

В.И. Мощенок

НОВЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ



Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины

ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.И. Мощенок

НОВЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Монография

Харьков
ХНАДУ
2012

УДК 620.178.15

ББК 30.3

М 87

Рецензенты:

Гавриш А.П. – Лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, Заслуженный деятель науки и техники, проф. кафедры «Технология машиностроения» НТУУ «КПИ», д.т.н., проф.;

Скобло Т.С. – Лауреат Государственной премии Украины, проф. кафедры технологических систем ремонтного производства ХНТУСХ им. П. Василенка, д.т.н., проф.;

Пятак А.И. – профессор кафедры технологии металлов и материаловедения ХНАДУ, д.ф.-м.н., проф.

М 87 **Мощенко В.И.** Новые методы определения твердости материалов : монография / В.И. Мощенко. – Х. : ХНАДУ, 2012. – 324 с.

ISBN 978-966-303-430-0

В монографии предложен, теоретически обоснован и экспериментально проиллюстрирован единый подход к определению твердости материалов в макро-, микро- и нанодиапазонах как способности сопротивляться вдавливанию индентора от момента контакта его с поверхностью и до максимального углубления. Независимо от размерного диапазона, твердость определяется делением нагрузки на площадь проекции (проекционная твердость), площадь поверхности (поверхностная твердость), объем (объемная твердость) отпечатка или внедренной в материал части индентора

Монография предназначена для научных работников, инженеров, студентов, аспирантов и преподавателей технических вузов, специализирующихся в области материаловедения и машиностроения.

Табл. 24. Ил. 144. Библиогр. наим. 262.

В монографії запропонований, теоретично обґрунтований і експериментально проілюстрований єдиний підхід до визначення твердості матеріалів в макро-, мікро- і нанодіапазонах як здатності чинити опір втискуванню індентора від моменту контакту його з поверхнею і до максимального заглиблення. Незалежно від розмірного діапазону, твердість визначається діленням навантаження на площу проекції (проекційна твердість), площу поверхні (поверхнева твердість), об'єм (об'ємна твердість) відбитку або втиснутої в матеріал частини індентора.

Монографія призначена для наукових працівників, інженерів, студентів, аспірантів та викладачів технічних вузів, які спеціалізуються в галузі матеріалознавства та машинобудування.

Табл. 24. Іл. 144. Бібліогр. найм. 262.

ISBN 978-966-303-430-0

УДК 620.178.15

ББК 30.3

© Мощенко В.И., 2012

© ХНАДУ, 2012

ВВЕДЕНИЕ

Определение твердости материалов является одним из самых распространенных комплексных методов механических испытаний. Зачастую только по твердости можно оценить свойства деталей без их разрушений. Несмотря на то, что история развития методов определения твердости материалов насчитывает более ста лет, сегодня стремительно развивающиеся нанотехнологии требуют новых подходов к оценке качества материалов, толщина которых достигает иногда нескольких десятков нанометров. Кроме того, имеется существенное противоречие между теоретическим определением твердости и использованием на практике этого механического свойства. С исторической точки зрения твердость рассматривается как способность материала сопротивляться внедрению индентора, в то время как на практике зачастую твердость определяют как отношение приложенной ранее максимальной нагрузки на индентор к параметрам получившегося отпечатка (методы Бринелля, Виккерса и др.). Поскольку твердость представляет собой одно из механических свойств материала, при ее определении не корректен анализ размеров получившегося отпечатка, который сам по себе в большей мере характеризует другое механическое свойство материала – пластичность.

Исследования материалов на твердость являются неотъемлемой частью любой отрасли машиностроения, насущной проблемой которого является минимизация размеров деталей, повышение их работоспособности путем упрочнения поверхности различными способами, в том числе и нанесением всевозможных покрытий, толщина которых стремится к уменьшению при одновременном увеличении срока их службы. Оценить механические свойства очень тонких покрытий, пленок, малых объемов материалов,

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ	6
1.1. Понятие «твердость»	6
1.2. Методы определения твердости вдавливанием индентора	10
1.3. Макро-, микро- и нанодиапазоны определения твердости	15
1.4. Классификация методов оценки твердости	18
1.4.1. Твердость по Шору и Барколу	22
1.4.2. Диаграмма индентирования	26
1.4.3. Ползучесть	30
1.4.4. Работа индентирования	32
1.4.5. Твердость по Бринеллю	36
1.4.6. Твердость по Роквеллу	40
1.4.7. Твердость по Виккерсу	43
1.4.8. Твердость индентирования	46
1.4.9. Метод среднего контактного давления	47
1.5. Анализ методов оценки твердости материалов с помощью диаграммы индентирования	49
1.6. Размерный эффект при определении твердости материалов	52
1.7. Сравнение чисел твердости, полученных разными методами	56
Выводы	58
2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ, ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛОВ	61
2.1. Проекционная твердость	61
2.1.1. Определение проекционной твердости пирамидой Виккерса	64
2.1.2. Определение проекционной твердости сферическим индентором	65
2.1.3. Определение проекционной твердости сфероконическим индентором	65
2.1.4. Сравнение проекционной твердости, полученной вдавливанием пирамидальных, сферических и сфероконических инденторов	67
2.2. Поверхностная твердость 73	
2.2.1. Определение поверхностной твердости пирамидой Виккерса	74
2.2.2. Определение поверхностной твердости пирамидой	

Берковича	74
2.2.3. Определение поверхностной твердости сферическим индентором	75
2.2.4. Определение поверхностной твердости сфероконическим индентором	76
2.2.5. Определение поверхностной твердости сфероконическими инденторами для наноизмерений	77
2.2.6. Определение поверхностной твердости индентором Шора	79
2.3. Объемная твердость	80
2.3.1. Определение объемной твердости пирамидой Виккерса	80
2.3.2. Определение объемной твердости пирамидой Берковича .	81
2.3.3. Определение объемной твердости сферическим индентором	81
2.3.4. Определение объемной твердости сфероконическими инденторами	82
2.3.5. Определение объемной твердости сфероконическими инденторами для нанодиапазона	84
2.3.6. Определение объемной твердости индентором Шора	86
2.4. Приборы и материалы для исследования твердости	87
2.4.1. Приборы для оценки нанотвердости материалов	87
2.4.2. Приборы для исследования микротвердости материалов ...	98
2.4.3. Твердомер нового поколения для исследования твердости материалов в макродиапазоне	100
2.4.4. Материалы для исследований	107
Выводы	113
3. ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ	115
3.1. Построение сфероконической и сферопирамидальной геометрической и математической моделей пирамиды Берковича	119
3.2. Твердость индентирования образцовых мер твердости в нанодиапазоне	126
3.3. Оценка твердости образцовых мер в нанодиапазоне по характеристике 1-го порядка	138
3.4. Оценка твердости образцовых мер в нанодиапазоне по характеристике 2-го порядка	140
3.4.1. Поверхностная твердость образцовых мер твердости в нанодиапазоне с использованием сферопирамидальной и идеальной моделей пирамиды Берковича	141
3.5. Определение объемной твердости в нанодиапазоне	142
3.6. Исследование отпечатков пирамиды Берковича на образцовых мерах твердости	146
3.7. Определение восстановительной и невосстановительной	

поверхностной нанотвердости материала при использовании сферопирамидальной пирамиды Берковича	152
3.8. Нанотвердость, определяемая сферическим и сфероконическим инденторами	162
3.8.1. Поверхностная и объемная нанотвердость, определяемые по нагрузочной ветви диаграммы индентирования сферическим и сфероконическим инденторами	163
3.8.2. Невосстановленная и восстановленная нанотвердость, определяемая по точкам при максимальной и минимальной нагрузках на сферическую часть сфероконического индентора ..	167
Выводы	179
4. МИКРОТВЕРДОСТЬ МАТЕРИАЛОВ	182
4.1. Особенности определения микротвердости материалов	182
4.2. Влияние на микротвердость условий испытаний и свойств материалов	183
4.3. Зависимость восстановленной поверхностной и объемной микротвердости при нагрузке до 2 Н стальных образцовых мер твердости на приборе ПМТ-3	185
4.4. Зависимость восстановленной поверхностной и объемной микротвердости при нагрузке до 2 Н медных образцов на приборе ПМТ-3	188
4.5. Зависимость восстановленной поверхностной и объемной микротвердости с увеличением нагрузки до 5 Н стальных образцовых мер на приборе HVS-1000	191
4.6. Зависимость восстановленной поверхностной и объемной микротвердости от изменения нагрузки при исследовании чистых металлов, сталей, цветных сплавов, покрытий, неметаллических материалов	195
4.7. Зависимость невосстановленной поверхностной и объемной микротвердости при нагрузке до 2Н стальных образцовых мер твердости на приборе NanoTest	199
Выводы	207
5. ИССЛЕДОВАНИЕ МАКРОТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ	209
5.1. Особенности определения макротвердости материалов	209
5.2. Зависимость твердости по методу Бринелля от нагрузки на индентор при исследовании стальных образцовых мер твердости	211
5.3. Зависимость твердости по методу Виккерса от нагрузки на индентор при исследовании титанового сплава	217
5.4. Зависимость твердости по методу Виккерса от нагрузки на индентор при исследовании оргстекла	222
5.5. Зависимость твердости по методу невосстановленного отпечатка от нагрузки на сферический индентор при исследовании стальных	

образцовых мер твердости	223
5.6. Зависимость поверхностной и объемной твердости от нагрузки при исследовании стальных образцовых мер твердости сферическими, сфероконическим и пирамидальным инденторами	226
Выводы	232
6. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРА ИЗМЕНЕНИЯ РАЗМЕРНОГО ЭФФЕКТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ФОРМЫ ИНДЕНТОРА И СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ	233
6.1. Существующие представления о характере изменения размерного эффекта при измерении твердости разными инденторами	233
6.2. Проверка закона Мейера при определении твердости различными по форме инденторами	234
6.3. Экспериментальная проверка соответствия закону Мейера при определении твердости по методу невосстановленного отпечатка разными по форме инденторами	237
6.4. Уточнение закона Мейера при определении твердости по методу невосстановленного отпечатка разными по форме инденторами	241
6.5. Теоретические исследования характера изменения размерного эффекта в зависимости от формы индентора и способа определения твердости	244
6.5.1. Теоретические исследования характера изменения размерного эффекта при определении твердости сферическим индентором	245
6.5.2. Теоретические исследования характера изменения размерного эффекта при определении твердости пирамидальными инденторами	247
6.5.3. Теоретические исследования характера изменения размерного эффекта при определении твердости сферопирамидальным и сфероконическим инденторами	250
6.5.4. Экспериментальное подтверждение теоретических исследований характера изменения размерного эффекта при определении твердости материалов инденторами	251
Выводы	252
7. СРАВНЕНИЕ ЧИСЕЛ ТВЕРДОСТИ, ПОЛУЧЕННЫХ РАЗНЫМИ МЕТОДАМИ	253
7.1. Анализ проблем перевода чисел твердости из одного метода в другой	253
7.2. Влияние формы индентора на зависимость «нагрузка–глубина внедрения» для стали низкой твердости (образец №1)	254
7.3. Влияние формы индентора на зависимость «нагрузка–глубина внедрения» для стали средней твердости (образец №2)	262

7.4. Влияние формы индентора на зависимость «нагрузка–глубина внедрения» для стали высокой твердости (образец №3)	267
7.5. Соотношение зависимостей «нагрузка–глубина внедрения» для разных пар инденторов и твердости образцов	272
7.6. Методика перевода чисел твердости, полученных вдавливаемыми разными инденторами, с использованием в качестве основного критерия глубины внедрения индентора	280
Выводы	283
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ	285
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	290