\delta$  – максимальная величина упругого смещения контура отпечатка. После прекращения контакта индентора с

полупространством упругая деформация исчезает, а в месте контакта остается пластический отпечаток  $AB$ , имеющий форму сферической лунки радиуса  $D_1/2$  глубиной  $\alpha$ . Радиус кривизны восстановленного отпечатка  $D_1/2$  всегда больше радиуса сферического наконечника  $D/2$ .  $D$  и  $D_1$ ; они связаны между собой уравнением, устанавливаемым контактной теорией Герца. Как видно из рис. 1, максимальное перемещение индентора  $\alpha$  при ударе отличается от глубины отпечатка  $\alpha_0$ , определяющей площадь поверхности контакта.

Для определения глубины  $\alpha_0$  воспользуемся предположением на рис. 1 схемой упругопластического деформирования. Исходя из положений контактной теории Герца, можно определить радиус проекции отпечатка:

$$a = \left\{ \frac{3}{8} \left( \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) PD \right\}^{1/3} \left( \frac{D_1 - D}{D_1} \right) \quad (4)$$

и упругое смещение в центре отпечатка:

$$l = 2kP^{2/3} D^{1/3} \left( 1 - \frac{D}{D_1} \right)^{1/3}, \quad (5)$$

где  $k = \left\{ \frac{3}{8} \left( \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) \right\}^{2/3}$ ,  $E_1, \mu_1$  и  $E_2, \mu_2$  – модули упругости и коэффициенты Пуассона испытуемого материала и индентора соответственно. Используя полученные выражения и геометрические соотношения для сегмента круга, получим выражение для  $\alpha_0$

$$\alpha_0 = \frac{9k^3 P^2}{\alpha^2 D \left( 1 - 2 \cos \left[ \frac{1}{3} \arccos \left( 1 - \frac{27k^3 P^2}{2\alpha^2 D} \right) + \frac{\pi}{3} \right] \right)} \quad (6)$$

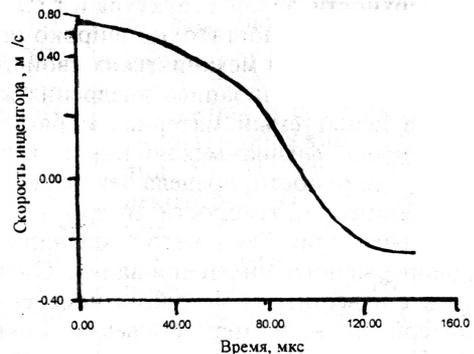


Рис. 2. Изменение скорости индентора в процессе удара

На рис. 2. приведена экспериментально полученная зависимость скорости соударения индентора с испытуемым материалом (малоуглеродистая сталь) от времени. При этом данные  $Y(t)$  являются исходной информацией для расчета контактных сил и перемещений индентора.

На рис. 3 и 4 приведены кривые  $P(t)$  и  $\alpha(t)$ , рассчитанные по формулам (2) и (3) на основании данных зависимости, представленной на рис. (2).

Исключая параметр  $t$ , можно получить соотношение между контактным усилием  $P$  и глубиной внедрения  $\alpha$ . Типичная зависимость  $P(\alpha)$  показана на рис. 5. Восходящая ветвь кривой соответствует активному этапу удара (до точки А), когда

индентор внедряется в металл, а нисходящая – пассивному этапу, когда индентор отскакивает за счет восстановления упругих деформаций в материалах индентора и испытуемой детали. Нисходящая кривая хорошо описывается законом Герца и служит базой для расчета модуля упругости, величина которого далее используется в формулах для определения контактных деформаций (например, глубины невосстановленного отпечатка  $\alpha_0$ , уравнение 6).

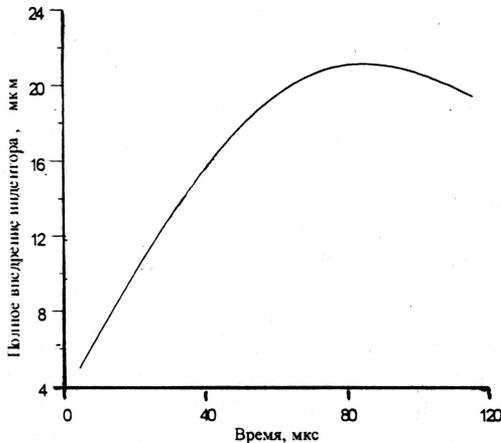


Рис. 3. Изменение глубины внедрения индентора в процессе удара

Экспериментальная зависимость  $P(\alpha)$  позволяет перейти к построению кривых: контактное напряжение – контактная деформация, которые являются аналогом истинных кривых  $\sigma(\epsilon)$ , получаемых при испытаниях на растяжение-сжатие.

Для оценки величины контактной деформации, соответствующей деформации растяжения, различными авторами предлагаются различные формулы. Наиболее употребительной и известной является формула, предложенная Тэйбором [13]:  $\epsilon = 0,2 d|D$ , где  $d$  – диаметр проекции отпечатка, а  $D$  – диаметр наконечника индентора. Контактное напряжение рассчитывается как отношение контактной силы к площади проекции отпечатка:  $4 P/(\pi d^2)$ .

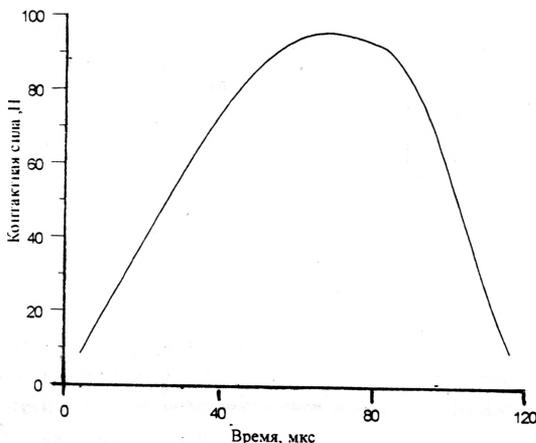


Рис. 4. Изменение контактной силы в процессе удара

На рис. 8 представлена зависимость  $\sigma(\epsilon)$  для используемой в эксперименте марки стали. Если качественно сравнивать ход кривой  $\sigma(\epsilon)$  с аналогичной статической зависимостью при растяжении, то основное отличие заключается в резком уменьшении  $\sigma$  кривой динамического индентирования в конце активного этапа удара. Это связано с влиянием уменьшения скорости деформации на сопротивление пластическому деформированию индентором рассматриваемой стали.

Кривые  $\sigma(\epsilon)$  используются для определения основных механических характеристик сталей, применяемых при изготовлении трубопроводов и сосудов высокого давления: твердость по Бринеллю, предел прочности. По кривой разгрузки  $P=P(\alpha)$  определяется модуль нормальной упругости. По кривой контактная сила – глубина пластической деформации определяет предел текучести исследуемого материала.

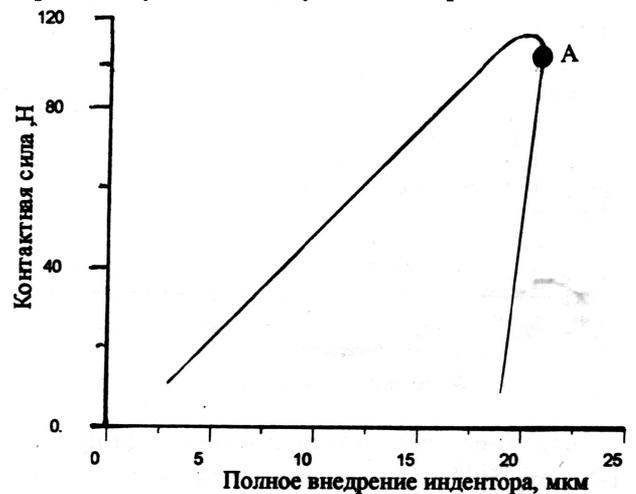


Рис. 5. Силовая диаграмма внедрения индентора

Для экспериментальной проверки предложенной методики определения механических характеристик материалов трубопроводов и сосудов высокого давления были изготовлены образцы согласно ГОСТ 1497-73: 96 мм длиной, толщиной 3 мм, длина выточки 40 мм. Образцы изготавливались из сталей ст. 20, 17Г1С, 12Х1МФ, 15ГС, 15Х1М1Ф. Каждый образец вначале подвергался испытаниям на установке динамического индентирования. Измерение производилось в восьми точках образца, причем четыре точки приходились на центральную часть и по две – на концевики. Кроме динамических испытаний, на тех же образцах в двух центральных точках проводились статические испытания путем вдавливания жесткого индентора с диаметром наконечника 1 мм с различными нагрузками в 5, 10, 20, 40, 60 Кг на приборе Виккерса. После испытаний данные экспериментальных исследований проходили статистическую обработку.

Указанные зависимости для стали 17Г1С представлены на рис. 2-8.

Используя полученные данные, определялись модуль упругости, пределы текучести и пределы прочности материалов.

После проведения испытаний индентированием образцы испытывались на разрывной машине "Инстрон-1195", в результате чего были получены представленные на рис. 2- 6 для стали 17ГС зависимости:

- истинная диаграмма растяжения (рис. 6),
- динамическая силовая характеристика индентирования (рис. 5),
- зависимость динамической контактной силы от глубины остаточной деформации в отпечатке (рис. 7),
- зависимость среднего контактного давления от деформации в отпечатке (рис. 8).

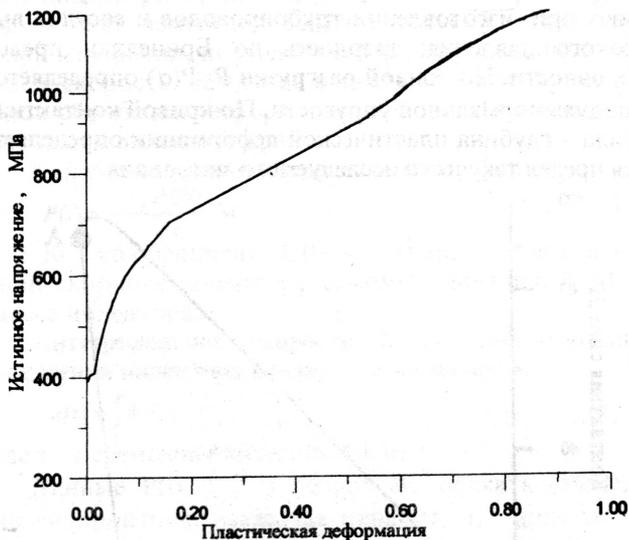


Рис. 6. Истинная диаграмма растяжения

Механические характеристики (предел прочности и предел текучести) определялись как среднее значение из четырех образцов, вырезанных из одной заготовки и прошедших одинаковую термообработку. Значения механических характеристик, полученные на "Инстрон-1195", принимались за истинные и являлись базовыми для оценки достоверности метода динамического индентирования.

Для оценки величины предела текучести использовалась диаграмма: динамическая контактная нагрузка – величина пластической деформации в отпечатке (рис. 7).

Как видно из рис. 7, изменение нагрузки, как функция глубины пластической деформации, имеет вид прямой практически во всем диапазоне нагрузок (отрезок ОВ). Точка А на рисунке является концом активного этапа нагружения. Отрезок ВА на диаграмме соответствует окончанию активного этапа соударения и указывает на наличие сдвига фаз между моментом достижения максимальной контактной силы и моментом достижения максимальной пластической деформации. Анализ поведения металла в конце активного этапа соударения будет подробно приведен ниже.

Возвращаясь к рассмотрению наблюдаемой пропорциональной зависимости  $F(\alpha_{nn})$ , следует отметить, что эти данные находятся в полном согласии с известными результатами статических испытаний на вдавливание сферического наконечника [4, 8]. Обстоятельные многочисленные испытания, проведен-

ные в указанных работах, показали, что наклон прямой  $F(\alpha_{nn})$  и величина предела текучести находятся в прямо пропорциональной зависимости для мало- и среднеуглеродистых сталей:

$$\sigma_T^c = \frac{k}{\pi D} * \frac{\partial F}{\partial \alpha_{nn}^c} \quad (7)$$

где D – диаметр наконечника индентора.

Величина коэффициента k для статических испытаний была определена равной 0,2, хотя, как известно, для различных классов сталей она может находиться в пределах 0,18-0,22.

Используя коэффициент,  $k \approx 0.2$  и  $\frac{dF}{\alpha_{nn}^0}$ ,

вместо формулы (7), мы получим значение динамического предела текучести:  $\sigma_m^0 = k * \frac{1}{\pi D} * \frac{dF}{\alpha_{nn}^0}$  (8)

Однако, для того, чтобы перейти к статическому пределу текучести, остановимся на известных особенностях деформирования металла при динамическом нагружении.

Сопоставление результатов статических и динамических испытаний сталей на растяжение или сжатие показывает, что динамические предел текучести и предел прочности, а также динамическая твердость, как правило, выше, чем статические, причем наиболее сильно отличаются характеристики сталей с низким содержанием углерода или низкой твердостью. Отношение динамического предела текучести к статическому характеризуется коэффициентом динамичности K, который связан гиперболической зависимостью с величиной статической твердости или статическим пределом текучести. Рассматривая класс сталей, предназначенных для изготовления трубопроводов и сосудов высокого давления, в которых предел текучести при статических испытаниях меняется в диапазоне 250-400 МПа, изменение коэффициента динамичности K с достаточной на практике точностью можно описать зависимостью вида:

$$\frac{1}{K} = a * HD^b + b \quad (9)$$

где  $HD^d$  – динамическая пластическая твердость; a, b – эмпирические коэффициенты.

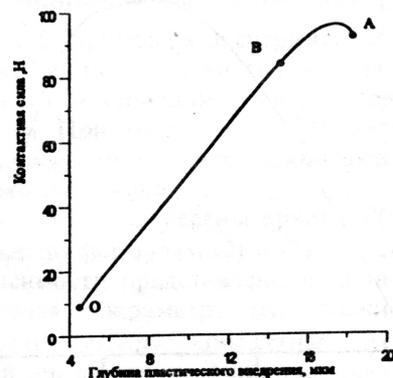


Рис. 7. Зависимость динамической контактной силы от глубины остаточной деформации в отпечатке

Учитывая вышеизложенное, ожидать постоянства коэффициента  $k$ , связываемого  $\sigma_T^c$  и  $HD^o = \frac{1}{\pi D} \frac{dF}{d\alpha_m^o}$  при динамических испытаниях, не приходится. Проведенные нами эксперименты подтверждают это положение. Величина  $\frac{1}{\pi D} \frac{dF}{d\alpha_m^c}$  при ударном нагружении связана с величиной  $\frac{1}{\pi D} \frac{dF}{d\alpha_m^o}$  коэффициентом  $K$ , полученным при статических испытаниях (уравнение 8).

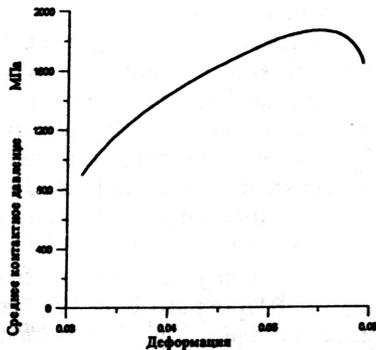


Рис. 8. Зависимость среднего контактного давления от деформации в отпечатке

Таким образом, выражение статического предела текучести можно описать в следующем виде:

$$\sigma_T^c = \frac{k}{K\pi D} * \frac{\partial F}{\partial \alpha_m^o} \quad (10)$$

Подставляя экспериментально найденные коэффициенты  $a=24,65*10^{-5}$  и  $b=0,2684$  в формулу (10), получим в окончательном виде:

$$\sigma_T^c = 0,2 * \left( \frac{a}{\pi D} * \frac{\partial F}{\partial \alpha_m^o} + b \right) * \frac{1}{\pi D} * \frac{\partial F}{\partial \alpha_m^o} \quad (11)$$

Предел прочности материала  $\sigma_b$  определялся по данным диаграммы: среднее контактное давление – величине деформации. Контактное давление определялось как отношение мгновенной силы к мгновенной площади проекции отпечатка:

$$\bar{P} = HM = \frac{P}{\pi d^2 / 4} \quad (12)$$

Величина деформации определялась по формуле Тэйбора:

$$\epsilon = 0,2 \frac{d}{D} \quad (13)$$

Диаграмма  $P = \bar{P}(\epsilon)$  имеет вид выпуклой кривой с начальным пологим наклоном и достаточно резким падением в конце. Окончание кривой соответствует завершению активного этапа удара, а вершина – максимуму контактного давления. Нормированной величиной при испытаниях являлась степень динамического нагружения, равная отношению кинетической энергии удара к кубу диаметра контактного наконечника индентора:

$$N_s = \frac{W}{D^3} \quad (14)$$

Аналогом этой величины при статическом нагружении является величина, приведенная в [5]:

$$N_{cr} = \frac{P}{D^2} \quad (15)$$

где  $P$  – статическая нагрузка.

Для обеспечения единства измерений необходимо выполнение условия:  $N\delta = \text{const}$ .

Постоянство  $N\delta$  объясняет существование однозначной зависимости:

$$\sigma_b = k_b^o * HM_{max} \quad (16)$$

для мало- и среднеуглеродистых сталей, в том числе используемых в теплоэнергетике, где коэффициент  $k_b^o$  зависит от величины  $HM_{max}$  (аналогично зависимости для предела текучести).

Вид зависимости (16) хорошо согласуется с уравнениями, полученными в [1] для случая статического индентирования, при этом, однако, коэффициент  $k_b^c = 0,36$ , предложенный в этой работе, является несколько большим, чем  $k_b^o$ .

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод динамического индентирования может быть использован для неразрушающего определения основных физико-механических характеристик, в частности, предела текучести и предела прочности металлических материалов. Минимальная повреждаемость испытуемой поверхности позволяет рекомендовать его как неразрушающий метод контроля, а портативность аппаратуры и высокая производительность измерений дают возможность использовать его при диагностировании широкого круга самых разнообразных объектов, в том числе элементов работающего оборудования.

Валерий РУДНИЦКИЙ,  
Александр РАБЦЕВИЧ,  
Андрей МЕЛЕЖКО

Институт прикладной физики  
Национальной Академии наук Беларуси

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М.П. Марковец. *Определение механических свойств металлов по твердости*. М., 1979.
2. С.И. Булычев, В.П. Алехин. *Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора*. М., 1990.
3. В.М. Шабанов. *Физические основы испытаний материалов по твердости*. Сб. материалов ВНТК. Иваново, 1991.
4. В.М. Матюнин. *Автореферат докторской диссертации. Методы и средства безобразцовой оперативной оценки механических свойств материалов элементов конструкций и машин*, 1993.
5. А.Ф. Гетман, М.В. Бакиров, И.А. Таборко. *Новый прибор и методика для определения твердости и механических свойств материалов*. Сб. материалов ВНТК. Иваново, 1993.
6. В.М. Матюнин. *Методы и средства инденторных испытаний материалов с регистрацией диаграмм деформирования*. Сб. материалов ВНТК. Иваново, 1991.
7. S. Timoshenko, I.N. Goodier. *Theory of Elasticity 3th Ed. Mc Craw-Hill. New-York, 1979.*
8. Bakirov. *Modifiziertes Harteproofverfahren Kontrolle*. N 10, 1994.
9. V.A. Rudnitsky, V.V. Djakovich. *Material testing by the method of dynamic indentation, Nondestructive testing evaluation. Vol. 12, 1995.*