

УДК 620.178.154

**ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ПОРТАТИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ТВЕРДОМЕРОВ**©**Ляпунов А. М.***Українська інженерно-педагогічна академія***Інформація про автора:**

**Ляпунов Олександр Михайлович:** ORCID: 0000-0001-9241-0338; [aleksander.lyapunov@rambler.ru](mailto:aleksander.lyapunov@rambler.ru); кандидат технічних наук; старший викладач кафедри інтегрованих технологій в машинобудуванні та зварювального виробництва; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Портативные электронные твердомеры нашли широкое применение для контроля твердости деталей, как в процессе производства, так и в процессе эксплуатации. Большое разнообразие этих приборов сводится всего лишь к четырем принципам измерения твердости – по отскоку, по разности частот между собственной частотой колебаний алмазного индентора и частотой предварительно нагруженного алмазного индентора, определения твердости по величине электрического сопротивления специального алмазного индентора и реализующий метод визуализации отпечатка индентора. Наиболее широко многими фирмами и компаниями представлены портативные динамические твердомеры (ASTM A956-06), работающие по методу отскока (твердость по Леебу, HL) и ультразвуковые твердомеры (ASTM A1038), которые используют резонансно—импедансный метод измерения твердости (Ultrasonic Contact Impedance – UCI метод).

Уникальный метод Esa Test®, соответствующий DIN50 158 был разработан и запатентован фирмой Ernst (Швейцария). В настоящее время он применяется только в приборах этой компании. Принцип определения значения твердости по методу Роквелла (EN10109-3) был применен этой же фирмой благодаря запатентованному ими устройству, Большим шагом в развитии мобильных твердомеров стал выпуск твердомера, реализующий метод визуализации отпечатка индентора при измерения твердости материала по Виккерсу (TIV). Приведены основные марки современных портативных твердомеров и описаны принципы и методы измерения твердости, которые они используют.

**Ключевые слова:** индентор; метод; принцип; твердомер; твердость.

**Ляпунов О. М.** «Принципи роботи портативних електронних твердомірів».

Портативні електронні твердоміри знайшли широке вживання для контролю твердості деталей, як в процесі виробництва, так і в процесі експлуатації. Велика різноманітність цих приладів зводиться всього лише до чотирьох принципів виміру твердості – по відскоку, по різниці частот між власною частотою коливань діамантового індентора і частотою заздалегідь навантаженого діамантового індентора, визначення твердості по величині електричного опору спеціального діамантового індентора та який реалізовує метод візуалізації відбитку індентора. Найширше багатьма фірмами та компаніями представлені портативні динамічні твердоміри (ASTM A956-06), що працюють по методу відскоку (твердість по Леебу, HL) і ультразвукові твердоміри (ASTM A1038), які використовують резонансно—імпедансний метод виміру твердості (Ultrasonic Contact Impedance – UCI метод).

Унікальний метод Esa Test®, відповідний Din50 158 був розроблений і запатентований фірмою Ernst (Швейцарія). В теперішній час він застосовується лише в приладах цієї компанії. Принцип визначення значення твердості по методу Роквеллу (En10109-3) був застосований цією ж фірмою завдяки запатентованому ними пристрою,

Великим кроком в розвитку мобільних твердомірів став випуск твердоміра, що реалізовує метод візуалізації відбитку індентора при вимірі твердості матеріалу по Вікерсу (TIV). Приведені основні марки сучасних портативних твердомірів і описані принципи і методи виміри твердості, які вони використовують.

**Ключові слова:** індентор; метод; принцип; твердомір; твердість.

**Луарипов А.** “Principles of work of electronic durometers”.

Electronic durometers found a wide use for control of hardness of details, both in the process of production and in the process of exploitation. The large variety of these devices is taken just to four principles of measuring of hardness – on a rebound, on the difference of frequencies between the eigenfrequency of vibrations of the diamond-pointed pyramid and frequency of the preliminary loaded diamond-pointed pyramid, determinations of hardness on the size of electric resistance of the special diamond-pointed pyramid and realizing method of visualization of imprint of indenter.

Most widely many firms and companies are present dynamic durometers (ASTM A956-06), workings on the method of rebound (hardness on Leeb, HL) and ultrasonic durometers (ASTM A1038) which use the resonance-impedance method of measuring of hardness (Ultrasonic Contact Impedance – UCI method).

Unique method of Esa Test®, proper Din50 158 was developed and patented a firm Ernst (Switzerland). V present tense it is used only in the devices of this company. Principle of determination of value of hardness on the method of Rockwell (En10109-3) was applied the same firm due to the device patented by them, a stride in development of mobile durometers was become by the issue of durometer, realizing the method of visualization of imprint of indenter at measurements of hardness of material on Vickers (TIV). The basic brands of modern durometers are resulted and principles and methods are described measurements of hardness, which they use.

**Key words:** indenter; method; principle; durometer; hardness.

*“Твердость есть мера сопротивления тела проникновению в него другого тела  
(стандарт ASTM)”*

### **1. Постановка проблемы**

Для оперативного массового производства в цеховых условиях и для оценки стабильности технологических процессов (термическая и механическая обработки, сварка, обработка давлением и т.д.) в настоящее время стали широко применяться портативные электронные твердомеры. Их отличают высокая производительность, простота измерений и обслуживания приборов.

**2. Цель статьи** заключается в анализе существующих методов измерения твердости переносными электронными приборами.

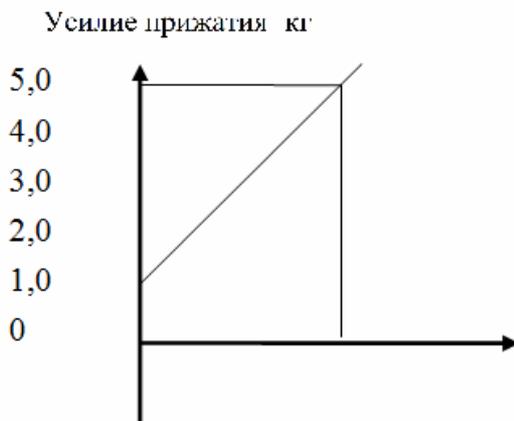
### **3. Основной материал**

В 1975 г. инженеры-исследователи Лееб и Брандестини предложили новую электронную машину (Швейцарский патент 596550), которая работала на принципе сравнения скоростей индентора, приводимого в действие пружиной, до и после отскока с поправкой на положение машины в момент измерений. Испытываемые материалы разделялись на подгруппы по их модулю Юнга.

**Технологія машинобудування**

Измерение твердости по отскоку (твердость по Леебу, HL), которое регламентируется ASTM A956-06 «Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products», было реализовано в динамических твердомерах Dina MIC, Dyna POCKET, Equotip 3, Equotip Piccolo, NOVOTEST Т-Д1 и Т-Д2, Константа К5Д, МЕТ-Д1, ТДМ-1, ТДМ-2, ТЕМП-2, ТЭМП-4К, ТКМ-359 и других. Динамический твердомер Либа состоит из измерительной трубки и электронного вычислительного блока. Динамические твердомеры делятся на два вида – со встроенным в корпус датчиком, и с выносным датчиком.

При измерении твердости по методу отскока определяется изменение скорости ударного тела после его отскока от поверхности исследуемого материала (рис. 1). При измерении пружинной



*Перемещение пружины*

**Рис. 1** – Изменение скорости ударного тела

задается энергия удара. Ударное тело, при нажатии спусковой кнопки ударного устройства, движется внутри направляющей втулки и ударяется о поверхность исследуемого изделия. В катушках датчика за счет перемещения магнитов тела наводится электрический сигнал, амплитуда которого пропорциональна скорости падения ( $A_p$ ). Падение ударного тела на поверхность исследуемого изделия приводит к пластической деформации материала, в результате чего на поверхности изделия остается отпечаток сферической формы. Эта пластическая деформация приводит к потерям энергии тела и снижению скорости его ( $R_p$ ) при отскоке.

Величина твердости определяется по соотношению скоростей в соответствии с уравнением:

$$HL = 1000 R_p / A_p$$

Путем специальной обработки сигналов соотношение скоростей привязывается к временным характеристикам момента падения и отскока. Поэтому окончательный результат оценки разности скоростей не зависит от направления падения ударного тела на изделие.

Предложенный динамический метод имеет ряд ограничений в применении. Он чувствителен к массе и размерам контролируемых объектов. Рекомендуется к использованию на изделиях с массой не менее 5 кг и толщиной стенки не менее 10-12 мм. Ограничения вызваны необходимостью исключить появление упругих колебаний в теле изделия, что приводит к дополнительной погрешности. Принцип измерения твердости методом Лееба идеально подходит для измерений тяжелых, крупногабаритных или уже установленных деталей и узлов.

В 1977 г. группой немецких инженеров был предложен резонансно—импедансный метод измерения твердости (Ultrasonic Contact Impedance – UCI метод). Электронная машина, сравнивающая разность частот между собственной частотой колебаний алмазного индентора и частотой предварительно нагруженного алмазного индентора, прижимаемого к испытываемой поверхности под усилием 0,5-0,8Н, легла в основу разработки серии портативных приборов для измерения твердости.

Ультразвуковой метод регламентируется ASTM A103810a «Standard Test Method for Portable Hardness Testing by the Ultrasonic Contact Impedance Method». (). Он реализован в

приборах типа MIC 10, MICRODUR, NOVOTEST T-У2, NOVOTEST T-УД2, Константа Т, МЕТ-У1, ТКМ-459 и других. Метод объединяет такие качества, как измерение под нагрузкой с высокой точностью при простом и удобном обслуживании. UCI метод позволяет осуществлять быстрое и удобное измерение твердости по Виккерсу без применения микроскопа.

Принцип измерения твердости прост: алмазная пирамидка для измерений по Виккерсу закреплена на конце металлического стержня, который под действием пьезоэлектрической пластины колеблется на собственной резонансной частоте. Если алмазная пирамидка внедряется в материал, то металлический стержень меняет резонансную частоту. Это изменение возрастает с увеличением площади контакта. Так как эта площадь контакта является мерой для оценки твердости, то существует прямая связь между изменением частоты и твердостью материала.

Для обеспечения процесса измерения по Виккерсу измерительный зонд прижимается к испытываемому изделию (рис. 2). При этом стержень с алмазной пирамидкой утапливается внутрь зонда, испытывая противодействие пружины. В соответствии с характеристикой пружины с увеличением перемещения возрастает и усилие прижатия, достигающее максимальной величины, когда стержень доходит до упора. Перед самым упором конечный выключатель в зонде разрешает проведение измерений твердости, т.е. измерение частоты по UCI методу. Процесс измерения твердости продолжается 6 миллисекунд.



Ультразвуковой метод практически не имеет ограничений по области применения. Минимальные допустимые

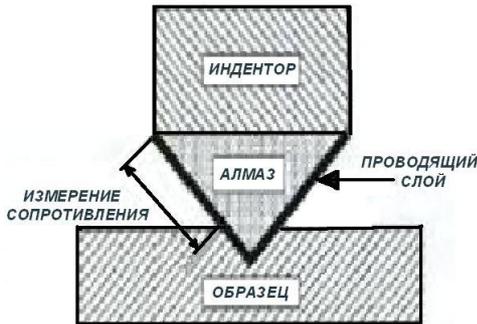
**Рис. 2** – Схема принципа действия измерительного зонда. значения массы и толщины стенки контролируемых изделий абсолютно условны, изделие только должно иметь участок с площадью достаточной для контакта с пирамидкой (индентором) и дальнейшего приложения усилия, т.е. прижатия датчика. Усилие прижатия равно 5 кгс, длится примерно секунду и при этом изделие не должно получать упругие или даже пластические деформации изгиба. На практике это обычно изделия с массой не ниже 100 грамм и толщиной стенки не менее 1 мм.

Ультразвуковой метод наиболее подходит для контроля твердости упрочненных поверхностных слоев, т.к. глубина проникновения индентора обычно находится в пределах 30-50 мкм.

Ультразвуковой метод наиболее подходит для контроля твердости упрочненных поверхностных слоев, т.к. глубина проникновения индентора обычно находится в пределах 30-50 мкм.

Для решения задачи измерения твердости малогабаритных деталей и труднодоступных поверхностей компания Ernst (Швейцария) разработала и запатентовала уникальный метод Esa Test®, соответствующий DIN50 158 (Патент ERNST HARTEPRUFER SA), Он основан на принципе определения твердости по величине электрического сопротивления специального алмазного индентора, воздействующего на поверхность образца (рис. 3). С помощью метода Esa Test® можно проводить тестирование в местах абсолютно недоступных для анализа классическими методами.

Алмазный индентор можно сравнить с небольшим потенциометром, который, по мере погружения в материал, изменяет свое сопротивление. А степень погружения зависит от твердости и нагрузки. При этом результаты измерения абсолютно не зависят от прогиба или изгиба образца, что крайне негативно влияет на точность классических методов анализа.

**Технологія машинобудування**

**Рис. 3** – Схематическое изображение индентора с проводящей поверхностью

настоящего времени исключались, так как обычно применяемые алмазные инденторы не проводят электрический ток. Ионная имплантация позволяет получить алмазы с электропроводящей поверхностью. Если такие алмазы используются в качестве инденторов, то они при вдавливании могут отмечать (указывать) свое положение, которое означает глубину проникновения.

Проводящая поверхность индентора формирует электрическую цепь между испытываемым объектом и металлической оправой алмазного индентора. Измеряя электрическое сопротивление между оправой и испытываемым объектом, можно получить показание о положении алмаза относительно поверхности. Отметим, что при медленном увеличении нагрузки постоянно фиксируется величина нагрузки и соответствующие значения сопротивления.

Метод Esa Test®, использован при изготовлении портативных твердомеров ESATEST HANDY и ESATEST MTR.

При использовании специального, удлинителя индентора возможно измерить твердость на участках, на которых до этого времени твердость можно было определить, только разрушив деталь. Например, в отверстиях и полостях или на зубах шестерен. Прибор не чувствителен к упругим деформациям. Портативная версия позволяет проводить измерения на вертикальных поверхностях или даже в потолочном положении.

Прибор сравнивает значение твердости меры твердости с твердостью испытуемого объекта. Очевидно, наивысшая точность получается тогда, когда твердость испытуемого объекта очень близка к твердости меры твердости.

Благодаря устройству, запатентованному фирмой Ernst (Швейцария), при разработке портативных твердомеров Computest SC (с рабочей нагрузкой 49 Н) и Dynatest SC (рабочая нагрузка 980 Н) был применен принцип определения значения твердости по методу Роквелла (EN10109-3).

Приложение предварительной и основной нагрузок производится последовательно, путем одного нажатия на испытательную головку, при этом установка нуля производится автоматически. В отличие от предыдущих твердомеров динамического действия, где использовалось ударное нагружение, в DYNATEST SC нагрузка на индентор возрастает постепенно в течение короткого промежутка времени. Результат измерения твердости выводится на цифровой ЖК-дисплей с подсветкой, что обеспечивает удобство работы и исключает ошибки считывания.

Для проведения измерения требуется только выбрать с помощью клавиатуры требуемую шкалу и приложить нагрузку. Подготовка поверхности необходима только в месте контакта с индентором.

Кроме того, запись процесса погружения ведется непрерывно, поэтому за одно измерение можно получить множество значений твердости, которые соответствуют различным нагрузкам. Таким образом, например, можно получить полную оценку состояния термообработки.

Данный принцип осуществляется при помощи ряда нововведений, которые удовлетворят разнообразные требования измерений твердости внутренних поверхностей, полостей муфт и шестерен, рассматриваемых до сих пор как недоступные. Электрические измерения до

Еще один шаг вперед в развитии мобильных твердомеров сделала фирма GE Sensing & Inspection Technologies, которая выпускает TIV – твердомер, реализующий метод визуализации отпечатка индентора.

Метод получения видимого изображения отпечатка индентора для измерения твердости материала по Виккерсу (TIV) позволяет «смотреть сквозь» алмазную пирамидку Виккерса с помощью специальной оптики. Определение твердости происходит под нагрузкой; как только нагрузка при испытании достигает определенного значения, изображение отпечатка автоматически оценивается и быстро напрямую передается на экран.

### **Выводы**

Развитие твердомерии на базе новейших технологий позволяет еще шире ввести контроль твердости в современный технологический процесс производства и контроля работоспособности действующего уникального оборудования и ответственных деталей во всех отраслях промышленности.

### **Список использованных источников:**

1. Динамический твердомер. Измерение твердости. – Режим доступа : <http://t-ndt.ru/index.php?id=1388>
2. Портативный твердомер для металлов Equotip : инструкция по эксплуатации. – Режим доступа : [http://www.proceq.com/fileadmin/documents/proceq/products/Hardness/Equotip\\_3/Russian/Equotip\\_3\\_Operating\\_Instructions\\_Russian\\_low.pdf](http://www.proceq.com/fileadmin/documents/proceq/products/Hardness/Equotip_3/Russian/Equotip_3_Operating_Instructions_Russian_low.pdf)
3. Особенности применения переносных твердомеров. – Режим доступа : <http://novotest.ua/rekomendacii-po-primeneniyu-priborov/osobennosti-primeneniya-portativnyh-tverdomerov.html>
4. Переносной твердомер для испытания при больших нагрузках ESATEST HANDY фирмы Ernst (Швейцария). – Режим доступа : <http://www.ndtural.ru/razdel.html?ir=4024&gc=4&ci=66>
5. Твердомер динамический ТД-32 : Паспорт. Руководство по эксплуатации. – Режим доступа : <http://nktd.com.ua/wp-content/uploads/2009/01/td32.pdf>
6. Твердомер универсальный NOVOTEST T : Паспорт. Руководство по эксплуатации. – 2009. – Режим доступа : [http://novotest.ua/media/novotest/passport\\_tverdomer\\_tud.pdf](http://novotest.ua/media/novotest/passport_tverdomer_tud.pdf)
7. TIV – твердомер. реализующий метод визуализации отпечатка индентора. – Режим доступа : <http://spektrsk.ru/pribor.php?id=1020>
8. ТЭМП - 4 Твердомер электронный малогабаритный переносной программируемый ТЭМП-4.4271-001 ПС : паспорт. – Москва, 2007. – Режим доступа : [http://www.kropus.ru/pdf/temp4\\_passport.pdf](http://www.kropus.ru/pdf/temp4_passport.pdf)
9. Универсальный переносной твердомер Т-УД3. – Режим доступа : <http://novotest.ua/tverdometry/universalnyi-perenosnoi-tverdomer-t-ud3.html>
10. Устройство и принцип работы электронного динамического твердомера. – Режим доступа : <http://www.chipmaker.ru/files/file/3650/>
11. Твердомер ESATEST MTR. – Режим доступа : <http://gnr-nord.ru/equipment/brands/ernst/esatest-mtr-x>

### **References**

1. N.d., *Dinamicheskij tverdomer. Izmereniye tverdosti*, viewed 01 June 2016, <<http://t-ndt.ru/index.php?id=1388>>.
2. Proceq 2014, *Instruksiya po ekspluatatsii. Portativnyy tverdomer dlya metallov Equotip*, viewed 01 June 2016, <[http://www.proceq.com/fileadmin/documents/proceq/products/Hardness/Equotip\\_3/Russian/Equotip\\_3\\_Operating\\_Instructions\\_Russian\\_low.pdf](http://www.proceq.com/fileadmin/documents/proceq/products/Hardness/Equotip_3/Russian/Equotip_3_Operating_Instructions_Russian_low.pdf)>.
3. N.d., *Osobennosti primeneniya perenosnykh tverdomerov*, viewed 01 June 2016, <<http://novotest.ua/rekomendacii-po-primeneniyu-priborov/osobennosti-primeneniya-portativnyh-tverdomerov.html>>.
4. N.d., *Perenosnoy tverdomer dlya ispytaniya pri bolshikh nagruzkakh ESATEST HANDY firmy Ernst (Shveysariya)*, viewed 01 June 2016, <<http://www.ndtural.ru/razdel.html?ir=4024&gc=4&ci=66>>.
5. N.d., *Tverdomer dinamicheskij TD-32 Paspport. Rukovodstvo po ekspluatatsii*, viewed 01 June 2016, <<http://nktd.com.ua/wp-content/uploads/2009/01/td32.pdf>>.
6. N.d., *Tverdomer universalnyy NOVOTEST T. Paspport. Rukovodstvo po ekspluatatsii*, viewed 01 June 2016, <<http://nktd.com.ua/wp-content/uploads/2009/01/td32.pdf>>.
7. N.d., *TIV – tverdomer. realizuyushchiy metod vizualizatsii otpechatka indentora*, viewed 01 June 2016, <<http://spektrsk.ru/pribor.php?id=1020>>.
8. N.d., *TEMP – 4 Tverdomer elektronnyy malogabaritnyy perenosnoy programmiruyemyy PASPORT TEMP-4.4271-001 PS Moskva 2007*, viewed 01 June 2016, <[http://www.kropus.ru/pdf/temp4\\_passport.pdf](http://www.kropus.ru/pdf/temp4_passport.pdf)>.
9. N.d., *Universal'nyy perenosnoy tverdomer T-UD3*, viewed 01 June 2016, <<http://novotest.ua/tverdometry/universalnyi-perenosnoi-tverdomer-t-ud3.html>>.
10. N.d., *Ustroystvo i printsip raboty elektronnoy dinamicheskogo tverdamera*, viewed 01 June 2016, <<http://www.chipmaker.ru/files/file/3650/>>.
11. N.d., *Tverdomer ESATEST MTR*, viewed 01 June 2016, <<http://gnr-nord.ru/equipment/brands/ernst/esatest-mtr-x>>.

Стаття надійшла до редакції 15 червня 2016 р.