

ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ И ИЗДЕЛИЙ С НИЗКИМ КАЧЕСТВОМ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ

А.В. Рабцевич, О.В. Мацулевич, В.А. Рудницкий

¹ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», Минск, Беларусь

Традиционные динамические твердомеры позволяют контролировать изделия с толщиной стенки от 10...12 мм и с шероховатостью Ra 1,6...2,5. Рассмотрены методики, позволяющие расширить возможности динамических твердомеров для контроля твердости стальных изделий с толщиной стенки от 5,5 мм или с шероховатостью Ra4-5. Методики реализованы в приборе Импульс-2М и основаны на регистрации всего процесса внедрения индентора в металл изделия.

В настоящее время широкое распространение получили приборы контроля твердости динамического (ударного) действия. Динамические твердомеры портативны, легки в использовании, точны и предоставляют возможность контроля крупногабаритных изделий.

Принцип действия динамических твердомеров основан на нанесении удара индентором (бойком) с малой кинетической энергией по поверхности контролируемого изделия. Индентор имеет высокую твердость и при внедрении в изделие вызывает упругопластическое деформирование металла. На активном этапе удара индентор движется, замедляясь, внутрь металла изделия. После остановки индентор начинает движение наружу под действием сил упругости в отпечатке (пассивный этап удара). Разница между кинетическими энергиями индентора до и после соударения есть потери энергии на пластическую деформацию в отпечатке. В предлагаемых на рынке твердомерах регистрируется скорость отскока индентора либо скорость подлета и скорость отскока. Коэффициент восстановления скорости, определяемый как отношение скорости отскока к скорости подлета, есть мера твердости изделия (твердость по Шору). Наличие устойчивой связи между статической твердостью металлов (Бринеля, Роквелла) и коэффициентом восстановления скорости позволяет калибровать динамические твердомеры непосредственно в единицах статической твердости.

Приборы измерения твердости динамического действия не лишены ряда недостатков. Известные приборы обеспечивают паспортную точность

измерений при контроле изделий с толщиной стенки в месте контроля не менее 8...12 мм и локальной сосредоточенной массой 1,5...2,5 кг (в зависимости от параметров датчика). Попытка измерения твердости изделия с меньшей толщиной стенки или меньшей массой без использования специального приспособления приводит к возникновению существенной систематической погрешности измерений.

Причиной такого ограничения являются значительные контактные усилия при динамическом индентировании, вызванные кратковременностью процесса удара. На сталях длительность процесса динамического индентирования не превышает 50 мкс. Соответственно при ударе индентором массой 4 г, имеющим предударную скорость 2 м/с, максимальное контактное усилие достигает 700 Н при контроле изделия твердостью 66 HRC. Такие значительные усилия вызывают упругий прогиб стенки изделия при ее конечной жесткости. На это расходуется часть кинетической энергии индентора, что приводит к искажению показаний прибора.

Эмпирически установлено, что при толщине стенки выше некоторого значения ее конечная жесткость перестает оказывать влияние на результаты измерения. Изделие с толщиной стенки, меньшей рекомендованного значения, будем называть нежестким.

Для контроля нежестких изделий в лабораторных или заводских условиях динамическими твердомерами используют присоединение объекта контроля к массивному основанию с помощью консистентной смазки (солидола). В том случае, если нет доступа к противоположной стороне контролируемой поверхности, она имеет форму, отличную от плоскости, либо качество этой поверхности недостаточно для притирки, присоединение массы невозможно. Примером представленного контроля таких объектов могут служить трубы. Также затруднительным представляется присоединение массы к действующим пространственным конструкциям типа ферм.

Решение проблемы контроля нежестких объектов является важной задачей с точки зрения безопасности эксплуатируемых сооружений и производств, а также для расширения производительности и возможностей производственного контроля большого класса изделий.

Исследования проводились с помощью прибора Импульс-2М [1]. Портативный прибор Импульс-2М (сертификат № 3380 в Государственном реестре средств измерений) предназначен для неразрушающего экспресс-определения твердости и предела прочности металлических изделий. Особенностью прибора является способ регистрации и обработки первичной информации, которые делают его пригодным как для проведения исследований, так и для реализации разработанных методик по отстройке от влия-

ния мешающих факторов. Прибор регистрирует не пиковые значения скорости, а весь процесс внедрения индентора в металл изделия (рис. 1).

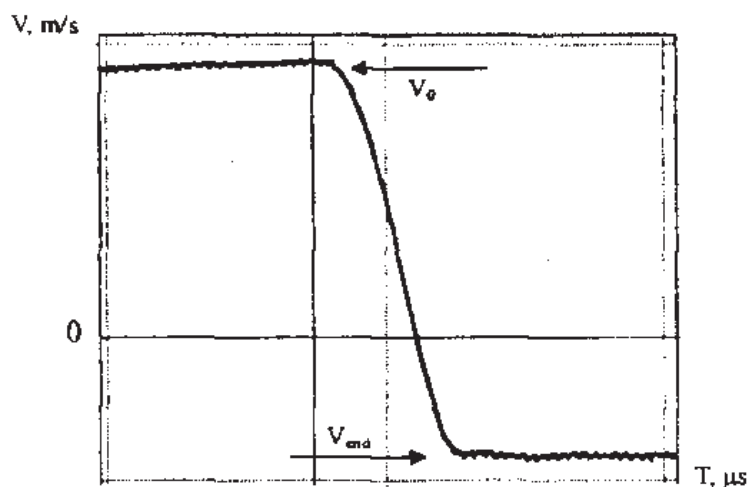


Рис. 1. Зависимость скорости внедрения индентора в металл от времени

Сигнал с магнитоиндукционного датчика скорости индентора переводится в цифровую форму встроенным АЦП с частотой 5 МГц. Полученный массив значений скорости записывается в долговременную память прибора. Дальнейшая обработка сигнала производится встроенным карманным персональным компьютером (КПК) по специальным алгоритмам. Обработка включает: фильтрацию шумов, восстановление непрерывного по амплитуде сигнала, дифференцирование и интегрирование сигнала, расчет упругой и пластической составляющих глубины внедрения индентора по принятой модели [2], расчет диаметра отпечатка и среднего контактного давления в отпечатке для каждого момента измерения. Прибор хранит как результаты измерения, сопровождаемые текстовыми комментариями, так и массив скорости индентора. Эти данные можно импортировать через USB-соединение в персональный компьютер в специальную программу для последующего хранения и анализа.

Допустимо предположить, что, уменьшая контактную силу за счет снижения кинетической энергии индентора, возможно понизить чувствительность прибора к конечной жесткости изделия.

Для исследования влияния предупредной энергии индентора на погрешность определения твердости были проведены измерения приборами Импульс-2М и ТПЦ-4 на образцах в виде труб разных диаметров и с различной толщиной стенок (4...10 мм). Сравнивались показания приборов в условиях конечной жесткости объекта измерения с показаниями этого же прибора при присоединении объекта измерения к дополнительному мас-

сивному объекту. Присоединение выполнялось с помощью консистентной смазки, что увеличивало жесткость изделия до величин, когда ею можно пренебречь. Систематическая погрешность измерений, вызываемая конечной жесткостью объекта контроля, определялась как разница между средними значениями выборок. Испытания показали, что снижение кинетической энергии индентора от 9 МДж (Импульс-2М) до 2 МДж (ТПЦ-4) недостаточно для заметного снижения систематической погрешности измерений. При этом снижение энергии индентора имеет негативный эффект в виде роста требований к качеству обработки поверхности изделия.

Другим вариантом решения задачи является установление эмпирической или расчетной (методом конечных элементов) зависимости между истинной и регистрируемой твердостями изделия с конечной жесткостью. Главный недостаток данного подхода – необходимость получения эмпирической зависимости для каждого типоразмера изделия, что затруднительно для изделий с изменяющимся профилем сечения. Эксперименты по контролю длинномерных труб, хранящихся в стеллаже, показали, что показания прибора весьма чувствительны к способу и места закрепления объекта контроля. Эти недостатки сужают возможную область применения методики, основанной на калибровке прибора по конкретному типоразмеру изделий.

Таким образом, наши исследования показали недостаточную эффективность подходов, основанных на уменьшении кинетической энергии индентора или на калибровке прибора по конкретному типоразмеру изделий конечной жесткости. Оптимальным решением представляется нахождение некоего более универсального метода, который был бы основан на регистрируемой прибором информации об ударе без использования или при минимуме априорной информации о параметрах объекта контроля. Очевидно, что данных о скорости отлета индентора как единственного регистрируемого параметра недостаточно для реализации такого метода, так как данный параметр чувствителен к конечной жесткости. Дальнейшие исследования основаны на том, что прибор Импульс-2М позволяет регистрировать весь процесс внедрения индентора в металл.

В качестве объекта исследования использовались стальные трубы диаметром 60...800 мм с толщиной стенки 3,6...8 мм, пластины толщиной 4...10 мм. Область контроля подвергалась зачистке примерно до Ra 1,6.

Измерения проводились на внешней поверхности труб и подразделялись: на «нежесткие» – при консольном закреплении либо отсутствии закрепления (трубы лежали на основании); и «достоверные» – после притирки внутренней стенки трубы к стальному цилиндру несколько меньшего диаметра. Для уменьшения случайной погрешности в каждом опыте про-

водилось не менее 7 измерений, по которым потом рассчитывались средние значения параметров индентирования. Некоторые характерные результаты измерения твердости по коэффициенту восстановления скорости приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты измерения твердости изделий конечной жесткости

Объект контроля	На массивном основании (истинное значение)		Без закрепления – измерение твердости по коэффициенту восстановления			Без закрепления – с ототройкой от недостаточной толщины		
	Твердость, НВ	Коэффициент вариации	Твердость, НВ	Ошибка, НВ	Коэффициент вариации	Твердость, В	Ошибка, НВ	Коэффициент вариации
Мера твердости	232	0,0055	188	-44	0,051	211	-21	0,035
Труба нефтепровода после 20 лет эксплуатации, толщина стенки 7 мм	163	0,0567	154	-9	0,086	165	2	0,094
Труба Ø160, толщина стенки 5 мм	130	0,3026	101	-29	0,0363	127	-3	0,0388
Труба Ø140, толщина стенки 7 мм	156	0,0370	156	0	0,037	160	4	0,042
Тавр 230×85, толщина стенки 7 мм	166	0,0432	152	-14	0,093	160	-6	0,071
Лист, толщина стенки 4 мм	128	0,0294	70	-58	0,046	109	-19	0,025
Мера твердости	269	0,0105	255	-14	0,008	267	-2	0,026
Пластина, толщина стенки 4 мм	196	0,0165	176	-20	0,012	177	-19	0,022
	196	0,0165	157	157	0,030	173	-23	0,038

Как следует из таблицы, конечная жесткость объекта измерения может вызывать существенную систематическую ошибку измерения твердости.

Анализ кривых скорости внедрения индентора в металл показал, что степень влияния конечной жесткости объекта контроля на регистрируемую скорость внедрения индентора изменяется в процессе удара. Активный этап удара (внедрение индентора в металл) является менее чувствительным к этому фактору, чем пассивный этап (упругое вытеснение индентора

из отпечатка). Физически это объясняется разным соотношением между пластической и упругой составляющей деформации на активном и пассивном этапах удара.

На рисунке 2 изображена феноменологическая модель процесса.

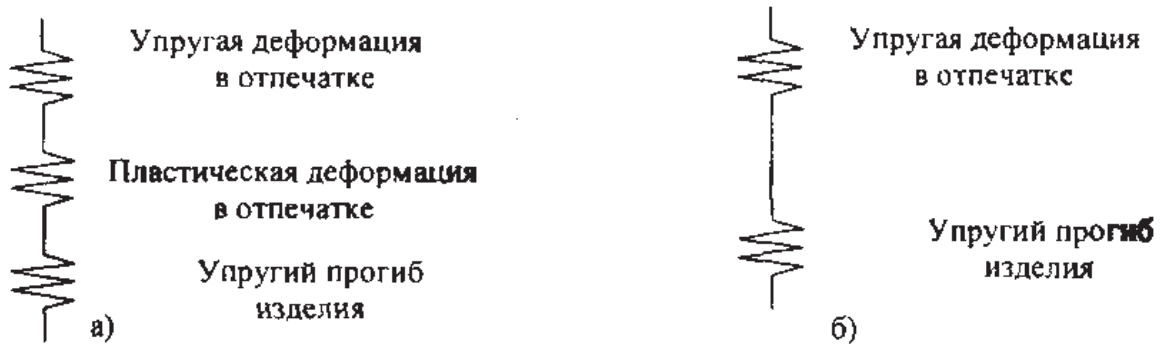


Рис. 2. Упрощенная модель упругопластического полупространства:
а – на активном этапе удара; б – на пассивном этапе удара

Как видно из рисунка, на активном этапе удара податливость упругопластического полупространства C_1 определяется суммой податливостей: C_e – податливость эквивалентной пружины упругой составляющей глубины внедрения индентора; C_p – податливость эквивалентной пружины пластической составляющей глубины внедрения индентора; C_{eb} – податливость эквивалентной пружины упругого прогиба стенки изделия. Соответственно податливость полупространства на пассивном этапе удара – при упругом вытеснении индентора: $C_2 = C_e + C_{eb}$.

Так как $C_p > 0$, то $C_1 > C_2$ и

$$\frac{C_{eb}}{C_1} < \frac{C_{eb}}{C_2}. \quad (1)$$

Выражение (1) экспериментально подтверждается ходом зависимостей скорости внедрения индентора от времени при индентировании изделия конечной жесткости в свободном состоянии и после присоединения к массивному основанию.

Проведенное нами моделирование методом конечных элементов соударения индентора со стальной пластиной толщиной 5 мм, выполненное для модели с выраженной динамикой с учетом волновых и инерционных эффектов, подтверждает вышесказанное и с высокой точностью согласуется с экспериментальными данными.

Анализ 1500 измерений на объектах пониженной жесткости показал, что наименьшей чувствительностью к жесткости объекта контроля при приемлемой случайной составляющей погрешности обладает динамическая твердость Мейера, определяемая как среднее контактное давление в отпечатке в конце активного этапа удара.

На основании данного факта была разработана и встроена в прибор Импульс-2М методика по отстройке от влияния конечной (недостаточной) жесткости объекта контроля. При измерении прибор одновременно рассчитывает динамическую твердость Мейера и коэффициент восстановления скорости и определяет по каждому из них значение статической твердости. Если разница между этими значениями превышает допускаемую величину, прибор сигнализирует о том, что объект имеет пониженную жесткость, и отображает значения статической твердости (по Бринеллю и Роквеллу), рассчитанные по динамической твердости Мейера. Встроенный КПК прибора обладает достаточной производительностью для обеспечения комфортного времени измерения. Результаты использования данной методики приведены в таблице 1.

Другим недостатком, присущим твердомерам динамического действия, является низкая точность определения механических характеристик изделий с шероховатостью более Ra 2,5. Потребитель сталкивается с этим при входном, выходном и промежуточном контроле продукции, а также в случаях, когда возникновение шероховатости обусловлено износом изделия в процессе эксплуатации. Весьма актуальна эта проблема и при оценке состояния действующих конструкций в полевых условиях, когда качество поверхности даже после ее зачистки абразивным инструментом не позволяет проводить измерения с требуемой точностью. Обеспечение рекомендуемых значений шероховатости ($Ra = 1,6 \dots 2,5$ мкм) как в полевых условиях, так и на производстве не всегда целесообразно, поскольку требует существенных трудовых затрат.

Снижение требований к качеству обработки контролируемых поверхностей традиционно достигается увеличением энергии удара. При этом уменьшается доля энергии, затрачиваемая на смятие выступов профиля шероховатости, что, в свою очередь, уменьшает влияние шероховатости на результат измерения. Подобный подход позволяет повысить достоверность измерений, однако не является универсальным, поскольку приводит к значительному увеличению требований к минимальной локальной жесткости и массе контролируемого изделия. Например, твердомер Equotip (Швейцария) с датчиком G позволяет контролировать поверхности с шероховато-

стью до 7 мкм. При этом локальная масса изделия в месте удара должна составлять не менее 15 кг, что практически исключает возможность безобразового контроля объектов с ограниченной массой или толщиной стенки (трубопроводы, сосуды высокого давления, металлоконструкции).

Несмотря на указанные ограничения, для всех известных динамических твердомеров увеличение энергии удара является единственным способом решения проблемы. Причина заключается в малой информативности применяемых методов получения первичной информации о процессе удара. Регистрация только одного параметра (коэффициента восстановления скорости), имеющего высокую чувствительность к мешающему фактору (шероховатости поверхности) значительно затрудняет отстройку от его влияния.

Данного недостатка лишен описанный выше метод динамического индентирования, позволяющий за один удар определить несколько параметров, характеризующих процесс внедрения индентора в контролируемый материал. Основными из них являются: длительность активного этапа удара t_a ; максимальная глубина внедрения индентора α_{max} ; контактная сила при максимальном внедрении $F_{V=0}$; коэффициент восстановления скорости e и динамическая твердость по Мейеру HM .

Для того чтобы оценить эффективность использования в качестве исходных данных разных параметров индентирования, нами был проведен эксперимент по определению степени влияния на них шероховатости [3]. Измерения проводились на трех образцах с твердостью 147, 318 и 438 НВ. На каждом из образцов были выполнены четыре зоны с различной нерегулярной шероховатостью (от 0,4 до 5,5 мкм). В каждой зоне проводилось не менее 10 измерений и вычислялись значения t_a , α_{max} , $F_{V=0}$, e и HM . Кроме того, чтобы оценить влияние шероховатости на процесс внедрения индентора в металл, анализировались регистрируемые при каждом измерении зависимости $F(\alpha)$. Кривые внедрения, полученные на образцах с твердостью 147 и 318 НВ при различных значениях шероховатости, показаны на рисунке 3. Видно (см. рис. 3), что с ростом шероховатости изменяется соотношение между глубиной невосстановленного отпечатка и контактным усилием в отпечатке на активном этапе удара. В результате одна и та же величина, например, максимальной глубины внедрения индентора или контактной силы при максимальном внедрении может соответствовать материалу с низкой твердостью и малой шероховатостью либо материалу с высокой твердостью, но имеющему грубо обработанную поверхность.

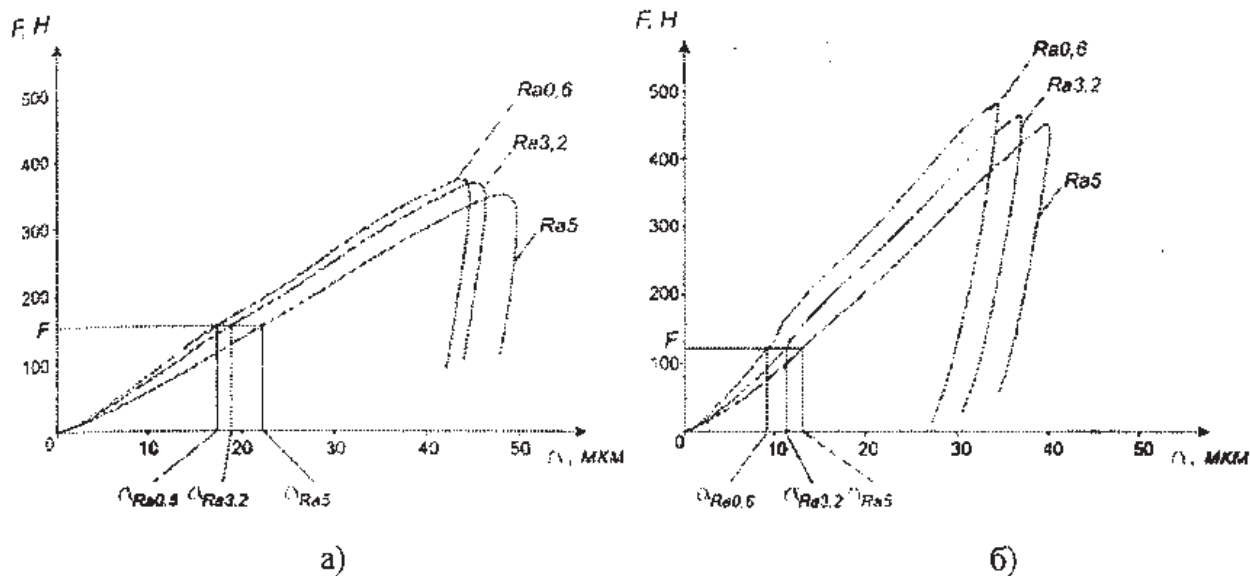


Рис. 3. Зависимость контактного усилия от глубины внедрения индентора в металл:
 а – твердость образца 147 НВ; б – твердость образца 318 НВ

Таким образом, метод определения твердости как функции какого-либо одного параметра индентирования не обеспечивает требуемой точности при контроле изделий с низким качеством обработки поверхности. В то же время результаты экспериментов показали, что чувствительность различных параметров индентирования к шероховатости отличается. Это позволяет путем использования в качестве исходных данных двух параметров индентирования избавиться от неоднозначности определения твердости.

Разработанная методика отстройки [3] основывается на установленной в ходе исследований закономерности между параметрами e и HM , измеренными при одинаковой твердости основного металла изделия, но при разных значениях шероховатости его поверхности (рис. 4). Эта закономерность в диапазоне от 100 до 450 НВ достаточно точно описывается линейной зависимостью $HM = ae + b$ (см. рис. 4, прямые 2, 3 и 4).

Значения коэффициентов a и b изменяются пропорционально твердости, измеренной на гладких поверхностях, которой соответствует коэффициент восстановления e_0 .

Алгоритм корректировки заключается в определении коэффициентов a и b прямой, проходящей через измеренную точку X , и последующем вычислении по полученным коэффициентам значения e_0 .

Координаты точки X e_x и HM_x находятся путем усреднения результатов группы измерений – совокупности измерений, соответствующих определенному участку поверхности контролируемого изделия. Коррекция ре-

зультатов выполняется для средних значений (математического ожидания) группы измерений, так как индивидуальные измерения в силу случайного характера влияния шероховатости не могут быть уточнены с достаточной достоверностью.

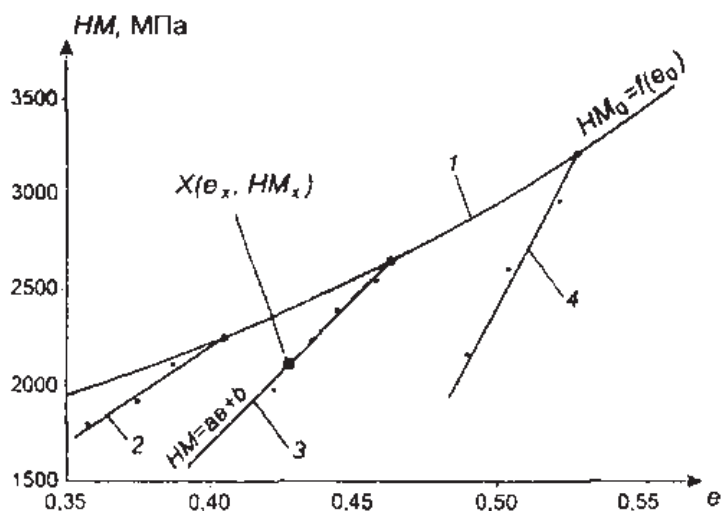


Рис. 4. Соотношение между динамической твердостью по Мейеру и коэффициентом восстановления скорости:
 кривая 1 соответствует гладким поверхностям (Ra не более 0,6 мкм),
 прямые 2, 3, 4 – шероховатости $Ra = (0,6 \dots 5)$ мкм

Предложенная методика позволила значительно снизить влияние шероховатости контролируемой поверхности на величину измеренной твердости (табл. 2).

Таблица 2

Оценка эффективности определения твердости по двум параметрам

Твердость образца, НВ	Ra , мкм	Абсолютная погрешность определения твердости, НВ	
		При использовании традиционного метода (по одному параметру)	При вычислении твердости как функции двух параметров (e и HM)
147	1,6	2,6	4,6
	3,2	5,4	6,8
	5,5	16,7	4,8
318	1,6	6,7	7,1
	3,2	23,5	4,9
	5	43,0	3,7
438	1,6	2,0	6,2
	2,5	14,6	6,0
	4,5	30,1	2,8

Заключение. Проведен анализ влияния ограниченной жесткости и массы контролируемого изделия, а также шероховатости его поверхности на величину измеренной твердости. Показано, что общепринятый метод определения твердости по коэффициенту восстановления скорости не позволяет контролировать нежесткие или грубо обработанные металлические изделия с требуемой точностью, так как этот параметр в значительной степени подвержен влиянию указанных мешающих факторов. Описаны методики минимизации влияния мешающих факторов, позволяющие контролировать изделия с толщиной стенки от 5,5 до 6 мм и шероховатостью поверхности Ra 4...5 с паспортной точностью. Разработанные методики основаны на использовании в качестве исходных данных при определении твердости всего процесса внедрения индентора в металл.

ЛИТЕРАТУРА

1. Динамический прибор для контроля механических свойств магистральных трубопроводов / А.В. Рабцевич [и др.] // Энергетика и ТЭК. – 2006. – № 3. – С. 12 – 14.
2. Рудницкий, В.А. Метод динамического индентирования для оценки механических характеристик металлических материалов / В.А. Рудницкий, А.В. Рабцевич // Дефектоскопия. – 1997. – № 4. – С. 79 – 86.
3. Мацулевич, О.В. Контроль поверхностей с низким качеством обработки методом динамического индентирования / О.В. Мацулевич, А.В. Рабцевич, В.А. Рудницкий // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. Фіз.-тэхн. навук. – 2007. – № 3. – С. 116 – 121.

УДК 620.179.14/15

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ПЛОСКОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТОДОМ МАГНИТНЫХ ШУМОВ

В.Л. Венгринович, Д.В. Дмитриевич
ГНУ «ИПФ НАН Беларуси», Минск, Беларусь

Определение параметров плосконапряжённого состояния является необходимой частью оценки остаточного ресурса стальных конструкций и изделий. Ресурс многих важных деталей механических конструкций зависит от скорости образования дефектов, которая в свою очередь зависит от уровня напряжений. Остаточные напряжения являются как бы фоном, на